

ТОМОГРАФИЯ
ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ

УДК 631.43

АНАЛИЗ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ
ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВ МЕТОДАМИ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ¹

© 2021 г. Т. Г. Калнин^{а, *}, Д. А. Ивонин^а, К. Н. Абросимов^б, Е. А. Грачев^а, Н. В. Сорокина^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

*e-mail: kremor1994@gmail.com

Поступила в редакцию 06.02.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

В работе использована методика численного анализа трехмерных томографических изображений порового пространства почвенных объектов. Она основана на применении методов интегральной геометрии, топологии и морфологического анализа. Для количественной характеристики изменения структуры порового пространства исследованы томографические изображения четырех ненарушенных образцов: тяжелосуглинистой агросерой почвы (Retic Phaeozem), агроминерального (Sapric Rheic Mineralic Histosols) и гипнового (brown moss Sapric Rheic Histosols) торфоземов в сухом и влажном состояниях. Для образцов подпахотного горизонта агросерой почвы наблюдалось уменьшение обоих чисел Бетти в процессе смачивания, где нулевое число (b_0) отображает количество топологически простых, закрытых пор, а первое число (b_1) свидетельствует об уменьшении значения связности в более узком диапазоне в сравнении с b_0 . При увлажнении образца агроминерального торфозема характеристика Эйлера-Паункаре принимает отрицательные значения в диапазоне пор 0.1–0.16 мм, что говорит о преобладании сложной, разветвленной структуры порового пространства и высокой связанности пор. При насыщении гипнового мха большое количество туннельных пор сужаются (“схлопываются”), связанность уменьшается за счет особенностей сложения длинноствольных растительных остатков. Количество пор и связей между ними в торфоземах на порядок превышает те же показатели агросерой почвы в горизонте А подпахотном. Приведенные количественные изменения предложенных параметров томографического изображения порового пространства почв подтверждают возможность их использования для оценки трансформации порового пространства почв.

Ключевые слова: пористость, функционал Минковского, числа Бетти, характеристика Эйлера-Паункаре, компьютерная томография, Phaeozem albic, Sapric Rheic Histosols

DOI: 10.31857/S0032180X21090033

ВВЕДЕНИЕ

Пористость почв является трехмерной структурой со сложной геометрией внутренней поверхности. Эта 3D матрица порового пространства и форма границы раздела фаз пора–твердофазный скелет во многом определяют механические и гидрологические характеристики почв. Использование компьютерной томографии позволяет получать информацию о структуре порового пространства почв с высокой степенью детализации без разрушения образцов, но для получения количественной информации о структуре пор необходимо применение различных методов, связанных

с количественным анализом трехмерных изображений.

Существует множество примеров анализа двумерных и трехмерных изображений почв и горных пород с помощью статистических, морфологических и других операций. Эти методы имеют свои преимущества и недостатки, при этом далеко не все имеют физическое обоснование [1, 3]. Поэтому в настоящей работе рассматриваются инструменты, в основе которых лежит фундаментальная основа – статистическая физика, интегральная геометрия и топология. Функционалы Минковского – четыре основные геометрические и топологические характеристики, которые ставятся в соответствие трехмерному объекту с целью описания его структуры, и с точностью до множителя соответствуют объему пор, площади

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X21090033 для авторизованных пользователей.

поверхности пор и интегральной средней кривизне границы раздела фаз пора–твердофазный скелет. Также используется характеристика Эйлера-Пуанкаре сложного (выпуклого/вогнутого) пористого пространства, которая принимается интегральной характеристикой сложности пористого тела [34].

Существуют исследования, посвященные применению методов интегральной геометрии и морфологического анализа для анализа сред со сложной внутренней структурой. Так, в ранних работах исследуются искусственно сгенерированные среды [11, 29] и двумерные срезы образцов горных пород [10], в более поздних работах – трехмерные томографические [18, 33, 35] и FIB-SEM изображения [15]. В частности, в работе [35] демонстрируется подход к численному описанию внутренней геометрии образцов почв, подвергавшихся различным видам обработки, на основе анализа эволюции функционалов Минковского в процессе дилатации как твердой фазы, так и порового пространства. Стоит отметить применимость методов к объектам на всевозможных масштабах: методы интегральной геометрии позволяют численно описывать геометрию внутриагрегатного порового пространства [46], межагрегатных и макроскопических пор [36].

Отдельно отметим, что существуют работы, демонстрирующие связь функционалов Минковского с некоторыми функциональными характеристиками самих сред или течений жидкости в них [9, 14, 28, 45]. Также внимания заслуживает работа [24], где с помощью методов интегральной геометрии, а также теории персистентных гомологий, исследуется изменение внутренней геометрии порового пространства коллектора нефти в процессе кислотной обработки.

В настоящей работе методология анализа внутренней геометрии порового пространства применена для образцов различных почв в сухом и близком к насыщению влагой состояниях почв с целью количественной демонстрации происходящих в почве изменений [5, 7]. Томографические изображения были получены для почв в сухом и влагонасыщенном состоянии. В отличие от работ, в которых исследуется эволюция функционалов Минковского в процессе эрозии и дилатации порового пространства, в данном исследовании предлагается использовать морфологическую операцию “открытия” (morphological opening operation) [33], которая позволяет построить кумулятивные и некумулятивные распределения функционалов Минковского по размерам пор в привычных метрических единицах. Также предлагается анализировать числа Бетти порового пространства в дополнение к функционалам Минковского, поскольку они имеют наглядную интерпретацию: первое число Бетти соответствует числу отдель-

ных пор, а второе число Бетти – числу туннелей в поровом пространстве образца почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Образцы почвы. Для исследования применимости интегральной геометрии исследованы почвы, контрастные по происхождению, составу и гидрофизическим свойствам: агросерую (Retic Phaeozem) и торфозем (Sapric Rheic Histosols). Образцы имеют совершенно различную структуру, изменяющуюся при взаимодействии с водой, что по-разному влияет на изменения объемных показателей [23].

Образцы низинного торфа отобраны в Яхромской долине в пределах территории стационара ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева (Дмитровский район Московской области).

Торфоземы стационара ВНИИМЗ подразделяются на 2 вида: 1 – на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами (Sapric Rheic Histosols (Lignic)), 2 – агроминеральные (Sapric Rheic Drainic Histosols (Mineralic)). Гипновые торфоземы как правило имеют высокую естественную влажность и относятся к трудноосушаемому. Два фактора определяют генезис торфяных участков в Яхромской котловине: р. Яхромы, находящаяся близко к участку, в период разлива сформировала торфоземы агроминеральные; второй фактор – мощные напорные железисто-карбонатные воды, выклинивающиеся в притеррасной части Яхромской долины. Агроминеральные (зольность 23%) торфа сформированы под влиянием р. Яхромы и представляют собой агроминеральные торфянопереслойные почвы (рис. S1). Гипновые торфоземы (зольность 16%) на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами (рис. S2). Более подробно свойства торфоземов представлены в табл. 1. Данные торфа, как правило, имеют высокую естественную влажность, относятся к трудноосушаемому за счет их густостебельного и разрыхленного сложения. По структуре гипновые торфа представлены длинностебельными и веточными листьяподобными образованиями, что должно было сказаться на их поведении во влажном и воздушно-сухом состоянии. Под естественной плотностью понимается насыпной образец, близкий к естественному состоянию. Экспериментальная плотность достигалась уплотнением торфяной колонки постукиванием.

Для исследования выбраны торфа, отличные по ботаническому составу, зольности, степени разложения и другим свойствам.

Образцы агросерой почвы отобраны во Владимирском ополье расположенном на Русской равнине северо-западнее г. Владимира, на левом высоком берегу р. Клязьмы, к юго-востоку от границы

Таблица 1. Некоторые физические свойства торфоземов

Почва	Глубина, см	Плотность, г/см ³		Степень разложения	Зольность
		естественная	экспериментальная		
Торфоземы агроминеральные	5–15	0.35	0.45	79.8	37.3
	25–40	0.2	0.3		37.2
Торфоземы на гипновом торфе	5–15	0.17	0.23	62.1	37
	25–40	0.12	0.22		38.6

Таблица 2. Некоторые физические свойства агросерой почвы

Горизонт, глубина, см	Гранулометрический состав, мм			Плотность, г/см ³	НВ*, % массы	Коэффициент фильтрации, см/сут
	<0.002	0.002–0.05	>0.05			
Апах, 0–21	17.39	80.66	1.95	1.1	37.3	60
	17.35	80.21	2.44	1.16	37.2	58
	17.21	80	2.79	1.21	37	52
Аподпах, 21–37	17.03	81.62	1.75	1.33	38.6	26
	16	82.43	1.57	1.36	38.2	32
АВ, 37–57	17.35	81.76	0.89	1.33	37.4	35
	17.32	82.09	0.59	1.39	35.3	35
В2, 72–96	18.4	81.1	0.5	1.4	37.6	28.5

* Наименьшая влагоемкость.

Московского оледенения. Эта территория относится к зоне достаточного увлажнения: средняя многолетняя сумма осадков составляет 575 мм при испаряемости свыше 400 мм в год. Почвы Владимирского ополья в основном представлены агросерыми лесными (Retic Phaeozem, WRB 2014 г., версия 2015 г.) [41]. Некоторые физические свойства этих почв представлены в табл. 2. Гранулометрический состав образцов Retic Phaeozem определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 comfort (FRITCH, Germany). Плотность почв, наименьшую влагоемкость, коэффициент фильтрации, зольность и степень разложения определяли традиционными классическими методами [7, 8].

В исследуемых агросерых почвах с глубины 20–30 см проявляется плужная подошва (подпочвенное уплотнение – subsoil compaction) в виде уплотнения на глубине 20–40 см, в более глубоких слоях переходящее в уплотненные эволюционными почвенными процессами горизонты. Уплотнение не превышает критических отметок для суглинистых агропочв (до 1.4 г/см³) [18], однако по сравнению с пахотными горизонтами, в которых плотность находится на оптимальном уровне, различия существенны. Данное явление стоит отме-

тить как характерное для тяжелосуглинистых интенсивно используемых пахотных почв.

Для лабораторного изучения с использованием томографии были отобраны 2 монолитных образца агросерой почвы, а также образцы агроминерального и гипнового торфоземов, которые помещались в цилиндрические рентгенпрозрачные кюветы диаметром 16 мм и высотой 40 мм. Томографическая съемка почв проводилась на микро-томографе SkyScan 1172 (Бельгия) в ФГБНУ ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”. Визуализация порового пространства выполнена с использованием ПО CTvox ©Bruker (по данным сегментации и расчета локальной толщины пор) для торфогрунтов и ImageJ для агросерых почв.

Насыщение образцов водой и рентгеновская компьютерная микротомография. Томографическая съемка проводилась в двух вариантах состояния образцов – воздушно-сухие и увлажненные до состояния, близкого к наименьшей влагоемкости. Для этого один и тот же образец после томографической съемки в воздушно-сухом состоянии увлажняли избытком влаги через подложку из нескольких слоев фильтровальной бумаги в течение 7 сут с постоянным доливом воды до появления водного зеркала на поверхности

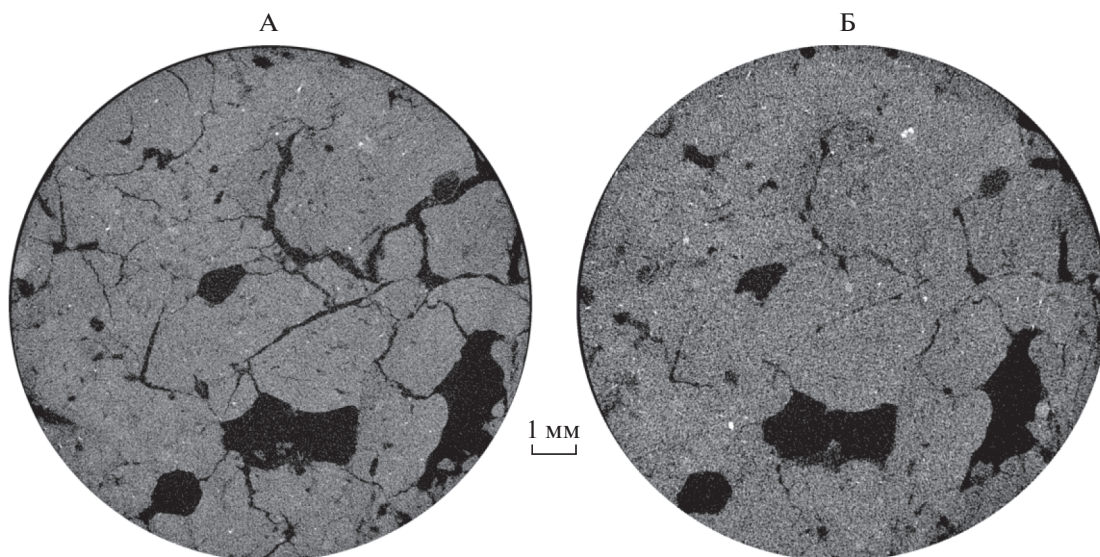


Рис. 1. Горизонтальный томографический срез одного из образцов агросерой почвы с глубины 30–40 см: А – в сухом состоянии; Б – в насыщенном состоянии.

бумажной подложки, затем свободно дренировали на песчаной подложке до постоянного веса при отсутствии испарения и после томографировали в течение 2–3 ч. Перед томографической съемкой образец герметизировали полиэтиленовой пленкой, что исключало испарение воды в процессе съемки и деформацию структуры вследствие процессов усадки, вызванных испарением. Параметры съемки выбраны, исходя из протоколов работы с аналогичными почвенными образцами, томографическое исследование которых осуществлялось ранее [20, 25, 32, 44].

После проведения томографической съемки получали изображения образцов в виде трехмерных массивов действительных чисел, которые соответствуют поглощающей способности вещества вокселей размером $8 \times 8 \times 8$ мкм в каждой конкретной точке почвенного образца. В процессе реконструкции из исходных данных получаются горизонтальные срезы в виде стека данных (файлы формата TIFF), на основе которых можно построить срезы любой пространственной ориентации или сегментировать поровое пространство.

Из анализа томографических данных хорошо видна разница между сухим и набухшим образцом даже в плоских (вертикальных и горизонтальных) срезах. Набухание деформирует почву и сокращает объем порового пространства на уровне мезо- и макропор, что заметно на срезах без применения математической обработки. На рис. 1 приведены 2D-томографические изображения одного из образцов в сухом и насыщенном водой состояниях. Визуально наблюдается сокращение порового пространства в насыщенном образце (черный цвет) за счет увеличения объема почвы

(серый цвет) и изменения цвета на более темный, что указывает на более низкое поглощение рентгеновского излучения при идентичных настройках съемки. Видны изменения в структуре порового пространства на качественном уровне: некоторые плоские трещины закрылись, а поры округлой формы сузились.

Но обработка только плоских срезов не даст полной картины изменений в поровом пространстве при набухании, что можно получить при обработке объемных данных с количественным описанием геометрических и топологических свойств.

Функционалы Минковского и числа Бетти. Пусть X – объект (пора, поровое пространство), ограниченный поверхностью δX в трехмерном пространстве $E = R^3$. Для описания геометрических и топологических свойств такого тела, интегральная геометрия позволяет определить 4 топологических инварианта – функционалов Минковского [21, 30], не меняющихся при непрерывном преобразовании тела (гомеоморфизме) (рис. 2).

В данной работе мы будем рассматривать трехмерные томографические изображения образцов почв. В качестве объекта исследования выбрано пористое пространство, поскольку его структура во многом определяет свойства почв [2, 4, 20]. В этом случае функционалы Минковского с точностью до множителя соответствуют объему пор (M_0), площади поверхности пор (M_1) и интегральной средней кривизне границы раздела фаз пора–твердофазный скелет (M_2), а также характеристике Эйлера-Пуанкаре пористого пространства (M_3) [10]:

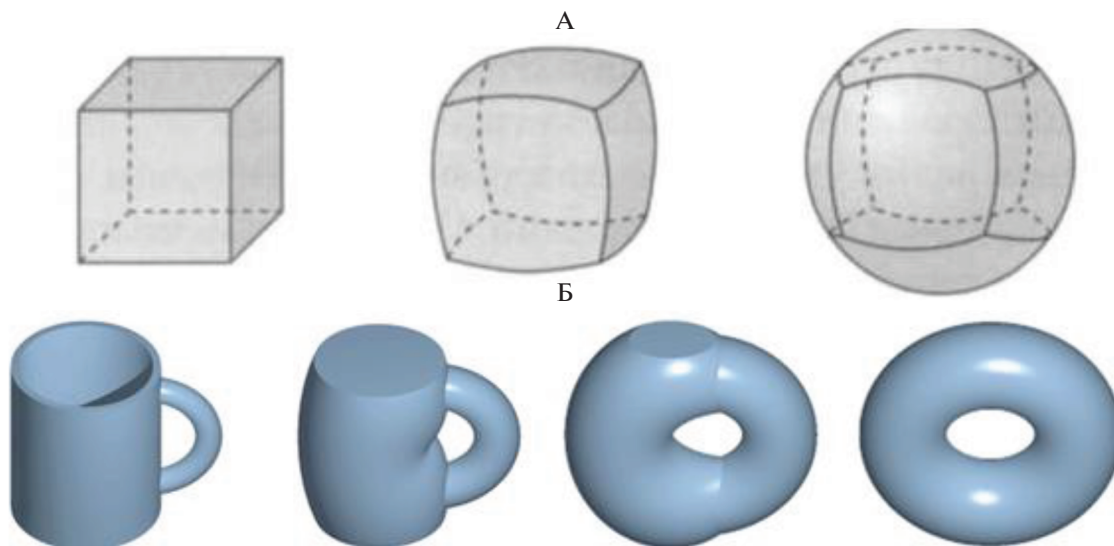


Рис. 2. Гомеоморфные тела: А – без разрыва (шар); Б – с одним разрывом (тор).

$$M_0(X) = V(X), \quad M_1(X) = \int_{\delta X} dS = S(X),$$

$$M_2(X) = \int_{\delta X} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) dS = C(X),$$

$$M_3(X) = \int_{\delta X} \frac{1}{r_1 r_2} dS = 2\pi\chi(\delta X) = 4\pi\chi(X),$$

где r_1 и r_2 – главные радиусы кривизны поверхности dS , а $\chi(\delta X)$ и $\chi(X)$ – характеристики Эйлера-Пуанкаре для поверхности δX и выпуклого тела X соответственно. Для того, чтобы избежать привязки значений функционалов к конкретному образцу, в дальнейшем будем использовать их удельные по объему вычислительной области значения. Это означает, что если разрешение томографического изображения составляет $1000 \times 1000 \times 1000$ вокселей, то значения функционалов делится на 10^9 .

Характеристика Эйлера-Пуанкаре для выпуклого тела X представляет собой интегральную оценку топологической сложности тела и может быть определена как знакопеременная сумма чисел Бетти:

$$\chi(X) = b_0(X) - b_1(X) + b_2(X),$$

где числа Бетти могут быть интерпретированы следующим образом: b_0 – число отдельных пор (полые пространства, не имеющие выходов за границы образца). Топологически гомеоморфные шару (рис. 2, А) и всегда являющиеся закрытыми порами), b_1 (туннели) – число, характеризующее количество связей в поровом пространстве. Например, сквозные поры, имеющие больше одного выхода за пределы образца (чем больше вы-

ходов, тем больше число b_1). Либо закрытая пора с формой, топологически гомеоморфной тору (рис. 2, В) или сложнее (двойной тор увеличивает число b_1 на 2, тройной тор на 3 и т.д.). Чем большее значение принимает число b_1 , тем более разветвленное поровое пространство. b_2 – число кластеров связности твердой фазы, окруженных пустотами (b_2 должно быть равно единице, поскольку твердые кластеры, за исключением самого образца, не могут быть полностью окружены пустотами).

Стоит отметить, что если в исследуемом образце выделяется только две фазы (поры и твердый скелет), то вычислив функционалы Минковского и числа Бетти для одной из них, соответствующие значения указанных величин для второй фазы могут быть определены аналитическим путем.

Алгоритмы. Трехмерное изображение порового пространства может быть представлено в виде кубического клеточного комплекса – трехмерной карты, состоящей из вокселей (трехмерных пикселей). Геометрические и топологические свойства кубических комплексов изучает цифровая топология. Существует несколько алгоритмов, позволяющих вычислять значения функционалов Минковского [26, 30, 39]. В работе [39] предлагается алгоритм, основанный на подсчете числа различных локальных конфигураций $2 \times 2 \times 2$ вокселя, а в работе [30] рассмотрен алгоритм, основанный на подсчете числа вершин, ребер, граней и вокселей в кубическом комплексе:

$$\begin{aligned} V(X) &= n_c, \quad S(X) = -6n_c + 2n_f, \\ 2C(X) &= 3n_c - 2n_f + n_e, \\ \chi(X) &= -n_c + n_f - n_e + n_v, \end{aligned}$$

где n_c – число вокселей, n_f – число граней, n_e – число ребер и n_v – число вершин в кубическом клеточном комплексе, соответствующему поровому пространству образца. В настоящем исследовании использовали программное обеспечение [27] для вычисления функционалов Минковского. Нулевое и второе числа Бетти (числа связанных кластеров порового пространства и твердой матрицы) вычисляли с использованием базовых функций MATLAB и ImageJ [38].

Аддитивность функционалов Минковского позволяет реализовать комбинаторные алгоритмы их вычисления, которые не требуют значительных вычислительных ресурсов и допускают использование параллельных вычислений в случае, если исходное изображение имеет высокое разрешение.

Используемая в настоящей работе операция морфологического открытия относится к классу методов, называемых математической морфологией. Классическая математическая морфология предложена в работе [40], где введены основные морфологические операции: эрозия (сужение) рис. S3(A) и дилатация (расширение) рис. S3(B), а также производные от них операции: открытие и закрытие. После бинаризации получившееся трехмерное изображение почвы состоит из пустотных вокселей и вокселей твердой фазы. Морфологическая операция дилатация, применяемая к пустотному пространству, переводит твердофазные воксели на границе пора/твердая фаза в пустотные, тем самым “расширяя” поры в данном случае. Операция эрозии, наоборот, переводит пустотные воксели на границе пустотного пространства в воксели твердой фазы, “сужая” поры. Толщина слоя вокселей, меняющихся после этих операций определяется структурным элементом, “скользящим” по границе раздела фаз. Операция открытия – это комбинация выполненных последовательно операций эрозии и дилатации с одинаковым структурным элементом. Математическая морфология неоднократно применялась для анализа томографических изображений почв [36, 37, 45]. Подробный обзор методов морфологического анализа и их применимости для исследования двумерных и трехмерных изображений естественных структур приведен в [31].

Рис. S4 демонстрирует результат применения морфологической операции “открытие” с увеличивающимся структурным элементом в форме диска к изображению порового пространства образца почвы [27]. Благодаря этим операциям можно рассчитать функционалы для пор различного диаметра. Построение подобных распределений функционалов для порового пространства образцов в сухом и влажном состояниях позволит количественным образом описать изменения, происходящие в структуре порового пространства в процессе насыщения почвы влагой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Детальный анализ монолитных образцов. Рассмотрим распределения функционалов Минковского и чисел Бетти по размерам пор на примере образца из горизонта Аподпах, отобранного на глубине 30–40 см, изображение порового пространства которого приведено на рис. 3, второй образец можно увидеть на рис. S5. Анализ зависимостей, приведенных на графиках (рис. S6–S12) показывает, что в процессе насыщения водой общая пористость образца уменьшилась во всем видимом диапазоне размеров пор, как сократилась и удельная площадь поверхности пор. Интегральная средняя кривизна порового пространства уменьшается только в диапазоне <0.4 мм, что объясняется закрытием мелких пор (обладающих большой удельной кривизной поверхности). Крупные поры и трещины лишь незначительно уменьшаются в размере и не меняют свою форму, поэтому их кривизна изменяется незначительно.

Изменения в структуре порового пространства в разных состояниях почвы иллюстрируют распределения характеристики Эйлера-Пуанкаре (χ) и чисел Бетти. Значение χ показывает разность b_0 и b_1 , топологическую сложность структуры: чем больше ее значение по модулю, тем более один вид пор преобладает над другим. Чем более отрицательна характеристика Эйлера-Пуанкаре χ , тем больше разветвленных, связанных и сообщающихся между собой пор относительно отдельных, топологически простых (шаров) по структуре пор. Отрицательные значения χ наблюдались при насыщении водой образца агроминерального торфозема (рис. S13). При больших положительных значениях χ ситуация обратная: топологически простые, отдельные и закрытые поры преобладают, как для образца гипнового торфозема (рис. S15). Однако стоит отдельно рассматривать нулевое и первое числа Бетти, так как при взаимном, количественно одинаковом изменении чисел b_0 и b_1 характеристика Эйлера-Пуанкаре не изменится, а при одинаковых значениях чисел Бетти она будет равна 0.

Для образца 1 агросерой почвы во всем диапазоне размеров пор характеристика Эйлера-Пуанкаре (рис. S17) порового пространства уменьшается в процессе набухания, то есть поровое пространство смещается в сторону топологически более связанного. Это подтверждается анализом чисел Бетти, которые допускают наглядную интерпретацию: нулевое число Бетти соответствует числу кластеров связности порового пространства, а первое число Бетти – числу туннелей в твердой фазе. Отдельные поровые пространства (b_0) – полые пространства, не имеющие выходов за границы образца. Топологически гомеоморфные шару и всегда являющиеся закрытыми порами. Туннели (b_1) – открытые поры, имеющие больше одного выхода за пределы образца (сквозная), либо закрытые поры с

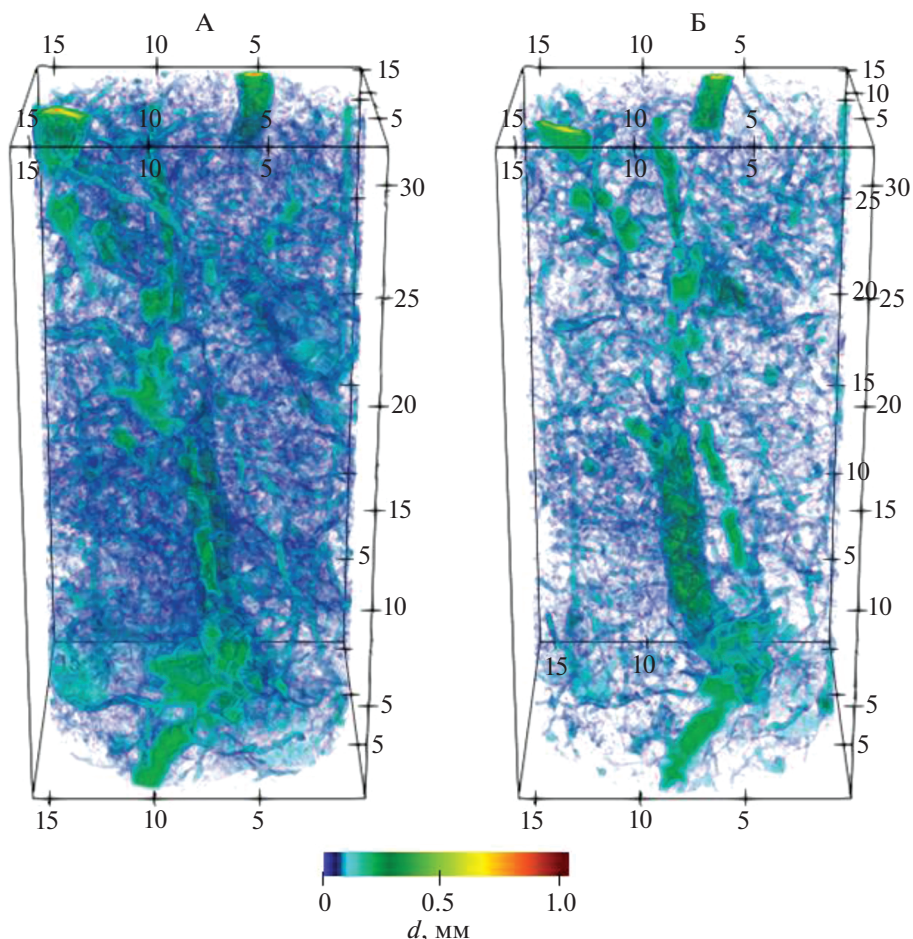


Рис. 3. Визуализация порового пространства образца 1 агросерой почвы, отобранного на глубине 30–40 см из горизонта Аподпах: А – в сухом, Б – в насыщенном жидкостью состояниях. Цветами обозначено Евклидово расстояние до твердой фазы. Поры, окрашенные в сине-зеленые цвета, не превышают 0.2 мм в диаметре.

формой, топологически гомеоморфной тору. Анализ распределений показывает, что сухой образец содержит большее число и отдельных пор, и туннелей по сравнению с влажным, причем отличие в основном заключается в диапазоне <0.4 мм. При этом закрытых и топологически простых пор закрывается больше, чем туннелей: $b_0^{\text{dry}} - b_0^{\text{wet}} > b_1^{\text{dry}} - b_1^{\text{wet}}$.

Расхождение значений нулевого числа Бетти (рис. 4, А) при насыщении образца водой охватывает больший диапазон пор, чем расхождение значений первого числа Бетти (рис. 4, В). Это говорит о большем влиянии сил, возникающих при набухании на туннельные, разветвленные поры с диаметром большим, чем 0.3 мм. Количество отдельных, закрытых пор такого диаметра не изменяется при насыщении образцов агросерой лесной почвы.

Второе число Бетти предсказуемо равно единице (оно соответствует числу кластеров связанности твердой фазы, полностью окруженных пустотным пространством) и на графиках не представлено. Можно заметить, что часть пор и каналов

малого размера, присутствующих на изображении сухого образца (слева), отсутствует на изображении влажного образца (справа). Крупные поры и каналы уменьшились в размере и сохранились на изображении образца во влажном состоянии.

При насыщении образца агроминерального торфозема (визуализация образца на рис. 5) число b_0 не изменилось, следовательно, количество отдельных (не связанных), закрытых пор не изменилось. Увеличилось число b_1 , что может говорить об образовании водонаполненных пустот в твердой органической фазе. По изменениям характеристики Эйлера Пуанкаре можно говорить, что в сухом образце отдельные закрытые поры преобладали над туннелями в диапазоне диаметров <0.2 мм, но при насыщении их количество практически сравнялось за счет увеличения числа туннелей и связей порового пространства.

В образце гипсового торфозема (визуализация образца на рис. S2) оба числа Бетти пропорционально уменьшились, характеристика Эйлера-Пуанкаре в сухом и насыщенном образцах имеет схо-

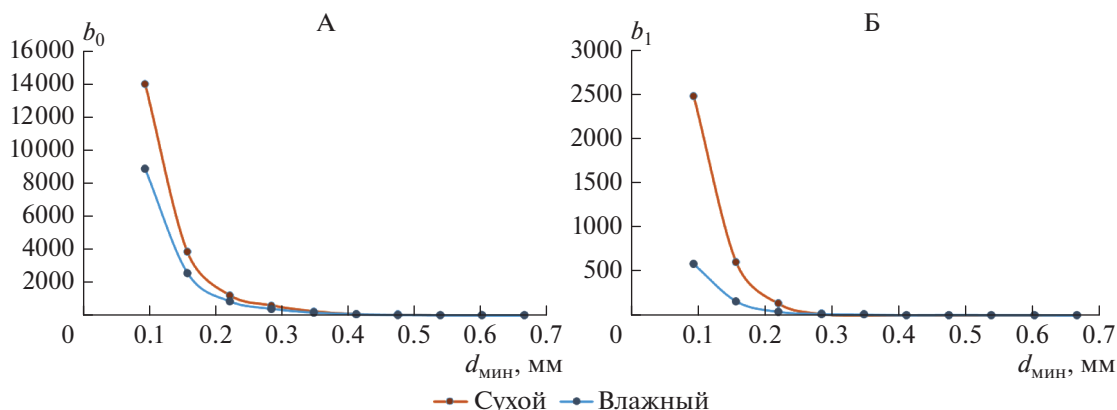


Рис. 4. Зависимости чисел Бетти: А – нулевое число (b_0); Б – первое число (b_1) от размера пор для образца 30–40 см горизонта А подпахотного агросерой почвы в сухом состоянии (коричневый цвет) и в насыщенном влагой состоянии (синий цвет). Величины b_0 и b_1 представлены зависимостью от минимального диаметра пор.

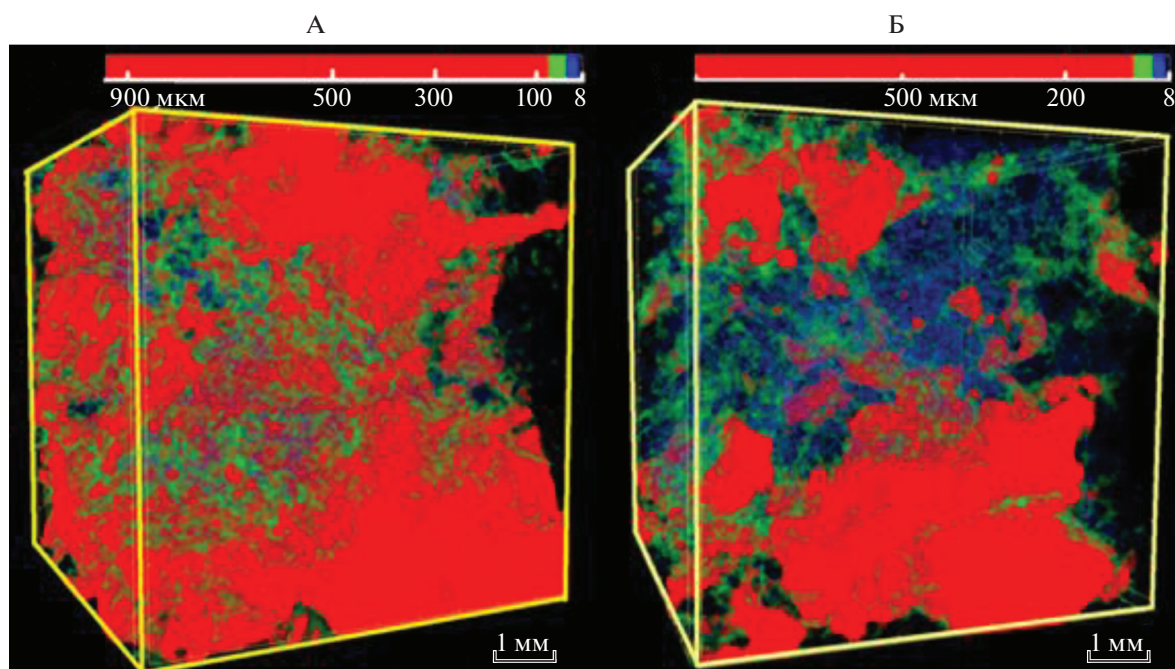


Рис. 5. Визуализация порового пространства образца агроминерального торфозема: А – в сухом, Б – в насыщенном водой состояниях. Распределение пор по размерам от 8 до 940 мкм (крупнейшая пора). Цветом обозначены размеры пор; красным цветом визуализированы поры крупнее 70 мкм.

жие значения на всем диапазоне диаметров пор. Для структуры гипновых торфов низинных болот, состоящих из длинностебельных остатков, сил набухания оказалось достаточно, чтобы сомкнуть и отдельные поры, и туннели, в отличие от подпахотного горизонта агросерой почвы, где при насыщении в большей степени закрывались туннели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены основы методологии численного описания структуры порового пространства почвы, основанной на методах интегральной гео-

метрии, топологии и математической морфологии. Численно продемонстрированы изменения в структуре порового пространства почвы при ее насыщении жидкостью. В качестве объекта исследования использованы образцы агросерой почвы Владимирского ополья с ненарушенной структурой и торфоземы разного состава. Для каждого образца было получено томографическое изображение в сухом состоянии и при его насыщении водой. Образец агроминерального торфозема имел подвижную структуру, при которой в водонасыщенном образце объем, количество

и связанность пор диаметром менее 0.2 мм увеличилась за счет уменьшения тех же показателей для более крупных пор, диаметром более 0.2 мм. Наблюдая за значениями b_0 и b_1 (рис. S14), можно сделать вывод, что подобные структурные преобразования в образце агроминерального торфозема происходят за счет сложных, связанных между собой туннельных пор, которые характеризует число b_1 , когда как b_0 имеет практически одинаковые значения во всем диапазоне диаметров во влажном и сухом состояниях. При водонасыщении в образцах гипновых мхов исчезали крупные отдельные поры и разветвленные туннели, о чем можно судить по изменению чисел Бетти (рис. S16), что указывает на значительные трансформации поровой структуры за счет уменьшения связанности порового пространства и общего объема пор. Характеристика Эйлера-Пуанкаре в сухом и насыщенном образцах имела схожие значения на всем диапазоне диаметров пор.

Для количественной демонстрации происходящих в структуре порового пространства трансформаций была рассмотрена эволюция функционалов Минковского и чисел Бетти в процессе увеличения размера структурного элемента, которым выполнялась операция морфологического открытия. Результаты демонстрируют, что подобная методология может использоваться для количественного описания как структуры порового пространства образцов почв, так и происходящих в ней преобразований, вызванных каким-либо внешним воздействием или процессом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Томографические исследования выполнены с привлечением Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект 19-29-05112_мк “Цифровая физика и гидрология почв: основы пространственно-динамического анализа, прогнозирования рисков критических ситуаций и оптимального управления”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1, S2. Визуализация порового пространства образцов агроминерального торфозема (S1) и гипнового торфозема (S2): А – в сухом, В – в насыщенном водой состояниях. Распределение пор по размерам от 8 до 940 мкм (крупнейшая пора). Цветом обозначены размеры пор; красным цветом визуализированы поры крупнее 70 мкм.

Рис. S3. Результат применения операций: А – эрозии, В – дилатации с различным размером структурного элемента к изображению порового пространства образца почвы. Пустоты показаны белым цветом, твердая фаза – черным.

Рис. S4. Пример применения операции морфологического открытия с различным размером структурного элемента к изображению порового пространства образца почвы. Пустоты показаны белым цветом, твердая фаза – черным. Результатом применения подобной операции является серия изображений, на которых остаются только поры, размер которых превышает размер структурного элемента.

Рис. S5. Визуализация порового пространства образца 2 агросерой почвы, отобранного на глубине 30–40 см из горизонта А подпахотного: А – в сухом; В – в насыщенном жидкостью состояниях. Цветами обозначено Евклидово расстояние до твердой фазы. Пыль, окрашенные в сине-зеленые цвета, не превышают 0.2 мм в диаметре.

Рис. S6–S9. Кумулятивные (S6, S8) и дифференциальные (S7, S9) графики зависимости удельных значений объема пор V от размера пор для образцов агросерой почвы № 1 (S6, S7) и № 2 (S8, S9), отобранных на глубине 30–40 см из горизонта А подпахотного во влажном (синий цвет) и сухом (коричневый цвет) состояниях.

Рис. S10A, S10B. Дифференциальные графики зависимости интегральной средней кривизны поверхности S от размера пор для образцов агросерой почвы 1 и 2, отобранных на глубине 30–40 см из горизонта А подпахотного во влажном (синий цвет) и сухом (коричневый цвет) состояниях.

Рис. S11, S12. Кумулятивные графики зависимости площади поверхности S от размера пор для образцов агросерой почвы 1 и 2, отобранных на глубине 30–40 см из горизонта А подпахотного во влажном (синий цвет) и сухом (коричневый цвет) состояниях.

Рис. S13, S15, S17. Зависимости характеристики Эйлера-Пуанкаре (χ) от минимального диаметра пор для образцов агроминерального торфозема (S13), гипнового торфозема (S15) и в сухом (коричневый цвет) и образца № 1 агросерой (S17) в насыщенном влагой (синий цвет) состояниях.

Рис. S14. Зависимости чисел Бетти: нулевое число (b_0); первое число (b_1) от минимального диаметра пор агроминерального (S14) и гипнового (S16) торфоземов в сухом состоянии (коричневый цвет) и в насыщенном влагой состоянии (синий цвет).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам // Почвоведение. 2019. № 1. С. 61–69.
2. Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Степанов А.А. Лиофильно-лиофобные свойства органического вещества и структура почвы // Почвоведение. 1993. № 6. С. 122–126.

3. Скворцова Е.Б., Калинина Н.В. Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1114–1125
4. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., Юдина А.В. Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1328–1336.
5. Сорочкин В.М. О выборе показателей для агрономической оценки структуры почв // Почвоведение. 1991. № 7. С. 50–58.
6. Сорочкин В.М. Равновесная плотность дерново-подзолистых почв и ее изменение при обработке // Почвоведение. 1982. № 2. С. 129.
7. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
8. Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К., 2007.
9. Akai T., Lin Q., Alhosani A., Bijeljic B., Blunt M. Quantification of Uncertainty and Best Practice in Computing Interfacial Curvature from Complex Pore Space Images // Materials. 2019. V. 12. № 13. P. 2138. <https://doi.org/10.3390/ma12132138>
10. Arns C., Knackstedt M., Martyus N. Cross-property correlations and permeability estimation in sandstone // Physical Review E. 2005. V. 72. № 4. P. 046304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.046304>
11. Arns C.H., Knackstedt M.A., Mecke K.R. Characterisation of irregular spatial structures by parallel sets and integral geometric measures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2004. V. 241. № 1–3. P. 351–372. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.034>
12. Bazaikin Y., Gurevich B., Iglauer S., Khachkova T., Kolyukhin D., Lebedev M., Lisitsa V., Reshetova G. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates: Effect of CT image scale // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. P. 3635–3647. <https://doi.org/10.1002/2016JB013575>
13. Bazaikin Y., Gurevich B., Iglauer S., Khachkova T., Kolyukhin D., Lebedev M., Lisitsa V., Reshetova G. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates: Effect of CT image scale // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. № 5. 122. P. 3635–3647. <https://doi.org/10.1002/2016JB013575>
14. Berg C.F. Permeability Description by Characteristic Length, Tortuosity, Constriction and Porosity // Transport in Porous Media. 2014. V. 103. № 3. P. 381–400. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0307-6>
15. Çeçen A., Wargo E.A., Hanna A.C., Turner D.M., Kalidindi S.R., Kumbur E.C. 3-D Microstructure Analysis of Fuel Cell Materials: Spatial Distributions of Tortuosity, Void Size and Diffusivity // J. Electrochem. Soc. 2012. V. 159. № 3. P. 299–307. <https://doi.org/10.1149/2.068203jes>
16. Fan J., McConkey B., Wang H., Janzen H. Root distribution by depth for temperate agricultural crops // Field Crops Research. 2016. V. 189. P. 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013>
17. Faybishenko B.A. Hydraulic Behavior of Quasi-Saturated Soils in the Presence of Entrapped Air: Laboratory Experiments // Water Res. Res. 1995. V. 31. № 10. P. 2421–2435. <https://doi.org/10.1029/95WR01654>
18. Feng Y., Wang J., Liu T., Bai Z., Reading L. Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on three-dimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump // J. Soils Sediments. 2019. V. 19. № 3. P. 1467–1478. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2130-0>
19. 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 Sc. 2012. V. 45. № 7. P. 700–709.
20. Gorbov S.N., Abrosimov K.N., Bezuglova O.S., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S. Microtomography research of physical properties of urban soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 368. P. 012015.
21. Hadwiger Hugo. Vorlesungen uber Inhalt." Oberflache, und Isoperimetrie // Springer-Verla. Berlin. 1957.
22. Hallaire V., Curmi P. Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement // Developments in Soil Sci. 1993. V. 22. P. 559–567.
23. Shein E.V., Pozdnyakova A.D., Shvarov A.P., Il'in L.I., Sorokina N.V. Hydrophysical Properties of the High-Ash Lowmoor Peat Soils // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. № 10. P. 1214–1219. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100113>
24. Khachkova T.S., Bazaikin Y.V., Lisitsa V.V. Use of the computational topology to analyze the pore space changes during chemical dissolution // Numerical methods and programming. 2020. V. 21. P. 41–55. <https://doi.org/10.26089/NumMet.v21r104>
25. Khaidapova D.D., Klyueva V.V., Skvortsova E.B., Abrosimov K.N. Rheological properties and tomographically determined pore space of undisturbed samples of typical chernozems and soddy-podzolic soils // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. № 10. P. 1191–1199.
26. Legland D., Kiêu K., Devaux M.-F. Computation of Minkowski measures on 2D and 3D binary images // Image Analysis Stereology. 2011. № 26. P. 83. <https://doi.org/10.5566/ias.v26.p83-92>
27. Legland D., Kiêu K., Devaux M.-F. Computation of Minkowski measures on 2D and 3D binary images // Image Anal. Stereol. 2011. № 26. P. 83.
28. McClure J.E., Armstrong R.T., Berrill M.A., Schlüter S., Berg S., Gray W.G., Mille C.T. A geometric state function for two-fluid flow in porous media // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. № 8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.084306>
29. Mecke K.R., Wagner H. Euler characteristic and related measures for random geometric sets // J. Stat. Phys. 1991. V. 64. № 3. P. 843–850. <https://doi.org/10.1007/BF01048319>
30. Michielsen K., De Raedt H. Integral-geometry morphological image analysis // Physics Reports. 2001. V. 347. № 6. P. 461–538. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(00\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(00)00106-X)
31. Ohser J., Schloditz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim. Germany, 2009. ISBN 978-3-527-62830-8
32. 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. P. 104873.
33. *Said K.A.M., Jambek A.B., Sulaiman N.* A study of image processing using morphological opening and closing processes // *Int. J. Control Theory Appl.* 2016. V. 9. № 31. P. 15–21.
 34. *San José Martínez F., Martín L., García-Gutiérrez C.* Minkowski Functionals of Connected Soil Porosity as Indicators of Soil Tillage and Depth // *Frontiers Environ. Sci.* 2018. № 6. P. 55. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00055>
 35. *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. V. 237–238. P. 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003>
 36. *San José Martínez F., Muñoz-Ortega F., Caniego J., Pergrina F.* Morphological Functions to Quantify Three-Dimensional Tomograms of Macropore Structure in a Vineyard Soil with Two Different Management Regimes // *Vadose Zone J.* 2013. V. 12. № 3. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0208>
 37. *San José Martínez F., Muñoz-Ortega F., Caniego J., Pergrina F.* Morphological Functions with Parallel Sets for the Pore Space of X-ray CT Images of Soil Columns // *Pure Appl. Geophys.* 2014. V. 173. № 3. P. 995–1009. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0928-2>
 38. *Schindelin J., Rueden C.T., Hiner M.C., Eliceiri K.W.* The Image J ecosystem: An open platform for biomedical image analysis // *Mol. Reprod. Dev.* 2015. V. 82. № 7–8. P. 518–529.
 39. *Schlادitz K., Ohser J., Nagel W.* Measuring Intrinsic Volumes in Digital 3d Images // *Discrete Geometry for Computer Imagery*. Springer Berlin Heidelberg. 2006. V. 4245. P. 247–258. ISBN 978-3-540-47651-1
 40. *Serra J.* Image Analysis and Mathematical Morphology // Academic Press. Inc.: Orlando. FL. USA, 1982. ISBN 978-0-12-637240-3
 41. *Shein E.V., Kiryushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I.* Assessment of agronomic homogeneity and compatibility of soils in the Vladimir Opolie region // *Eurasian Soil Sci.* 2017. V. 50. P. 1166–1172. <https://doi.org/10.1134/S1064229317100118>
 42. *Shein E.V., Troshina O.A.* Physical properties of soils and the simulation of the hydrothermal regime for the complex soil cover of the Vladimir Opol'e region // *Eurasian Soil Sci.* 2012. V. 45. P. 968–976. <https://doi.org/10.1134/S1064229312100092>
 43. *Skvortsova E., Kalinina N.* Micromorphometric types of the pore space in virgin and plowed loamy soils // *Eur. Soil Sci.* 2004. V. 37. P. 980–991.
 44. *Skvortsova E.B., Rozhkov V.A., Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Khokhlov S.F., Khaidapova D.D., Klueva V.V., Yudina A.V.* Microtomographic analysis of pore space in a virgin soddy-podzolic soil // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. № 11. P. 1250–1258.
 45. *Vogel H.-J., Weller U., Schlüter S.* Quantification of soil structure based on Minkowski functions // *Computers & Geosciences*. 2010. V. 36. P. 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.007>
 46. *Wang W., Kravchenko A.N., Smucker A.J.M., Liang W., Rivers M.L.* Intra-aggregate Pore Characteristics: X-ray Computed Microtomography Analysis // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. V. 76. P. 1159–1171. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0281>

Analysis of Tomographic Soil Pore Space Structure by the Integral Geometry Methods

T. G. Kalnin^{1,*}, D. A. Ivonin¹, K. N. Abrosimov², E. A. Grachev¹, and N. V. Sorokina¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: kremor1994@gmail.com

In the present paper, the methodology of numerical analysis of three-dimensional tomographic images of the pore space of soil objects has been used. It is based on the application of methods of integral geometry, topology and morphological analysis. The methodology comprises calculating cumulative and differential distributions of Minkowski functionals and Betti numbers over pore sizes. Tomographic images of 4 undisturbed samples were studied in dry and wet conditions to quantify changes in the pore space structure: clay loamy agro-gray soil (Phaeozem (Albic)), agro-mineral torfozem (Rheic Sapric Histosol (Mineralic)) and hyphno-peat torfozem (brown moss Rheic Sapric Histosols). For samples which are from the sub-arable horizon of agro-gray soil, a decrease in both Betti numbers was observed during wetting, where the zero number (b_0) indicates the number of topologically simple closed pores and the first number (b_1) indicates a decrease in pore connectivity, which decreased in a smaller range of pore sizes compared to b_0 . For a moistened sample of the agromineral peat the Euler-Poincaré characteristic has negative values in the pore range of 0.1–0.16 mm, which indicates the predominance of a complex branched structure of the pore space and high pore connectivity. After saturation of the Hyphnum moss, a large number of tunnel pores becomes narrow (“collapse”) and the connectivity decreases due to the properties of long-stemmed plant residues. The number of pores and connections between them in peat soils is an order of magnitude higher as compared to the A subsurface horizon of the agro-gray soil. These quantitative changes in the proposed parameters of the pore space tomographic images confirm the possibility of applying them for estimating the transformation of the pore space in soils.

Keywords: soil porosity, Minkowski functionals, Betti numbers, the Euler-Poincaré characteristic, computed tomography, Phaeozem (Albic), Rheic Sapric Histosols