УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64



Ссылки для цитирования:

Толстыгин К.Д., Фомин Д.С., Юдина А.В., Герке К.М. Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 30-64. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64

Cite this article as:

Tolstygin K.D., Fomin D.S., Yudina A.V., Gerke K.M., Analysis of hydrophysical properties of soils using pore-network models, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 30-64, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64 Благодарность:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 24-67-00026. Acknowledgments:

This research was supported by Russian Science Foundation grant 24-67-00026.

Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей

© 2025 г. К. Д. Толстыгин^{1,2*}, Д. С. Фомин^{1**}, А. В. Юдина^{1***}, К. М. Герке^{3****}

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

*<u>https://orcid.org/0009-0005-1395-3745</u>, e-mail: <u>kirill.tolstygin@yandex.ru</u>,

**<u>https://orcid.org/0000-0003-3733-0284,</u> e-mail: fomin_ds@esoil.ru,

**<u>https://orcid.org/0000-0003-2453-3090</u>, e-mail: <u>yudina_av@esoil.com</u>.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

³Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул. 10, стр. 1,

****https://orcid.org/0000-0002-8379-2132, e-mail: <u>k.gerke@digital-core.com</u>.

Поступила в редакцию 05.12.2024, после доработки 11.03.2025, принята к публикации 03.06.2025

Резюме: Современные физические модели почвы традиционно рассматривают поровое пространство как статичное, однако новые методы визуализации, такие как рентгеновская томография, позволили

выявить динамику структуры, которая может интенсивно изменяться под влиянием влажности и температуры. Целью работы является изучение структуры порового пространства с применением поросетевых моделей (IICM) И сравнение с методом основной гидрофизической характеристики Работа (OΓX). основывалась на лабораторном эксперименте по увлажнению и иссушению образцов чернозема миграционно-мицеллярного Курской области с измерением ОГХ и параллельной регистрацией состояния почвенной структуры с использованием рентгеновской компьютерной томографии. Из 3Dизображений почв проведено выделение ПСМ, для которых проведен расчет гидрофизических свойств в масштабе пор, включая моделирование основной гидрофизической характеристики И коэффициента влагопроводности. Результаты сравнения размеров и объемов пор показывают значительное превышение объема пор, который рассчитывался на основе измерения ОГХ, по сравнению с прямым измерением геометрии по компьютерной томографии. Разница в представлении порового пространства выражается в значительных различиях моделирования влагопроводности на основе ПСМ в области низкого и высокого давления влаги (области крупных и мелких пор соответственно) по сравнению с классическим подходом на основе моделирования ОГХ с использованием уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема. При этом кривые относительной ненасыщенной гидравлической проводимости, измеренной с использованием ПСМ и на основе ОГХ, показывают высокую степень схожести. На основании результатов работы продемонстрировано, что моделирование гидрофизических свойств почвы с применением ПСМ является крайне перспективным подходом и имеет потенциал более надежного инструмента для моделирования движения влаги, чем классический подход на основе описания ОГХ уравнением ван Генухтена. Однако фундаментальные различиям между методами оставляют открытым ряд вопросов, требующих ответа прежде, чем метод моделирования гидрофизических свойств почв на основе будет широко ПСМ использоваться.

Ключевые слова: поросетевые модели; основная гидрофизическая характеристика; уравнение ван Генухтена-Муалема; микротомография.

Analysis of hydrophysical properties of soils using pore-network models

31

© 2025 K. D. Tolstygin^{1,2*}, D. S. Fomin^{1**}, A. V. Yudina^{1***}, K. M. Gerke^{3****}

¹Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation, *<u>https://orcid.org/0009-0005-1395-3745</u>, e-mail: <u>kirill.tolstygin@yandex.ru</u>, **<u>https://orcid.org/0000-0003-3733-0284</u>, e-mail: <u>fomin_ds@esoil.ru</u>, ***<u>https://orcid.org/0000-0003-2453-3090</u>, e-mail: <u>yudina_av@esoil.com</u>.

> ²Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

³Schmidt Institute of Physics of the Earth, 1 Bld. 10 B. Gruzinskaya Str., Moscow 12324210, Russian Federation, ****<u>https://orcid.org/0000-0002-8379-2132</u>, e-mail: <u>k.gerke@digital-core.com</u>.

Received 05.12.2024, Revised 11.03.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: Modern soil physical models traditionally consider the pore space as static; however, new visualization techniques, such as X-ray tomography, have revealed structural dynamics that can intensively change under the influence of moisture and temperature. The aim of this study is to investigate the structure of the pore space using pore network models (PNMs) and to compare them with the method of the water retention curve (WRC). The study was based on the laboratory experiment involving the wetting and drying of samples of Haplic Chernozem from the Kursk region, with measurements of WRC and registration of the soil structure state using X-ray computed tomography (XCT). From the 3D soil images, PNMs were extracted, for which hydrophysical properties were calculated, including modeling of the WRC and the water conductivity. The comparison of pore sizes and volumes shows a significant excess of the pore volume calculated based on WRC measurements, compared to direct geometry measurements by XCT. The difference in the representation of the pore space is expressed through significant differences in modeling of water conductivity based on PNMs in the regions of low and high capillar pressure (large and small pore sizes, respectively) compared to the approach based on WRC modeling using the van Genuchten and van Genuchten-Mualem equations. However, the curves of relative unsaturated hydraulic conductivity measured using PNMs and based on WRC show a high degree of similarity. Based on the results of the study, it was demonstrated that modeling soil hydrophysical properties using PNMs is a highly promising approach and has the potential to be a more reliable tool for modeling water dynamics than the approach based on describing WRC using the van Genuchten equation. Nevertheless, the fundamental differences

between the methods leave several questions open that require answers before the widespread use of PNMs for calculation of soil hydrophysical properties.

Keywords: pore network models; water retention curve; van Genuchten-Mualem equation; microtomography.

ВВЕДЕНИЕ

Структура почвы и ее порового пространства – фундаментальная характеристика, которая оказывает влияние на физические (Miranda-Velez et al., 2023), химические (Vogel et al., 2022) и биологические (Gui-Yuan, Hao-Ming, 2014) свойства почвы. Структура почвы оказывает важнейшее влияние на сельскохозяйственные свойства почвы и играет важную роль в перемещении и запасании влаги (Vogel et al., 2022), усвоении почвой удобрений (Bronick, Lar, 2005), эмиссии газов (Ball, 2013) и секвестрации углерода (Kay, 2018; Rabot et al., 2018).

Концептуальные модели, использующиеся в современной физике почв, предполагают, что структура порового пространства является статичной и именно в таком представлении используется в моделировании гидрофизических свойств (Van Genuchten, 1980; Шеин, 2005; Radcliffe, Simunek, 2018). Развитие новых методов визуализации и изучения почвенной структуры, включая рентгеновскую компьютерную томографию, позволило продвинуться в понимании ее динамики. Недавние эксперименты показывают, что структура почвы может подвергаться изменениям вплоть до нескольких раз в течение суток в результате изменения влажности (Fomin et al., 2023), колебаний температур (Tolstygin et al., 2025) и т. д. Высокая динамичность почвенной структуры заставляет задать вопрос: что почвенная структура представляет из себя *per se*, то есть как и каким образом структура порового пространства выглядит в текущий момент времени?

Почвенная структура описывается различными способами, которые учитывают функциональные, геометрические, пространственные свойства объекта (Шеин, 2005). В смежных с почвоведением областях науки: геофизике, геологии, нефтегазовом деле, структуру порового пространства пород представляют в виде графа, в котором вершины графа соответствуют порам, а ребра – тонким вытянутым пустотам или каналам, связывающим поры

(Lenormand et al., 1983). С развитием компьютерной рентгеновской томографии стало возможным исследовать непосредственную структуру горных пород, появились методы извлечения графов, называемых поросетевыми моделями (Zubov et al., 2022). Первые исследования по работе с пористыми средами в формате графов были проведены в восьмидесятых годах прошлого столетия (Lenormand et al., 1983). Подобное представление кажется заведомо более приближенным к реальности, поскольку позволяет учитывать структуру образца в текущий момент времени и сравнивать структуры образцов в разных состояниях.

Поросетевые модели пористых сред - это представление порового пространства пористого тела в виде связного графа, где вершины графа представляют собой поры, а ребра графа – каналы, связывающие эти поры. ПСМ используются для моделирования однофазной и двухфазной проницаемостей – определении коэффициентов фильтрации и влагопроводности (Blunt, 2011; Gerke et al., 2024). Они также применяются в моделировании поведения флюидов в нанопорах (Yang, 2019). Представление порового пространства в виде графа может быть использовано для исследования морфологических свойств образца (Tolstygin et al., 2025). Поросетевое моделирование может быть использовано для изучения морфологических задач и задач динамики флюидов в пористой среде, включая моделирование гистерезиса (Ahrenholz, 2008), исследование сорбции флюидов (Xu, Prodanović, 2018), анализ связности порового пространства (Bernabé et al., 2010), исследование распределения пор по размерам (Vogel, 2000; Gerke, 2024; Tolstygin et al., 2025), получение капиллярных кривых (Vogel, 2000; Gerke, 2024), исследование поведения газов (Mahabadi et al., 2016). Современные методы извлечения ПСМ позволяют сохранять и анализировать топологию порового пространства (Zubov et al., 2022).

Изучение возможностей и областей применения ПСМ, их сравнение с классическими методами физики почв являются задачами переднего края науки с учетом обширного накопленного опыта в области микротомографии порового пространства почвы зарубежных и отечественных исследователей (Герке и др., 2012; Романенко и др., 2017; Иванов и др., 2019; Абросимов и др., 2021).

В этой статье раскрываются основные принципы работы поросетевых моделей и проводится сравнение гидрофизических характеристик почвы, измеренных традиционными методами и полученных методами поросетевого моделирования. Дополнительно в рамках работы будут затронуты методические аспекты работы с ПСМ, включая детали извлечения графов ПСМ из 3Dизображений микротомографии образцов почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов, определение почвенных свойств

Полевой этап исследования был проведен в Центральном черноземном заповеднике имени В.В. Алёхина в Курской области. Почва участка косимой степи была классифицирована как чернозем миграционно-мицеллярный (Полевой определитель почв России, 2008), Greyzemic Chernozem (Loamic, Pachic) (WRB, 2022). Отбор ненарушенных образцов (монолиты) был проведен из трех почвенных горизонтов – AUrz, AU, BCA с глубин 20, 40 и 80 см соответственно. Образцы были аккуратно отобраны в полипропиленовые трубки диаметром 20 мм и высотой 5 мм. Процедура пробоотбора выглядела следующим образом: 1) вырезка куба $5 \times 5 \times 5$ см³ из подготовленного почвенного горизонта; 2) обрезка полученного куба до цилиндра с диаметром в 2 см, соответствующего диаметру трубки, в которую в дальнейшем помещался образец; 3) перенос цилиндра почвы в трубку; 4) обрезка нижней части цилиндра. Сразу же после пробоотбора каждый цилиндр был закрыт полиэтиленовой пленкой для предотвращения испарения влаги и сохранения полевой влажности. Все образцы были упакованы в холодильную камеру, в которой поддерживалась температура в 4 °С.

В дополнительно отобранных средних нарушенных образцах почвы с тех же глубин были определены базовые характеристики почвы (табл. 1) (Fomin et al., 2021). Гранулометрический состав почвы был определен методом лазерной дифракции на дифрактометре Microtrac BlueWave (USA) при пробоподготовке с использованием ультразвуковой диспергации с энергией 450 Дж·мл⁻¹ (Юдина, Фомин, 2023; Yudina et al., 2018). Содержа-

ние органического утлерода (C_{org}) почвы было определено методом сухого сжигания. Плотность почвы (ρ_b) была определена буровым методом (Вадюнина, Корчагина, 1961). Пористость почвы (ϵ) была рассчитана на основании плотности почвы и плотности твердой фазы (Шеин, 2005). Влажность почвы была определена сушкой при 105 °C на протяжении 8 часов (Вадюнина, Корчагина, 1961).

Горизонт	Ил (<1 мкм), %	Пыль (1-50 мкм), %	Песок (50–2000 мкм), %	Corg, %	p _b , r/cm ³	8, %
AUrz	7.71	83.82	8.47	5.70 ± 0.15	1.01 ± 0.03	60.41±1.04
AU	7.47	84.45	8.08	4.29±0.21	1.12±0.09	55.94±3.43
BCA	8.11	83.82	8.07	3.55±0.22	1.21±0.05	52.65±1.91

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов Table 1. Characteristics of studied samples

Дизайн лабораторного эксперимента по иссушению образца почвы

Схема эксперимента детально описана в работе Fomin et al. (2023). Кратко: насыщение от полевой влажности до полного насыщения (pF = 0) капиллярным поднятием осуществлялось на протяжении двух недель. Дальнейшее иссушение осуществлялось тензиостатическим методом. Равновесие в каждой точке достигалось на протяжении 14–21 дн. Для доведения до абсолютно сухого состояния образцы почв высушивались при 105 °C в течение 48 часов. Соответствующие экспериментальные точки pF – W были использованы для дальнейшей аппроксимации и получения кривых основных гидрофизических характеристик по уравнению ван Генухтена и расчету коэффициента влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема.

Томография почв, обработка изображений

Компьютерная томография образцов проведена на томографе SkyScan 1172 (Bruker, Бельгия) с ускоряющим напряжением 70 кВ и силой тока 130 мА. Разрешение полученных изображений размерами 2 000 × 2 000 мкм по осям X и Y соответственно, составляло 7.92 мкм на воксель. Пример полученного 3Dизображения приведен на рисунке 2.

После томографии была произведена реконструкция изображений. Реконструкция осуществлялась с использованием программного обеспечения nRecon (Bruker) со следующими параметрами: сглаживание (гауссово размытие) = 2, усиление пучка = 30%, гистограмма оттенков серого от -500 до 3 000 единиц Хаусенфилда, где -500 соответствует сигналу ниже сигнала воздуха вокруг образца.

Последующая обработка изображений включала в себя фильтрацию и сегментацию (бинаризацию). Первый этап – фильтрация – необходим для очистки изображения от лишних шумов. Этот шаг был осуществлен при помощи метода нелокальных средних (Buades, Coll, Morel, 2011). Параметры фильтрации: радиус поиска = 10, количество итераций = 4.

Второй этап – сегментация – подразумевает разделение исходного изображения на фазы, в данном случае – на твердую фазу и поровое пространство. Сегментация была выполнена методом наращивания регионов (Hashemi et al., 2014). Границы фаз подбирались визуально, посредством итеративного перебора, параметр руе радиус = 2. Пример 2D-изображения на каждом из этапов обработки приведен на рисунке 1.

Аппроксимация основной гидрофизической характеристики уравнением ван Генухтена

Для построения кривых основных гидрофизических характеристик, экспериментальные точки были аппроксимированы уравнением ван Генухтена (1):



изображений Рис 1. Последовательность шагов в подготовке компьютерных томограмм почв к анализу на примере 2D-изображений каждого этапа обработки. Здесь (a) – исходное изображение, (b) – изображение после фильтрации методом нелокальных средних, (с) – сегментированное на две фазы изображение (черное – поры, белое – твердая фаза).

Fig. 1. Sequence of steps in preparing images of soil computer tomograms for analysis using the example of 2D images of each processing stage. Here (a) is the original image, (b) is the image after filtering by the non-local means method, (c) is the image segmented into two phases (black is pores, white is solid phase).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n}\right)^{1 - 1/n},\tag{1}$$

где Se – влагонасыщенность почвы, θ – объемная влажность почвы, θ_r – остаточная влажность, θ_s – влажность насыщения, α – величина, обратная давлению входа воздуха, P – давление, n – величина, зависящая от пористости почвы (van Genuchten, 1980).

Аппроксимация кривых была выполнена при помощи использования открытой библиотеки SciPy на языке программирования Python 3.12. Полученные после аппроксимации параметры θ_r , θ_r , α и *n* были использованы для получения коэффициентов влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема (2):

$$K_{\rm BJ} = K_{\rm \phi} * S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2, \qquad (2)$$

где $K_{6\pi}$ – коэффициент влагопроводности почвы, K_{ϕ} – коэффициент фильтрации почвы и l – параметр, зависящий от связности пор и, как правило, принимаемый равным 0.5 (Mualem, 1976).

Для каждого горизонта значения Se, полученные из уравнения ван Генухтена, были нормализованы на пористость почвы с целью получить значения относительной влагонасыщенности. Значения K_{en} были нормализованы на значения K_{ϕ} с целью получить относительную ненасыщенную гидравлическую проводимость. В таких координатах приведены графики основных гидрофизических характеристик и относительных проводимостей.

Извлечение поросетевой модели, моделирование двухфазной проницаемости

Извлечение ПСМ из сегментированных томографических изображений почвы осуществлялось при помощи метода, основанного на дискретной теории Морса, позволяющего сохранять геометрию и топологию порового пространства (Zubov et al., 2022). Для извлечения модели из каждого образца использовалось 3D-изображение размером 1 400³ вокселей. В ПСМ пространство почвы представляется в виде графа, где поры – вершины этого графа, а каналы, связывающие эти поры – грани графа. При извлечении модели сложные формы пор упрощаются до элементарных геометрических фигур: прямоугольника, круга или треугольника. Подобное упрощение производится на основании шейп-фактора поры. Формула и объяснение принципа шейп-фактора приведена в работе Karsanina et al. (2015).

Экстракция ПСМ была выполнена с использованием следующих параметров: предел размера упрощения – 0.0, предел устойчивости упрощения – 1.0, коэффициент заполнения каналов – 0.33. Предел размера упрощения ограничивает максимальный объем поры, которая может участвовать в упрощении. При нулевом значении предел упрощения фактически снимается. Предел устойчи-

вости упрощения ограничивает процесс упрощения пределом устойчивости. Чем выше этот предел, тем большее упрощение происходит. Коэффициент заполнения каналов задает часть расстояния между порами, которая будет передана каналам. Для реальных пористых сред используется стандартное значение равное 0.33.

После извлечения модель сохраняется в виде ненаправленного графа в формате "statoil" с сохранением всей геометрической информации. Шейп-факторы для каждой поры также сохраняются. Подробная информация о работе этого формата приведена в работе Gerke et al. (2020). Используя этот формат, ПСМ может быть представлена в виде диаграммы "шаров и цилиндров", где шары – поры, а цилиндры – каналы между порами. Важно отметить, что данная схема является всего лишь удобным инструментом визуализации: в дальнейшем моделировании проницаемости учитывается форма поры, в то время как на диаграмме все поры выглядят сферически, что не так (рис. 2). Все визуализации ПСМ были созданы с использованием открытой библиотеки vtk (https://pypi.org/project/vtk/).

После извлечения ПСМ они были использованы для моделирования двухфазного течения. Базой такого моделирования является модель Хагена-Пуазёйля для гидравлической проводимости между двумя порами (3):

$$q = \frac{g_{el}}{L_{el}} \Delta p, \tag{3}$$

где q – поток между двумя порами, соединенными каналом, g_{el} – проводимость флюида в элементе ПСМ длины L_{el} и Δp – давление между центрами пор.

В качестве закона сохранения используется уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости (4):

$$\sum_{j} q_{ij} = 0, \tag{4}$$

где мы суммируем потоки по *j*-ым каналам, связывающим *i*-ые поры.



Рис. 2. Пример поросетевой модели, извлекаемой из 3D-изображения почвы. Здесь (**a**) – 3D изображение почвы, (**b**) – диаграмма "шаров и цилиндров" поросетевой модели.

Fig. 2. An example of a soil pore-network model extracted from a 3D soil image. Here (a) is a 3D soil image, (b) is a "balls and cylinders" diagram of the soil network model.

Расчет гидравлической проводимости для любого двумерного поперечного сечения (или менисков жидкости для многофазного потока) g основан на безразмерной модели проводимости (Patzek, Silin, 2001) (5):

$$g = \frac{A^2 \tilde{g}}{\mu_f},\tag{5}$$

где A – площадь поперечного сечения, \tilde{g} – безразмерная гидравлическая проводимость, согласно модели "круг-треугольник-квадрат" (Patzek, Silin, 2001), а μ_f – вязкость жидкости.

После того, как все топологические и геометрические свойства порового пространства установлены, проницаемость ПСМ вычисляется путем решения системы линейных уравнений, полученных из уравнений непрерывности (уравнение 4) и импульса, т. е. потока с использованием уравнения Хагена-Пуазёйля (уравенение 3) для каждой поры. Задавая давление на входе и выходе, мы можем сначала установить давление в каждой поре, а затем вы-

числить коэффициент фильтрации внутри каждого элемента "пора-канал-пора" в соответствии с законом Дарси (Valvante, Blunt, 2004).

После определения абсолютной проницаемости (коэффициента фильтрации) мы переходим к моделированию двухфазной проницаемости. Поскольку мы пытаемся симулировать лабораторные эксперименты, в которых из капиллярно-насыщенной почвы тем или иным методом извлекается вода, то в начале симуляции мы считаем все поры заполненными водой. Предполагая, что твердая фаза почвы смачивается водой (угол контакта ниже 90°), мы постепенно наращиваем давление воздуха и проверяем возможность проникновения воздуха в заполненные водой поры и каналы. Таким образом мы, по сути, моделируем классический процесс дренажа. На этом этапе мы проверяем только одно: может ли происходить вытеснение поршневого типа (широко известного в зарубежной литературе как piston-type displacement) при увеличении капиллярного давления, где воздух сначала проникает в самую большую связанную основу пор. Возникновение piston-type displacement устанавливается энергетическим балансом и для круглых пор задается известным уравнением Юнга-Лапласа; для квадратных и треугольных пор его можно вычислить аналитически с использованием метода, описанного в Ma et al. (1996). Затем давление входа воздуха вычисляется как (Øren et al., 1998):

$$\begin{cases} P_{entry} = \frac{\sigma \cos \gamma_{res}(1+2\sqrt{\pi G})}{r} F_d(\gamma_{res}, G), \\ F_d(\theta_{res}, G) = \frac{1+\sqrt{1+\frac{4GD}{\cos^2\theta_r}}}{(1+2\sqrt{\pi G})}, \end{cases}$$
(6)

где Fd – безразмерный поправочный коэффициент для смачивающей жидкости, которая может удерживаться в углах, σ – поверхностное натяжение между воздухом и водой; γ_{res} – контактный угол, D–сложная функция межфазного интерфейса мениска и локальных углов поперечного сечения (Ma et al., 1996); r – радиус поры или канала, G – шейп-фактор поры. После входа воздуха в поровое пространство локальные положения менисков можно вычислить в соответствии с P_{entry} . Если геометрия менисков в попе-

речном сечении известна, можно определить гидравлическую проводимость для фаз воздуха и воды в данной поре (Patzek, Kristensen, 2001). Таким образом, задавая шаги давления, мы вычисляем положения менисков на каждом из шагов давления. Когда увеличение давления воздуха не приводит к дальнейшему изменению водонасыщенности, процесс дренажа останавливается. Как правило, следующим этапом идет моделирование пропитки образиа, однако в данной работе такое моделирование не осуществлялось, и потому его подробное описание не приводится. На рисунке 3 приведено схематичное изображение процесса дренажа в треугольной поре.



Рис. 3. Схематичный пример моделирования двухфазной проницаемости в поросетевой модели при дренаже в треугольной поре-канале треугольного сечения. Здесь (а) – пора целиком заполнена водой, (b) – воздух входит в пору, вода остается в менисках, (c) – дренаж продолжается, водные мениски утончаются. Направление потока от себя. Fig. 3. Schematic example of modeling two-phase permeability in a porenetwork model with drainage in a triangular pore-throat. Here (a) – the pore is completely filled with water, (b) – air enters the pore, water remains in the meniscus, (c) – drainage continues, water meniscus becomes thinner.

После определения положений менисков на каждом шаге капиллярного давления мы вычисляем водонасыщенность в системе и относительные проводимости воды и воздуха по уравнениям 3 и 4, что позволяет нам получить ненасыщенную гидравли-

ческую и пневматическую проводимости. Основные гидрофизические характеристики в данном методе получаются построением зависимости водонасыщенности на каждом конкретном шаге давления.

Моделирование однофазного и двухфазного течений в масштабе пор было осуществлено посредством открытой библиотеки *pnflow* (Valvante, Blunt, 2004). Характеристики флюида для воды и воздуха были зафиксированы для комнатной температуры (20 °C), и во время моделирования предполагались идеальные условия смачивания водой (краевой угол смачивания равен 0°). Поток моделировался вдоль направления Z.

Помимо исследования гидрофизических свойств почвы, ПСМ также может быть применена для количественного анализа порового пространства. Используя извлеченные ПСМ, были оценены общее количество пор и каналов, а также распространенные (Tolstygin et al., 2025; Gerke et al., 2024) в исследовании пористых сред параметры – эйлерова характеристика и связность. Эйлерова характеристика определялась как разность между количеством пор и каналов, связность – среднее количество каналов на пору. Эти параметры используются для сравнения поведения пористого пространства в разных образцах: уменьшение числа пор и увеличение числа каналов приводят к росту связности и уменьшению эйлеровой характеристики образца, что позволяет делать выводы об изменении физических свойств порового пространства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Извлечение поросетевой модели

Из каждого исследованного 3D-изображения компьютерной томографии почв была извлечена поросетевая модель. Все поросетевые модели были визуализированы для оценки качества извлечения и соответствия исходной 3D-структуре (рис. 4).

Из извлеченных ПСМ были получены количественные характеристики – число пор, число каналов, эйлерова характеристика и связность (табл. 2). Согласно полученным данным, количество пор снижается от горизонта AUrz к горизонту AU и вновь возрастает к горизонту BCA. Прямо противоположное происходит

с количеством каналов. Как следствие, такое поведение приводит к уменьшению эйлеровой характеристики и росту связности в горизонте AU.



Рис. 4. Результаты извлечения поросетевой модели. Здесь слева – 3D-изображение образца почвы, справа – извлеченная поросетевая модель.

Fig. 4. Results of the extraction of the pore network model. Here on the left is a 3D image of the soil sample, on the right is the extracted pore network model.

Горизонт	Число пор	Число каналов	Эйлерова характеристика	Связность
AUrz	180379	66831	113548	0.741
AU	173209	83619	89590	0.966
BCA	180658	58036	122622	0.642

Таблица 2. Характеристики извлеченных поросетевых моделей **Table 2.** Characteristics of the extracted network models

Моделирование двухфазной проницаемости

Посредством моделирования двухфазной проницаемости в ПСМ были получены кривые иссушения (дренажа) для каждого исследованного образца. Модельные кривые сравнивались с кривыми, полученными аппроксимацией уравнением ван Генухтена экспериментальных точек основной гидрофизической характеристики (рис. 5). В каждом из исследованных горизонтов наблюдаются схожие закономерности при сравнении поведения кривых, полученных аппроксимацией уравнением ван Генухтена и моделированием в масштабе пор в ПСМ – расхождение и образование двух зон дивергенции в областях низкой ($0 < S_w < 0.4$) и высокой ($0.8 < S_w < 1$) водонасыщенности. Уравнение ван Генухтена показывает адекватную степень аппроксимации, однако расходится с экспериментальными показаниями в областях высокого давления.

На основе ПСМ исследуемых образцов были получены кривые зависимости ненасыщенной гидравлической проводимости (коэффициентов влагопроводности, нормированных на коэффициент фильтрации – насыщенную гидравлическую проводимость) от относительной влагонасыщенности почвы. Модельные кривые сравнивались с кривыми, полученными расчетом по уравнению ван Генухтена-Муалема с использованием параметров аппроксимации экспериментальных точек основной гидрофизической характеристики уравнением ван Генухтена (рис. 6). Коэффициент *l* в уравнении ван Генухтена-Муалема принят равным 0.5.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123 Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, 123



Рис. 5. Основные гидрофизические характеристики, полученные аппроксимацией экспериментальных точек уравнением ван Генухтена и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели. Ось абсцисс отложена в S_w – относительной влагонасыщенности почвы. Важно отметить, что ось ординат соответствует отрицательному давлению, но для удобства просмотра отражена как положительная.

Fig. 5. The main hydrophysical characteristics obtained by approximating the experimental points with the van Genuchten equation and obtained by modeling two-phase permeability in a pore-net model. The X-axis is plotted in S_w – the relative moisture saturation of the soil. It is important to note that the Y-axis corresponds to negative pressure, but for ease of viewing is reflected as positive.



Рис. 6. Относительные ненасыщенные гидравлические проводимости, рассчитанные по уравнению ван Генухтена-Муалема и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели. Ось абсцисс отложена в S_w – относительной влагонасыщенности почвы. Ось ординат отложена в K_w – относительной ненасыщенной гидравлической проводимости.

Fig. 6. Relative unsaturated hydraulic conductivities calculated using the van Genuchten-Mualem equation and obtained by modeling two-phase permeability in a pore network model. The X-axis is S_w – the relative soil moisture saturation. The Y-axis is K_w – the relative unsaturated hydraulic conductivity.

Кривые, полученные по уравнению ван Генухтена-Муалема и моделированием в ПСМ хорошо сходятся в горизонте AU. В горизонте AUrz кривая, полученная моделированием в ПСМ, лежит чуть ниже кривой ван Генухтена-Муалема, а в горизонте BCA – чуть выше. В горизонтах AUrz и BCA, где кривые не сходятся, аналогичным образом можно добиться большей сходимости результатов, варьируя параметр l, однако это не является темой данного исследования.

Распределение пор по размерам

Для количественной оценки порового пространства были получены кумулятивные кривые распределения пор по размерам, полученные из основных гидрофизических характеристик для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в ПСМ (рис. 7). Максимальным достижимым значением пористости считается наибольшая объемная влажность, нормированная на пористость образца. Полученный результат позволяет интерпретировать появление двух зон дивергенции на кривых водоудерживания (рис. 8).



Радиус пор, м

Рис. 7. Кумулятивные кривые распределения пор по размерам, полученные из основных гидрофизических характеристик для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в поросетевой модели.

Fig. 7. Cumulative pore size distribution curves obtained from the main hydrophysical characteristics for approximation using the van Genuchten equation and from modeling in the pore network model.



Рис. 8. Лве дивергенции основных гидрофизических зоны В характеристиках, полученных аппроксимацией уравнением ван Генухтена и моделированием в поросетевой модели. Важно отметить, что ось ординат соответствует отрицательному давлению, но для удобства просмотра отражена как положительная.

Fig. 8. Two zones of divergence in the main hydrophysical characteristics obtained by approximation with the van Genuchten equation and modeling in the pore-network model. It is important to note that the Y-axis corresponds to negative pressure, but for ease of viewing is reflected as positive.

На графиках видно, что в областях пор среднего размера $(10^{-5}-10^{-3} \text{ м})$ поведение кумулятивных кривых, полученных моделированием в ПСМ, фактически повторяет поведение кривых, полученных из основных гидрофизических характеристик по уравнению ван Генухтена. В областях микропористости $(10^{-7}-10^{-5} \text{ м})$ и макропористости $(10^{-3}-10^{-1} \text{ м})$ видно "платообразное" поведение кривых: то есть общий объем порового пространства не увеличивается за счет вклада этих пор – они фактически отсутствуют в

образце. Причинами такого "отсутствия" являются ограничение разрешения томографии (в области микропор) и наличие граничных эффектов (макропористость), суть которых раскрывается в следующем параграфе.

Сравнение результатов, полученных моделированием в поросетевой модели и методом ван Генухтена

Полученные результаты для образцов из различных горизонтов почвы демонстрируют одинаковую закономерность. Аппроксимация уравнением ван Генухтена практически идеально ложится на экспериментальные точки. Исключение составляют точки высоких значений *pF*, что, впрочем, неоднократно подтверждалось в других исследованиях (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010). Тем не менее, интересным является наличие двух областей дивергенции между экспериментальными данными и моделированием в ПСМ (рис. 8). Появление зоны 1 обуславливается несовершенством метода компьютерной томографии в силу недостаточности максимальной детализации почвы. На томографических изображениях и в полученных ПСМ нет части микропористости за пределами разрешения съемки (<7.92 мкм), которая присутствует в образце, и которую мы можем оценить через весовую пористость. Этот результат сходится с данными, полученными в исследовании Gerke et al. (2024), где в качестве исходных образцов также были выбраны черноземные почвы, а концепция "недостатка" микропор в ПСМ была подтверждена экспериментально.

Зона 2 отображает гораздо более низкие измеренные капиллярные входные давления и значения давления в целом для насыщений между 1.0 > Sw > 0.8. Причина отклонения между измеренными и модельными данными связана с граничными условиями лабораторного эксперимента – любой образец почвы будет обладать некоторой неоднородностью там, где он отделен от остальной почвы. Во время насыщения образца некоторые локальные области на поверхности образца будут заполняться водой и дренироваться при гораздо более низких капиллярных давлениях по сравнению с почвой, погруженной в ту же пористую среду вокруг нее. Такие искусственно большие поры могут возникать не только

наверху или внизу образца, но и близко к стенкам цилиндрического образца из-за ориентации частиц (Khirevich et al., 2007). Эта проблема известна в нефтяной инженерии, где часть капиллярной кривой, близкая к Sw = 1, обычно рассматривается как ненадежная (Jennings, 1987).

Результаты исследований по сравнению измеренной и смоделированной ненасыщенной гидравлической проводимости показывают противоречивые результаты. В нашей работе сравнение ненасыщенной гидравлической проводимости показывает, что моделирование в ПСМ позволяет получить достаточно близкие результаты к измеренным значениям (рис. 7). Полученные в данной работе результаты подчеркивают хорошую сходимость моделирования в ПСМ с классическими подходами физики почв. Однако в смежной работе авторы наблюдали сильную дивергенцию, обуславливаемую нефизичностью параметра связности пор l в уравнении ван Генухтена-Муалема (Gerke et al., 2024). Сложности в воспроизводимости сходимости результатов прямых измерений и моделирования требуют проведения дальнейших исследований на более широком фактическом материале, включая образцы разного структурного генезиса.

Анализ пригодности применения поросетевых моделей

Результаты работы позволяют сделать утверждение, основанное на ряде критериев, о том, что моделирование гидродинамических свойств почвы с применением ПСМ является крайне перспективным подходом и значительно более надежно, чем классический подход ван Генухтена.

Первый критерий – временные затраты для получения данных. Несмотря на то, что обработка данных и дальнейшие расчеты коэффициента влагопроводности довольно просты, получение экспериментальных измерений основной гидрофизической характеристики почв занимает несколько месяцев (Fomin et al., 2023). Моделирование в ПСМ занимает порядка 4–8 часов на компьютерную томографию образца и порядка 2–4 часов на последующее извлечение ПСМ и дальнейшее моделирование в масштабе пор. Прочие подходы к получению экспериментальных данных ОГХ (центрифугирование, тензиометрия и т. п.) приводят к разной степени изменения структуры почвы перед или во время анализа, что не отражает реального пространственного поведения потоков (Schlüter et al., 2016).

Второй критерий – широкие возможности математического моделирования. Моделирование в ПСМ позволяет проводить виртуальные эксперименты, например, получение кривых пропитки образцов для изучения гистерезиса основной гидрофизической характеристики и симуляции движения влаги при различных условиях смачивания твердой фазы (Bentz et al., 2022). Подобные исследования крайне трудно провести в лабораторных условиях. Несмотря на то, что в данной работе подобные исследования не проводились, они были подсвечены в других работах (Gerke et al., 2024). Таким образом, ПСМ открывают доступ к более корректной оценке гидрологического режима почв.

Третий критерий – решение проблемы "граничных пор" (рис. 8) с помощью моделирования в ПСМ при измерениях гидродинамических свойств почв. Отметим, что учет "граничных пор" особенно важен для верхних слоев почвы (в том числе пахотных), где наличие таких пор может сильно влиять на правильную оценку верхних граничных условий инфильтрации влаги. ПСМ позволяют учитывать любые типы граничных условий, в том числе с крупными порами на границах или, что особенно важно, при окружении образца почвы остальным почвенным пространством. Таким образом, моделирование в ПСМ в дальнейшем может быть использовано для моделирования гидродинамических свойств на уровне почвенного профиля и ландшафта вместо прямых измерений.

Поросетевое моделирование предлагает новый концептуальный подход в понимании структуры порового пространства. Классический подход ван Генухтена-Муалема основан на капиллярной модели представления пор и предлагает использование коэффициента *l* в качестве параметра связности пор. В оригинальной работе значение параметра предлагается принимать равным 0.5. Позднее было показано (Дедюлина и др., 2014), что значение этого параметра необходимо варьировать для получения адекватных значений коэффициента влагопроводности, в том числе, в область отрицательных значений, что противоречит физике процесса. Парадигма представления порового пространства исключительно в виде капилляров не раз подвергалась критике (Fan, 1956; Dullien, 2012; Hunt el al., 2013). В критических работах подчеркивается несоответствие реальной геометрии и топологии порового пространства, из которого проистекают заведомо некорректные представления о течении гидродинамических процессов. Поросетевое моделирование, в свою очередь, разрешает эти проблемы.

Несмотря на достоинства ПСМ, имеется ряд важных недостатков, подчеркнутых в том числе и в этой работе, которые необходимо упомянуть. Первым из таких является нехватка максимального разрешения компьютерной томографии. Многие исследователи (Karsanina et al., 2018; Wu et al., 2019; Li et al., 2020) сходятся во мнении, что проблема может быть решена методами повышения пространственного разрешения томографических изображений, включая super-resolution (Bai et al., 2023) и multi-scale image pore structure fusion (Karsanina et al., 2018; Wu et al., 2019; Li et al., 2020, Gerke et al., 2017). Другой проблемой является невозможность определить остаточную влажность θ_r . Поскольку лабораторный эксперимент осуществлялся на тензиостате, точные значения θ_r не могли быть достигнуты. Фактически вся оставшаяся в ПСМ на конец дренажа вода удерживается там из-за капиллярных эффектов. В некоторых исследованиях удалось учесть известные значения θ_r в ПСМ (Valvatne, Blunt, 2004).

Важным допущением гидродинамического моделирования с использованием ПСМ является предположение о несжимаемости твердой фазы почвы, что определенно не является идеальным приближением ненасыщенных условий потока в почвах. Другая актуальная проблема, которая требует доработки в текущей реализации ПСМ, – регулирование растворения воздуха в воде и учет ненасыщенной пневматической проводимости.

выводы

В работе было осуществлено моделирование в поросетевой модели на 3D-изображениях компьютерной томографии образцов разных горизонтов миграционно-мицеллярного чернозема Курской области и сравнение результатов этого моделирования с

классическими подходами физики почв. Результаты сравнения позволяют сделать вывод о перспективности применения ПСМ в почвоведении, поскольку они обладают следующими преимуществами:

- скорость моделирования;
- близкие значения коэффициентов влагопроводности с измеренными в сравнении с расчетами по уравнению ван Генухтена-Муалема;
- решение проблемы граничных эффектов;
- возможность учета гистерезиса;
- возможность учета различных краевых углов смачивания.

Тем не менее, остается ряд вопросов, ответы на которые будут найдены в ходе проведения дальнейших исследований по данной тематике:

- Каким образом на поведение основных гидрофизических характеристик будут влиять начальные условия влажности в образце?
- Как будут отличаться гидродинамические свойства почв при изменении структуры образца? Проведенный в (Fomin et al., 2023) эксперимент позволил установить, что структура порового пространства является крайне динамичной, что должно влиять на свойства поросетевых моделей, основанных на одном и том же образце в его разных состояниях?
- Каким образом применение поросетевых моделей может повлиять на устоявшиеся методологии определения почвенногидрологических констант? Может ли поросетевое моделирование стать заменой/усовершенствованием педотрансферных функций?
- Наконец, насколько более точно будут оценены гидродинамические свойства почвы при применении поросетевых моделей и как это повлияет на их практическое применение: оценку поливных норм, запасов влаги и так далее?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов К.Н., Герке К.М., Фомин Д.С., Романенко К.А., Корост

Д.В. Томография в почвоведении: от первых опытов к современным методам (обзор) // Почвоведение. 2021. Т. 55. №. 9. С. 1097–1112.

2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1961. 345 с.

3. *Герке К.М., Скворцова Е.Б., Корост Д.В.* Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. 2012. №. 7. С. 781–781.

4. Дедюлина Е.А., Василевский П.Ю., Поздняков С.П. Чувствительность расчетов инфильтрационного питания к параметру связности пор зоны аэрации // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 1. С. 81–87.

5. Иванов А.Л., Шеин Е.В., Скворцова Е.Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурнофункциональным оценкам // Почвоведение. 2019. №. 1. С. 61–69.

6. Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 4. С. 75–81.

7. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

8. Скворцова Е.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенно-измененных почв: Дис. ... докт. с.-х. наук, 03.00.27. М., 1999. 397 с.

9. *Юдина А.В., Фомин Д.С.* Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука // Бюллетень Почвенного института имени ВВ Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 87–106. DOI: https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-87-106.

10. *Ahrenholz B., Tölke J., Lehmann P., Peters A., Kaestner A., Krafczyk M., Durner W.* Prediction of capillary hysteresis in a porous material using lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a morphological pore network model // Advances in Water Resources. 2008. Vol. 31. No. 9. P. 1151–1173.

11. Bai H., Zhou X., Zhao Y., Zhao Y., Han Q. Soil CT image quality enhancement via an improved super-resolution reconstruction method based on GAN // Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 213. Art. No. 108177.

12. *Ball B.C.* Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation // European Journal of Soil Science. 2013. Vol. 64. No. 3. P. 357–373.

13. Barbosa L.A.P., Gerke K.M., Gerke H.H. Modelling of soil mechanical stability and hydraulic permeability of the interface between coated biopore

and matrix pore regions // Geoderma. 2022. Vol. 410. Art. No. 115673.

14. Bentz J., Patel R.A., Benard P., Lieu A., Haupenthal A., Kroener E. How heterogeneous pore scale distributions of wettability affect infiltration into porous media // Water. 2022. Vol. 14(7). Art. No. 1110.

15. *Bernabé Y., Li M., Maineult A*. Permeability and pore connectivity: a new model based on network simulations // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2010. Vol. 115. No. B10.

16. *Blunt M.J.* Flow in porous media–pore-network models and multiphase flow // Current opinion in colloid & interface science. 2001. Vol. 6. No. 3. P. 197–207.

17. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: a review // Geoderma. 2005. Vol. 124. No. 1–2. P. 3–22.

18. *Buades A., Coll B., Morel J.M.* Non-local means denoising // Image Processing On Line. 2011. Vol. 1. P. 208–212.

19. *Dullien F.A.L.* Porous media: fluid transport and pore structure. Academic press, 2012. 598 p.

20. *Fagbemi S., Tahmasebi P.* Coupling pore network and finite element methods for rapid modelling of deformation // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 897. No. A20.

21. Fan I. The Network Model of Porous Media I. Capillary Pressure Characteristics. Petroleum Transactions // AIME. 1956. Vol. 207. P. 144–159. 22. Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V., Gerke K.M. Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle // Geoderma. 2023. Vol. 432. Art. No. 116401.

23. Fomin D., Timofeeva M., Ovchinnikova O., Valdes-Korovkin I., Holub A., Yudina A. Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving // Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 214. Art. No. 105183.

24. Gerke K.M., Karsanina M.V., Sizonenko T.O., Miao X., Gafurova D.R., Korost D.V. Multi-scale image fusion of X-ray microtomography and SEM data to model flow and transport properties for complex rocks on pore-level // SPE Russian Petroleum Technology Conference. SPE. 2017. D023S014R002.

25. Gerke K.M., Khirevich S., Vasilyev R.V, Karsanina M.V., Umarova A.B. Barbosa L.A.P., Korost D.V., Tolstygin K.D., Mallants D., Gerke H.H. Soil hydraulic properties derived from pore-scale simulations: digital assessment of Ksat through model intercomparison and verification with experimental data // Soil and Tillage Research. 2025.

26. 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 // Advances in Water Resources. 2020. Vol. 140. Art. No. 103576.

27. *Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H., Van Genuchten M.T.* Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data // Pedosphere. 2010. Vol. 20. No. 4. P. 456–465.

28. *Gharedaghloo B., Price J.S., Rezanezhad F., Quinton W.L.* Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 561. P. 494–508.

29. *Gui-Yuan L.I., Hao-Ming F.A.N.* Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China // Pedosphere. 2014. Vol. 24. No. 2. P. 285–290.

30. *Hashemi M.A., Khaddour G., François B., Massart T.J. Salager S.* A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing // Acta Geotechnica. 2014. Vol. 9. P. 831–846.

31. *Hunt A.G., Ewing R.P., Horton R.* What's wrong with soil physics? // Soil Science Society of America Journal. 2013. Vol. 77(6). P. 1877–1887.

32. Jennings J.B. Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology // AAPG Bulletin. 1987. Vol. 71. No. 10. P. 1196–1209.

33. 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. Vol. 314. P. 138–145.

34. *Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Mallants D.* Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure // PloS one. 2015. Vol. 10. No. 5. e0126515.

35. *Kay B.D.* Soil structure and organic carbon: a review // Soil processes and the carbon cycle. 2018. P. 169–197.

36. *Köhne J.M., Schlüter S., Vogel H.J.* Predicting solute transport in structured soil using pore network models // Vadose Zone Journal. 2011. Vol. 10. No. 3. P. 1082–1096.

37. *Khirevich S., Höltzel A., Hlushkou D., Tallarek U.* Impact of conduit geometry and bed porosity on flow and dispersion in noncylindrical sphere packings // Analytical chemistry. 2007. Vol. 79. No. 24. P. 9340–9349.

38. *Lenormand R., Zarcone C., Sarr A.* Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts // Journal of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 135. P. 337–353.

39. *Li X., Teng Q., Zhang Y., Xiong S., Feng J.* Three-dimensional multiscale fusion for porous media on microtomography images of different resolutions // Physical Review E. 2020. Vol. 101(5). Art. No. 053308.

40. *Ma S., Mason G. Morrow N.R.* Effect of contact angle on drainage and imbibition in regular polygonal tubes // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1996. Vol. 117(3). P. 273–291.

41. *Mahabadi N., Dai S., Seol Y., Sup Yun T., Jang J.* The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate- bearing sediments: pore- network model simulation // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2016. Vol. 17. No. 8. P. 3099–3110.

42. *Miranda-Velez J.F., Leuther F., Koehne J.M., Munkholm L.J. Vogeler I.* Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant cover management practices // Soil and Tillage Research. 2023. Vol. 225. Art. No. 105540.

43. *Mualem Y.* A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water resources research. 1976. Vol. 12. No. 3. P. 513–522.

44. Øren P.E., Bakke S., Arntzen O.J. Extending predictive capabilities to network models // SPE journal. 1998. Vol. 3(04). P. 324–336.

45. *Patzek T.W., Silin D.B.* Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow // Journal of colloid and interface science. 2001. Vol. 236. No. 2. P. 295–304.

46. *Patzek T.W., Kristensen J.G.* Shape factor correlations of hydraulic conductance in noncircular capillaries: II. Two-phase creeping flow // Journal of colloid and interface science. 2001. Vol. 236. No. 2. P. 305–317.

47. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137. 48. *Radcliffe D.E., Simunek J.* Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications. CRC press, 2018, 388 p.

49. *Ranaivomanana H., Das G., Razakamanantsoa A.* Modeling of hysteretic behavior of soil–water retention curves using an original pore network model // Transport in Porous Media. 2022. Vol. 142. No. 3. P. 559–584.

50. *Schlüter S., Leuther F., Vogler S., Vogel H.J.* X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation // Solid Earth. 2016. Vol. 7(1). P. 129–140.

51. *Tolstygin K.D., Kulygin D.A., Khlyupin A., Romanenko K.A., Gerke K.M.* Soil structural transformation under multiple freeze-thaw cycles: comprehensive morphological and topological description // Soil and Tillage research. 2025.

52. *Valvatne P.H., Blunt M.J.* Predictive pore- scale modeling of two- phase flow in mixed wet media // Water resources research. 2004. Vol. 40(7). W07406.

53. *Van Genuchten M.T.* A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil science society of America journal. 1980. Vol. 44. No. 5. P. 892–898.

54. *Vogel H.J.* A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models // European

Journal of Soil Science. 2000. Vol. 51. No. 1. P. 99–105.

55. *Vogel H.J., Roth K.* Quantitative morphology and network representation of soil pore structure // Advances in water resources. 2001. Vol. 24. No. 3–4. P. 233–242.

56. Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Baveye P.C. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions // European Journal of Soil Science. 2022. Vol. 73. No. 1. e13152.

57. Wu Y., Tahmasebi P., Lin C., Ren L., Dong C. Multiscale modeling of shale samples based on low-and high-resolution images // Marine and Petroleum Geology. 2019. Vol. 109. P. 9–21.

58. *Xu R., Prodanović M.* Effect of pore geometry on nitrogen sorption isotherms interpretation: A pore network modeling study // Fuel. 2018. Vol. 225. P. 243–255.

59. Yang Y., Wang K., Zhang L., Sun H., Zhang K., Ma J. Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model // Fuel. 2019. Vol. 251. P. 683–692.

60. *Yudina A.V.* et al. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // Eurasian soil science. 2018. Vol. 51. P. 1326–1347.

61. Zubov A.S., Murygin D.A., Gerke K.M. Pore-network extraction using discrete Morse theory: Preserving the topology of the pore space // Physical Review E. 2022. Vol. 106. No. 5. Art. No. 055304.

REFERENCES

1. Abrosimov K.N., Gerke K.M., Fomin D.S., Romanenko K.A., Korost D.V., Tomografiya v pochvovedenii: ot pervykh opytov k sovremennym metodam (obzor) (Tomography in Soil Science: from the first experiments to modern methods (review)), *Pochvovedenie*, 2021, Vol. 55, No. 9, pp. 1097–1112.

2. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., Metody opredeleniya fiziche-skikh svoistv pochv i gruntov (Methods for determining the physical properties of soils and grounds), Moscow: Vyshaya shkola, 1961, 345 p.

3. Gerke K.M., Skvortsova E.B., Korost D.V., Tomograficheskii me-tod issledovaniya porovogo prostranstva pochv: sostoyanie pro-blemy i izuchenie nekotorykh pochv Rossii (Tomographic method for studying the pore space of soils: the state of the problem and the study of some soils of Russia), *Pochvovedenie*, 2012, No. 7, pp 781–781.

4. Dedyulina E.A., Vasilevskii P.Yu., Pozdnyakov S.P., Chuvstvi-tel'nost' raschetov infil'tratsionnogo pitaniya k parametru svyaznosti por zony aeratsii

(Sensitivity of infiltration recharge calculations to the pore connectivity parameter of the aeration zone), *Vestnik Moskovskogo universite-ta. Seriya 4. Geologiya*, 2020, No. 1, pp. 81–87.

5. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B., Tomografiya porovogo prostranstva pochv: ot morfologicheskoi kharakteristiki k strukturnofunktsional'nym otsenkam (Tomography of soil pore space: from morphological characteristics to structural and functional assessments), *Pochvovedenie*, 2019, No. 1, pp. 61–69.

6. Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V., Opyt primeneniya rentgenovskoi komp'yuternoi tomografii v issledovanii mikrostroeniya merzlykh porod i pochv (Experience in using X-ray computed tomography in studying the microstructure of frozen rocks and soils), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 4, pp. 75–81.

7. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil Physics Course), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 432 p.

8. Skvortsova E.B., *Stroenie porovogo prostranstva estestvennykh i antropogennoizmenennykh pochv: Diss. ... dokt. s.-kh. nauk* (Structure of pore space of natural and anthropogenically modified soils, Dr. agric. sci. thesis), Moscow, 03.00.27, 1999, 397 p.

9. Yudina A.V., Fomin D.S., Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023, Vol. 115, pp. 87–106, DOI: <u>https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-87-106</u>.

10. Ahrenholz B., Tölke J., Lehmann P., Peters A., Kaestner A., Krafczyk M., Durner W., Prediction of capillary hysteresis in a porous material using lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a morphological pore network model, *Advances in Water Resources*, 2008, Vol. 31, No. 9, pp. 1151–1173.

11. Bai H., Zhou X., Zhao Y., Zhao Y., Han Q., Soil CT image quality enhancement via an improved super-resolution reconstruction method based on GAN, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, Vol. 213, Art. No. 108177.

12. Ball B.C., Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation, *European Journal of Soil Science*, 2013, Vol. 64, No. 3, pp. 357–373.

13. Barbosa L.A.P., Gerke K.M. Gerke H.H., Modelling of soil mechanical stability and hydraulic permeability of the interface between coated biopore and matrix pore regions, *Geoderma*, 2022, Vol. 410, Art. No. 115673.

14. Bentz J., Patel R.A., Benard P., Lieu A., Haupenthal A., Kroener E., How heterogeneous pore scale distributions of wettability affect infiltration into porous media, *Water*, 2022, Vol. 14(7), Art. No. 1110.

15. Bernabé Y., Li M., Maineult A., Permeability and pore connectivity: a new

model based on network simulations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, Vol. 115, No. B10.

16. Blunt M.J., Flow in porous media–pore-network models and multiphase flow, *Current opinion in colloid & interface science*, 2001, Vol. 6, No. 3, pp. 197–207.

17. Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: a review, *Geoderma*, 2005, Vol. 124, No. 1–2, pp. 3–22.

18. Buades A., Coll B., Morel J.M., Non-local means denoising, *Image Processing On Line*, 2011, Vol. 1, pp. 208–212.

19. Dullien F.A.L., Porous media: fluid transport and pore structure, *Academic press*, 2012, 598 p.

20. Fagbemi S., Tahmasebi P., Coupling pore network and finite element methods for rapid modelling of deformation, *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, Vol. 897, No. A20.

21. Fan I., The Network Model of Porous Media I. Capillary Pressure Characteristics, Petroleum Transactions, *AIME*, 1956, Vol. 207, pp. 144–159.

22. Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V., Gerke K.M., Soil pore structure dynamics under steady-state wettingdrying cycle, *Geoderma*, 2023, Vol. 432, Art. No. 116401.

23. Fomin D., Timofeeva M., Ovchinnikova O., Valdes-Korovkin I., Holub A., Yudina A., Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving, *Soil and Tillage Research*, 2021, Vol. 214, Art. No. 105183.

24. Gerke K.M., Karsanina M.V., Sizonenko T.O., Miao X., Gafurova D.R., Korost D.V., Multi-scale image fusion of X-ray microtomography and SEM data to model flow and transport properties for complex rocks on pore-level, *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, SPE, 2017, D023S014R002.

25. Gerke K.M., Gerke K.M., Khirevich S., Vasilyev R.V, Karsanina M.V., Umarova A.B. Barbosa L.A.P., Korost D.V., Tolstygin K.D., Mallants D., Gerke H.H., Soil hydraulic properties derived from pore-scale simulations: digital assessment of Ksat through model intercomparison and verification with experimental data, *Soil and Tillage Research*, 2025.

26. 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, *Advances in Water Resources*, 2020, Vol. 140, Art. No. 103576.

27. Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H., Van Genuchten M.T., Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data, *Pedosphere*, 2010, Vol. 20, No. 4, pp. 456–465.

28. Gharedaghloo B., Price J.S., Rezanezhad F., Quinton W.L., Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography, *Journal of Hydrology*, 2018, Vol.

561, pp. 494–508.

29. Gui-Yuan L.I., Hao-Ming F.A.N., Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China, *Pedosphere*, 2014, Vol. 24, No. 2, pp. 285–290.

30. Hashemi M.A., Khaddour G., François B., Massart T.J., Salager S., A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing, *Acta Geotechnica*, 2014, Vol. 9, pp. 831–846.

31. Hunt A.G., Ewing R.P., Horton R., What's wrong with soil physics? *Soil Science Society of America Journal*, 2013, Vol. 77(6), pp. 1877–1887.

32. Jennings J.B., Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology, *AAPG Bulletin*, 1987, Vol. 71, No. 10, pp. 1196–1209.

33. 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, Vol. 314, pp. 138–145.

34. Karsanina M.V., Gerke K.M., Skvortsova E.B., Mallants D., Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure, *PloS one*, 2015, Vol. 10, No. 5, e0126515.

35. Kay B.D., Soil structure and organic carbon: a review, *Soil processes and the carbon cycle*, 2018, pp. 169–197.

36. Köhne J.M., Schlüter S., Vogel H.J., Predicting solute transport in structured soil using pore network models, *Vadose Zone Journal*, 2011, Vol. 10, No. 3, pp. 1082–1096.

37. Khirevich S., Höltzel A., Hlushkou D., Tallarek U., Impact of conduit geometry and bed porosity on flow and dispersion in noncylindrical sphere packings, *Analytical chemistry*, 2007, Vol. 79, No. 24, pp. 9340–9349.

38. Lenormand R., Zarcone C., Sarr A., Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, Vol. 135, pp. 337–353.

39. Li X., Teng Q., Zhang Y., Xiong S., Feng J., Three-dimensional multiscale fusion for porous media on microtomography images of different resolutions, *Physical Review E*, 2020, Vol. 101(5), Art. No. 053308.

40. Ma S., Mason G. Morrow N.R., Effect of contact angle on drainage and imbibition in regular polygonal tubes, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, Vol. 117(3), pp. 273–291.

41. Mahabadi N., Dai S., Seol Y., Sup Yun T., Jang J., The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate- bearing sediments: pore- network model simulation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, Vol. 17, No. 8, pp. 3099–3110.

42. Miranda-Velez J.F., Leuther F., Koehne J.M., Munkholm L.J., Vogeler I., Effects of freeze-thaw cycles on soil structure under different tillage and plant

cover management practices, *Soil and Tillage Research*, 2023, Vol. 225, Art. No. 105540.

43. Mualem Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water resources research*, 1976, Vol. 12, No. 3, pp. 513–522.

44. Øren P.E., Bakke S., Arntzen O.J., Extending predictive capabilities to network models, *SPE journal*, 1998, Vol. 3(04), pp. 324–336.

45. Patzek T.W., Silin D.B., Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. One-phase creeping flow, *Journal of colloid and interface science*, 2001, Vol. 236, No. 2, pp. 295–304.

46. Patzek T.W., Kristensen J.G., Shape factor correlations of hydraulic conductance in noncircular capillaries: II. Two-phase creeping flow, *Journal of colloid and interface science*, 2001, Vol. 236, No. 2, pp. 305–317.

47. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137. 48. Radcliffe D.E., Simunek J., Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications, *CRC press*, 2018., 348 p.

49. Ranaivomanana H., Das G., Razakamanantsoa A., Modeling of hysteretic behavior of soil–water retention curves using an original pore network model, *Transport in Porous Media*, 2022, Vol. 142, No. 3, pp. 559–584.

50. Schlüter S., Leuther F., Vogler S., Vogel H.J., X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation, *Solid Earth*, 2016, Vol. 7(1), pp. 129–140.

51. Tolstygin K.D., Kulygin D.A., Khlyupin A., Romanenko K.A., Gerke K.M., Soil structural transformation under multiple freeze-thaw cycles: comprehensive morphological and topological description, *Soil and Tillage research*, 2025.

52. Valvatne P.H., Blunt M.J., Predictive pore- scale modeling of two- phase flow in mixed wet media, *Water resources research*, 2004, Vol. 40(7), W07406.

53. Van Genuchten M.T., A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 1980, Vol. 44, No. 5, pp. 892–898.

54. Vogel H.J., A numerical experiment on pore size, pore connectivity, water retention, permeability, and solute transport using network models, *European Journal of Soil Science*, 2000, Vol. 51, No. 1, pp. 99–105.

55. Vogel H.J., Roth K., Quantitative morphology and network representation of soil pore structure, *Advances in water resources*, 2001, Vol. 24, No. 3–4, pp. 233–242.

56. Vogel H.J., Balseiro- Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Baveye P.C., A holistic perspective on soil architecture is needed

as a key to soil functions, *European Journal of Soil Science*, 2022, Vol. 73, No. 1, e13152.

57. Wu Y., Tahmasebi P., Lin C., Ren L., Dong C., Multiscale modeling of shale samples based on low-and high-resolution images, *Marine and Petroleum Geology*, 2019, Vol. 109, pp. 9–21.

58. Xu R., Prodanović M., Effect of pore geometry on nitrogen sorption isotherms interpretation: A pore network modeling study, *Fuel*, 2018, Vol. 225, pp. 243–255.

59. Yang Y., Wang K., Zhang L., Sun H., Zhang K., Ma J., Pore-scale simulation of shale oil flow based on pore network model, *Fuel*, 2019, Vol. 251, pp. 683–692.

60. Yudina A.V. et al., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, pp. 1326–1347.

61. Zubov A.S., Murygin D.A., Gerke K.M., Pore-network extraction using discrete Morse theory: Preserving the topology of the pore space, *Physical Review E*, 2022, Vol. 106, No. 5, 055304.