

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Толстыгин Кирилл Дмитриевич

**Структура порового пространства и её связь с гидрофизическими
свойствами почв разного генезиса**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова и в лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга II Отделения: Разведочной геофизики и прикладной геодинамики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

- Научные руководители** – **Сапожников Петр Михайлович**, доктор сельскохозяйственных наук
Герке Кирилл Миронович, кандидат физико-математических наук
- Официальные оппоненты** – **Мазиров Михаил Арнольдович**, доктор биологических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, институт агробιοтехнологии, кафедра земледелия и методики опытного дела, профессор
Рыжова Ирина Михайловна, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра общего почвоведения, профессор
Кадыров Раиль Илгизарович, кандидат геолого-минералогических наук, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, научно-исследовательская лаборатория Внутрипластовое горение, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «19» мая 2026 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, биологический факультет, аудитория М-1.

Тел: 8(495)-939-35-46, E-mail: nvkostina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3850>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Н.В. Костина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Структура порового пространства почвы — организация и взаимосвязь пор различного генезиса — является ключевым функциональным свойством почвы, определяющим движение и аккумуляцию влаги и растворённых веществ, газообмен, секвестрацию углерода и почвенное плодородие (Соколовский, 1933, Роде, 1977; Дмитриев, 1985; Судницын, 2009; Vogel et al., 2022; Ball, 2013; Кудеяров, 2007; Курганова, 2010; Кау, 2018). Несмотря на фундаментальную роль порового пространства в формировании структуры почвы, исследования традиционно сосредоточены на характеристиках твёрдой фазы и агрегатного состава. Однако поровое пространство играет сопоставимую с агрегатами роль в формировании почвенной структуры (Орловский, 1980; Yudina, Kuzyakov, 2023). Большинство применяемых в физике почв моделей гидрофизических свойств опирается на упрощённые представления о структуре и не учитывает её динамические изменения в зависимости от влажности и циклов увлажнения–иссушения, что может приводить к некорректным оценкам гидрофизических параметров (Pachepsky et al., 2006; Diel, Vogel, Schlüter, 2019; Pires et al., 2020). Кроме того, традиционные показатели, такие как общая пористость и распределение пор по размерам, обладают ограниченной информативностью для описания структуры. В связи с этим применение современных методов морфологического и топологического анализа (рентгеновская компьютерная томография, электронная микроскопия, корреляционные функции, поросетевые модели) открывает новые возможности для исследования динамики порового пространства и более корректной оценки его влияния на гидрофизические свойства почв, что делает данное направление одной из актуальных задач современной физики почв.

Цель настоящей работы: охарактеризовать динамику структуры порового пространства почв суглинистого гранулометрического состава при увлажнении-иссушении и связь структуры порового пространства с

гидрофизическими свойствами почвы с применением современных расчетных методов исследования пористых сред.

Поставленная цель определила следующие **задачи**:

1. Оценить применимость поросетевых моделей для моделирования коэффициента фильтрации и сравнить полученные результаты с данными экспериментальных измерений;
2. Оценить применимость поросетевых моделей для моделирования основной гидрофизической характеристики и коэффициента влагопроводности, полученных из данных структуры порового пространства почв на основе сравнения полученных результатов с экспериментальными измерениями.
3. Апробировать методологию оценки динамики структуры порового пространства почв при увлажнении-иссушении в 3D томографических изображениях почв с применением корреляционных функций и поросетевых моделей.
4. Выявить закономерности в динамике структуры порового пространства чернозема и дерново-подзолистой почвы при увлажнении-иссушении в 3D томографических изображениях почв с применением корреляционных функций и поросетевых моделей.

Предмет и объект исследования.

Предметом исследования являются количественные закономерности изменения структуры порового пространства суглинистых почв при увлажнении-иссушении и взаимосвязь структуры порового пространства с гидрофизическими свойствами, а объектом исследования – дерново-подзолистые почвы Московской области и черноземы Курской области.

Научная новизна

В работе впервые описано совместное применение современных методов исследования пористых сред – корреляционных функций и поросетевых моделей – для оценки динамики структуры порового пространства при увлажнении-иссушении и моделирования гидрофизических свойств почвы.

Примененная в работе методика исследования расширяет и дополняет существующий в современной физике почв арсенал методов, позволяет проводить качественный анализ изменений порового пространства почв при увлажнении-иссушении, а также может позволить численно оценивать взаимосвязь между динамикой структуры порового пространства с одной стороны и гранулометрическим составом и содержанием углерода с другой. Предложенный набор методов позволяет моделировать гидрофизические свойства почв в масштабе пор.

Теоретическая и практическая значимость

Применение корреляционных функций и поросетевых моделей позволяет более точно, как фундаментально, так и практически подходить к оценке структуры и порового пространства почв и получать более точную оценку их гидрологического состояния. Использование поросетевых моделей может быть применено для получения области основной гидрофизической характеристики в капиллярной и насыщенной областях, что может быть использовано для моделирования движения влаги и растворенных веществ в почве, перемещения пестицидов и т.п.

Методология и методы исследования

В основу работы положен системный подход (Воронин, 1984; Шеин, 2005; Шеин, Рыжова, 2016). В работе использованы классические профильный, сравнительный и морфологический методы, применены классические полевые и лабораторные методы физики почв, включающие в себя профильно-генетический, морфологический, статистический, физико-химический и химический методы исследования. В работе применены методы рентгеновской компьютерной томографии и компьютерного моделирования. Корреляционные функции были рассчитаны с использованием библиотеки с открытым исходным кодом *CorrelationFunctions.jl* (Postnicov et al., 2024). Поросетевые модели были извлечены при помощи метода, основанного на дискретной теории Морса (Zubov et al., 2022). Статистическая обработка данных проведена с помощью языка программирования Python 3,12 и

программ STATISTICA, Excel 2023. Подробное описание методик изложено в Главе 2.

Защищаемые положения

1. Морфологические и топологические параметры изменения структуры порового пространства почв при увлажнении-иссушении могут быть полноценно охарактеризованы с использованием поросетевых моделей и корреляционных функций. Использование этих методов обеспечивает получение новых данных о структурной организации почв и расширяет возможности исследования почв в масштабе пор
2. В ходе равномерного цикла увлажнения-иссушения установлено обратимое поведение структуры порового пространства; обратимость структурных изменений зависит от содержания пылеватой и илистой фракций гранулометрического состава. Независимо от гранулометрического состава, увеличение содержания общего углерода также сопровождается возвращением структуры порового пространства к исходному состоянию.
3. Применение поросетевых моделей для моделирования коэффициента фильтрации в масштабе пор дополняет экспериментальные измерения в плане выбора граничных условий, что подтверждает перспективность использования метода для исследования насыщенной проводимости почв.
4. Использование поросетевых моделей для моделирования основной гидрофизической характеристики позволяет получать корректные значения в насыщенной и капиллярной областях; в сравнении с классическими подходами на основе модели ван Генухтена-Муалема, методика позволяет получать близкие значения функции влагопроводности.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы были

изложены автором в виде устных и стендовых докладов на 10 международных и всероссийских конференциях, в числе которых: Открытые конференции молодых ученых Почвенного института имени В.В. Докучаева «Почвоведение: Горизонты будущего» (Москва 2021, 2022, 2023, 2024, 2025), II Симпозиум «Структура почв, пород и грунтов: актуальные исследования, теория и практика – 2025» (Москва, 2025), IX съезд Общества почвоведов имени В.В. Докучаева (Казань, 2024), Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (Москва, 2022), Всероссийская научно-практическая конференция «Мерзлотные почвы в антропоцене» (Салехард, 2023), Всероссийская научная конференция «Проблемы криосферы Земли» (Пушино, 2025).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова. В статьях, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ и в лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга II Отделения: Разведочной геофизики и прикладной геодинамики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Компьютерная томография образцов проведена в лаборатории физики и гидрологии почв при использовании оборудования Центра коллективного пользования «Функции и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института имени В.В. Докучаева.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из 7 разделов: введения, обзора современного состояния проблемы, объектов и методов исследования, результатов и обсуждения (разделенного на 3 подраздела), заключения, выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 2 таблицы. Список

литературы включает 142 источника, из них 40 на русском и 102 на иностранных языках.

Личный вклад автора

Автор выполнил основную часть теоретических и экспериментальных исследований и расчетов, изложенных в диссертационной работе, включая разработку методик экспериментов, анализ полученных результатов, статистический анализ, разработку защищаемых положений и оформление публикаций в виде статей и научных докладов.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему первому научному руководителю Евгению Викторовичу Шеину за развитие в авторе интереса к физике почв вообще и гидрофизике почв в частности, а также за его терпение и научные консультации. Автор благодарит своего научного руководителя в магистратуре Андрея Валентиновича Смагина за его методичный научный подход и прививание этого подхода автору. Автор благодарен своим научным руководителям: Петру Михайловичу Сапожникову – за доверие и уважение, и Кириллу Мироновичу Герке – за неоценимую поддержку на протяжении всех этапов работы и развитие в авторе не только молодого ученого, но и настоящего физика. Автор сердечно благодарит свою супругу М.А. Чепурнову за вдохновение и мотивацию. Автор признателен своим коллегам, учителям, друзьям и близким, помощь и забота которых во многом вдохновляла на работу над диссертацией: М.Р. Чекину, И.А. Ильичеву, Ф.И. Земскову, А.С. Сорокину, Д.С. Фомину, А.В. Юдиной, К.А. Романенко, Е.Б. Скворцовой, А.Б. Умаровой, М.В. Карсаниной, М.С. Розановой, Т.А. Архангельской, А.Г. Болотову и многим другим, без которых выполнение этой работы вряд ли бы состоялось.

Исследование проведено при поддержке грантов Российского научного фонда № 23-74-00061 «Исследование структуры почв и распределения химических элементов на наномасштабе с помощью технологии FIB-SEM: от наноструктуры к почвенным функциям» и № 23-74-00069 «Связь нано- и

микроструктурных особенностей строения почв: от репрезентативности к многомасштабной цифровой модели». Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-545 от 24 апреля 2024 года). Работа выполнялась с использованием суперкомпьютера «МГУ-270» МГУ имени М.В. Ломоносова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

История изучения структуры почвы развивалась от анализа агрегатного состава к исследованию порового пространства, его общих и дифференциальных объемов, их распределений и функциональных характеристик. Вклад отечественных и зарубежных ученых (таких как А.Г. Дояренко, Н.А. Качинский, А.Д. Воронин, П.Н. Березин, Е.В. Шеин, Е.Б. Скворцова, Н.J Vogel, L. Pirez и многие другие), позволил постепенно сформировать функциональный и количественный подходы к анализу порового пространства. С появлением компьютерной томографии стало возможным изучать поровое пространство в его ненарушенном состоянии. В последние десятилетия активно развиваются поросетевые модели – представления порового пространства в виде графа, где вершины графа представляют поры, а ребра графа – каналы, соединяющие эти поры (Fatt, 1956). Поросетевые модели извлекаются из изображений компьютерной томографии и позволяют учитывать реальную геометрию и топологию пор (Zubov et al., 2022), моделировать одно- и двухфазные потоки и анализировать морфологические и гидрофизические свойства почвы (Valvatne, Blunt, 2004).

Несмотря на широкие возможности, применение поросетевых моделей в почвоведении пока ограничено и находится на переднем крае научных исследований. Кроме того, популярность завоевывают корреляционные функции: вероятностный метод оценки морфологических особенностей структуры порового пространства почвы (Torquato, 2002). В современной

физике почв эти подходы применяются скудно.

Многолетние исследования структуры порового пространства сформулировали их определенную парадигму. Эта парадигма пользуется рядом допущений и некоторыми недостатками, в первую очередь – слабой физической обоснованностью, за что в последние годы активно критикуется в научном сообществе. Развитие и применение современных методов позволяет нивелировать эти недостатки и улучшить старую парадигму или разработать новую. Один из путей решения этой задачи – функциональная оценка структуры порового пространства, то есть оценка посредством функциональных свойств структуры порового пространства. Для проведения такой оценки в работе исследовались гидрофизические свойства почвы.

Все существующие методы определения гидрофизических свойств обладают своими преимуществами, недостатками и ограничениями. В частности, экспериментальные определения ясны и просты, а также являются основным объектом верификации любого моделирования, однако каждый экспериментальный подход обладает определенными ограничениями в диапазоне водного потенциала и может некорректно отражать реальные граничные условия. Широко применяемые для получения гидрофизических свойств педотрансферные функции позволяют гидрофизические свойства на основании базовых свойств почвы, однако основаны на статистическом подходе и не описывают крайние значения давлений и влажности, особенно вне типичных условий. Кроме того, базовые свойства почвы напрямую не связаны со структурой порового пространства. С развитием компьютерной томографии почв появились методы прямого моделирования в 3D томографических изображениях (метод решеточных уравнений Больцмана и т.д.), позволяющие получать течения в любом направлении и тензорные свойства, однако эти методы очень ресурсоемки, зависят от методов предобработки изображений и ограничены разрешением томографии. Поросетевые модели, использующиеся в этой работе, решают проблему ресурсоемкости, а также обладают широкими возможностями

математического моделирования (моделирование гистерезиса, учет разных углов смачиваемости и т.д.), но наследует недостатки прямого моделирования в 3D томографических изображениях.

Основная концептуальная идея данного исследования – проверить, можно ли расширить наше представление о структуре порового пространства и гидрофизических свойствах почв совместным применением корреляционных функций и поросетевых моделей, а также выяснить, могут ли поросетевые модели описывать гидрофизические свойства почв в диапазоне, ограниченном снизу разрешением компьютерной томографии.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются черноземные и дерново-подзолистые почвы. Полевые работы были проведены на двух участках. Первый опорный разрез был заложен в районе деревни Дарьино Пушкинского района Московской области. Почва классифицирована как дерново-подзолистая типичная среднесуглинистая на покровных суглинках по классификации и диагностике почв России (2004) (КиДПР), Albic Glossic Retisol (Cutanic, Differentic) по WRB (2022). Второй опорный разрез был заложен в Центральном черноземном заповеднике имени профессора В.В. Алехина, расположенном в Курской области. Почва классифицирована как чернозём миграционно-мицеллярный среднесуглинистый на карбонатных лессовидных суглинках по КиДПР, Greyzemic Chernozem (Loamic, Pachic) по WRB (2022). В работе использовались образцы из горизонтов АУ, ЕL и ВТ дерново-подзолистой почвы и АU_{tz}, АU и ВСА чернозема. В эксперименте по увлажнению-иссушению были использованы монолиты почв ненарушенного сложения диаметром 2 см и высотой 5 см. В таблице 1 приведены некоторые свойства исследованных горизонтов. Гранулометрический состав почв был определен методом лазерной дифракции на дифрактометре Microtract BlueWave (США) с предварительной подготовкой образца ультразвуком с энергией 450 Дж/мл (Yudina et al., 2018; Юдина, Фомин, 2023). Ил (глина), пыль и песок соответствуют частицам с размерами <2, 2-50 и 50-2000 мкм

соответственно (WRB, 2022). Содержание углерода было определено методом сухого сжигания (Soon, Abboud, 1991). Плотность почв была определена в полевых условиях методом бура Качинского (Вадюнина, Корчагина, 1961).

Таблица 1. Гранулометрический состав, общий углерод и плотность исследованных горизонтов дерново-подзолистой почвы и чернозема

Тип почвы	Горизонт	Гранулометрический состав (WRB, 2022)			Общий углерод, %	Плотность почв, $г/см^3$
		Песок, %	Пыль, %	Ил (глина), %		
Дерново-подзолистая почва	AУ (0—7 см)	15,90	76,30	7,80	$2,43 \pm 0,22$	$0,75 \pm 0,21$
	ЕL (7—15 см)	8,90	85,40	5,70	$0,31 \pm 0,12$	$1,26 \pm 0,05$
	ВТ (15—65 см)	6,40	61,00	32,60	$0,13 \pm 0,11$	$1,54 \pm 0,03$
Чернозем	AУ _{гз} (0—25 см)	8,47	83,82	7,71	$5,70 \pm 0,15$	$1,01 \pm 0,03$
	AУ (25—70 см)	8,08	84,45	7,47	$4,29 \pm 0,21$	$1,12 \pm 0,09$
	ВСА (70—100 см)	8,07	83,82	8,11	$3,55 \pm 0,22$	$1,21 \pm 0,05$

На рисунке 1 приведен дизайн лабораторного эксперимента и схема алгоритма расчетов, позволивших оценить динамику структуры почв при увлажнении-иссушении и исследовать гидрофизические свойства. Поэтапно, весь алгоритм работы выглядел следующим образом:

1. Проведение лабораторного эксперимента. Эксперимент по увлажнению-иссушению проводился поэтапно: от полевой влажности до полного насыщения ($rF = 0$) монолиты почв увлажнялись капиллярным подъёмом в течение двух недель, затем последовательно иссушались с использованием песчаной и каолинит-песчаной мембран. Диапазон высоких значений rF (4,45–6,43) обеспечивался сорбционным методом над насыщенными растворами солей K_2SO_4 , KCl и $LiCl$ при давлении 100 кПа в течение 14 дней, после чего образцы дополнительно высушивались 48 часов при 105 °С. В каждом из изученных состояний увлажнения-иссушения (а именно, полевом состоянии, примерно соответствующем насыщению при $rF=1,8$, $rF=0,4$ при увлажнении, полной влагоемкости, $rF=0,4$ при иссушении, а также $rF=1,5$, 1,8, 2,0, 4,45, 5,33 и 6,43) была проведена компьютерная томография образцов.
2. Обработка изображений, включающая в себя три этапа: регистрация (поиска одной и той же области видимости внутри разных 3D томографических изображений одного и того же образца), фильтрация (очистка изображения от шумов, проведена методом нелокальных средних (Buades et al., 2011) и бинаризация (разделение изображения на твердую фазу и поровое пространство, проведена методом наращивания регионов (Hashemi et al., 2014)).
3. Расчет корреляционных функций и выделение поросетевых моделей.
 - a. Корреляционная функция – это векторная характеристика, определяющая вероятность некоторого события на заданном расстоянии (к примеру, попадание отрезка фиксированной длины в поровое пространство) (Torquato, 2002). В основном тексте диссертации приводится подробное пояснение принципа работы метода с соответствующим иллюстративным материалом.
 - b. Поросетевая модель – это представление порового пространства в виде графа, где вершины графа представляют поры, а ребра графа – каналы, соединяющие эти поры (Fatt, 1956). Подробное описание

принципа работы модели, обоснование разделения пор и каналов, а также соответствующий иллюстративный материал приведены в основном тексте диссертации.

4. Анализ динамики структуры порового пространства при увлажнении и иссушении. Поскольку изученных объем образцов чрезвычайно велик для прямого сравнения, полученные корреляционные функции и параметры поросетевых моделей были векторизованы, то есть преобразованы в векторное представление с целью расчета попарных Евклидовых расстояний между всеми состояниями каждого отдельного образца для более детального анализа морфологических и топологических изменений. Подробное описание принципа векторизации параметров и расчета Евклидова расстояния приведены в основном тексте диссертационной работы.
5. Исследование гидрофизических свойств почв (основной гидрофизической характеристики, функции влагопроводности и коэффициента фильтрации) на основании сравнения данных моделирования в поросетевых моделях с экспериментальными данными. Важно учесть, что для каждого горизонта значения влагонасыщенности и влагопроводности были нормализованы на пористость и коэффициент фильтрации соответственно, что позволило получить относительные зависимости, представленные в разделе 3.3.
6. Анализ результатов, формулирование выводов о применимости методов, сравнение структурных и гидрофизических параметров почв разного генезиса.

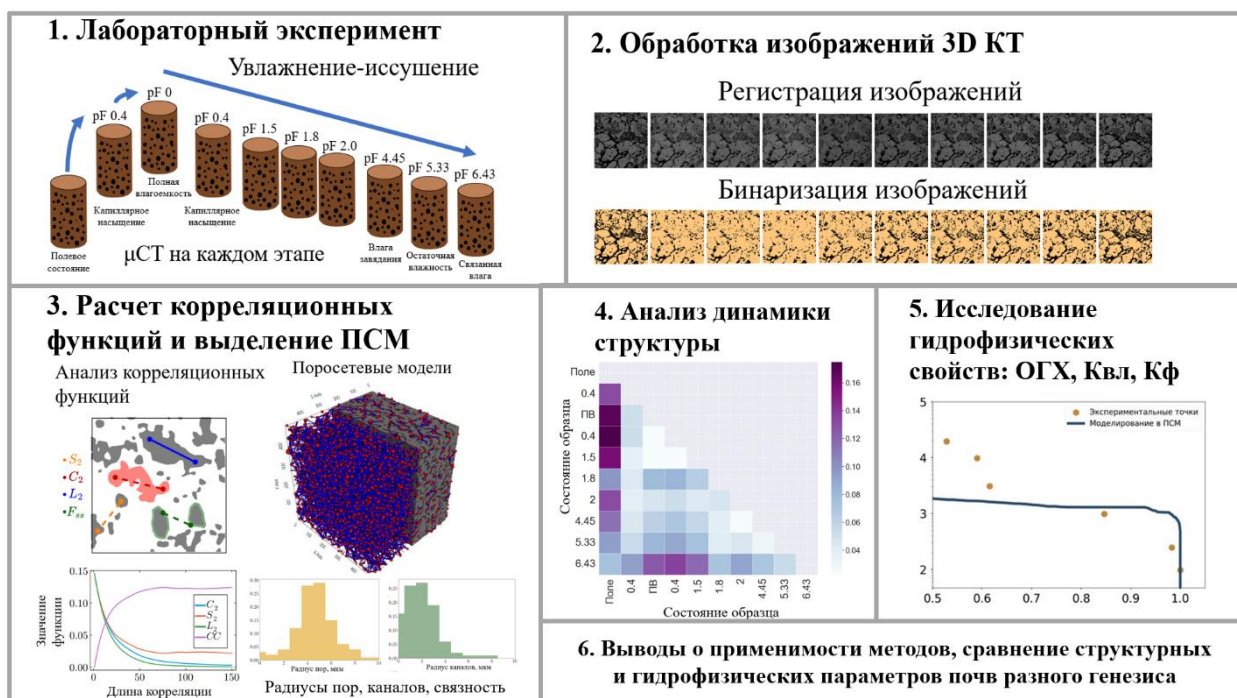


Рисунок 1. Дизайн лабораторного эксперимента и алгоритм последующих расчетов

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Исследование и анализ динамики структуры почвы в циклах увлажнения-иссушения

Во всех образцах из шести исследованных горизонтов наблюдалась выраженная динамика структуры порового пространства при увлажнении-иссушении (на рисунке 2 приведен пример визуального анализа такой динамики для горизонтов чернозема; аналогичный иллюстративный материал для всех остальных исследованных горизонтов во всех повторностях приведен в основном тексте диссертационной работы): при насыщении происходило набухание и слипание агрегатов, при сушке — их усадка, растрескивание и расширение порового пространства. Степень этих изменений зависела от гранулометрического состава и содержания общего углерода вещества. В горизонтах с высоким содержанием общего углерода ($AU_{гз}$, AU) структура оказывалась более устойчивой, что подтверждает известную связь между углеродом и стабильностью почвенной структуры,

количественно проанализированную в данной работе с помощью корреляционных функций и поросетевых моделей. Использование метода регистрации позволило изучить одну и ту же область интереса, что, в свою очередь, позволило перейти к детальному численному анализу посредством корреляционных функций и поросетевых моделей.

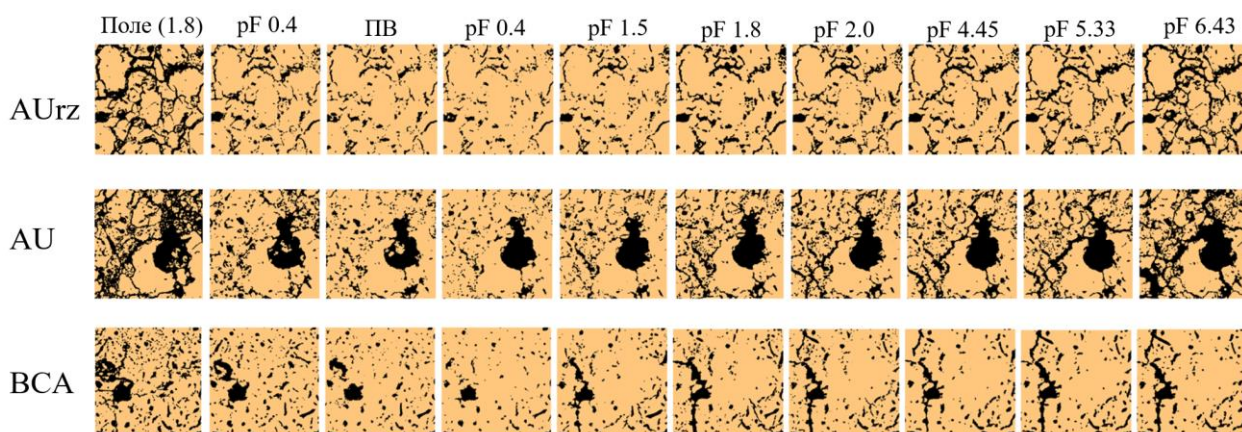


Рисунок 2. Одна и та же область видимости в трех исследованных горизонтах чернозема при последовательном увлажнении-иссушении.

Построение карт расстояний корреляционных функций (пример такой карты для горизонта AU_{rz} приведен на рисунке 3) позволило выявить различия в динамике морфологических изменений порового пространства между горизонтами, зависящие от содержания органического углерода и гранулометрического состава. В гумусовых горизонтах чернозёма (AU_{rz} , AU) и серогумусовом горизонте дерново-подзолистой почвы ($AУ$) структура демонстрировала тенденцию к восстановлению после иссушения (гистерезисное поведение), тогда как в элювиальном и текстурном дерново-подзолистой почвы (EL , BT) и аккумулятивно-карбонатном горизонте чернозема наблюдались существенные и необратимые перестройки структуры. Эти результаты подтверждают, что содержание углерода и пылеватых и илистых частиц играет ключевую роль в устойчивости морфологии структуры порового пространства при циклах увлажнения-иссушения.

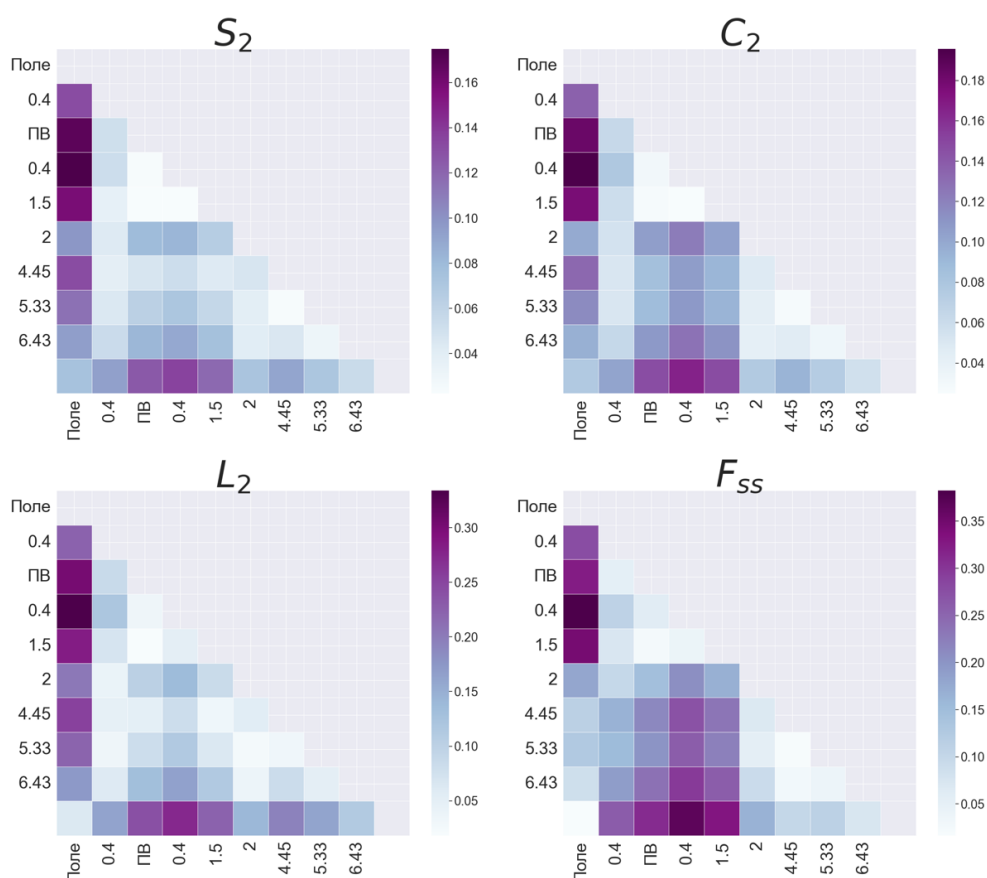


Рисунок 3. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте AU_{tz} . По осям отложены соответствующие состояния насыщения образца в рF. Полевое состояние влажности соответствует $pF=1.8$.

Анализ карт расстояний параметров поросетевых моделей (приведены в основном тексте диссертации) подтвердил и уточнил выводы, полученные с помощью корреляционных функций: в горизонтах чернозёма (AU_{tz} , AU , BCA) изменения структуры пор и каналов при увлажнении-иссушении в целом соответствуют наблюдаемому гистерезисному поведению, тогда как в дерново-подзолистой почве (AY , EL , BT) изменения происходят более постепенно или функционально значимо, особенно в параметре связности. Поросетевые модели дополняют общий анализ, позволяя фиксировать локальные и функциональные изменения порового пространства, важные для гидравлических и водоудерживающих свойств почвы.

В этом разделе было продемонстрировано, что динамика структуры

порового пространства почвы тесно связана с гранулометрическим составом и содержанием углерода, а применённые методы — корреляционные функции и поросетевые модели — позволяют количественно оценивать эту зависимость и фиксировать морфологические и топологические изменения. В отличие от классических параметров оценки порового пространства (таких как, к примеру, общая пористость; дополнительный иллюстративный материал приводится в основном тексте диссертации), новые методы дают возможность точно отслеживать изменения связности порового пространства и возвращение структуры к исходному состоянию, что обеспечивает более полноценный анализ устойчивости структуры почвы при увлажнении-иссушении.

3.2 Сравнение коэффициентов фильтрации, полученных экспериментально и моделированием в поросетевых моделях

Посредством моделирования однофазного течения в поросетевой модели были получены значения коэффициентов фильтрации, которые потом были сравнены с коэффициентами фильтрации, полученными полевым методом трубок с постоянным напором (рисунок 4). Вне зависимости от типа почвы, моделирование в поросетевых моделях показало завышение (примерно на один порядок в горизонтах чернозема и в 2-5 раз больше в горизонтах дерново-подзолистой почвы) полученных значений. Причин такому завышению несколько:

1. Отличия в граничных условиях.
2. Влияние нижележащих слоев
3. Набухание почвы при инфильтрации
4. Наличие органического вещества в поровом пространстве.
5. Влияние зажатого воздуха и других механизмов непроницаемости.

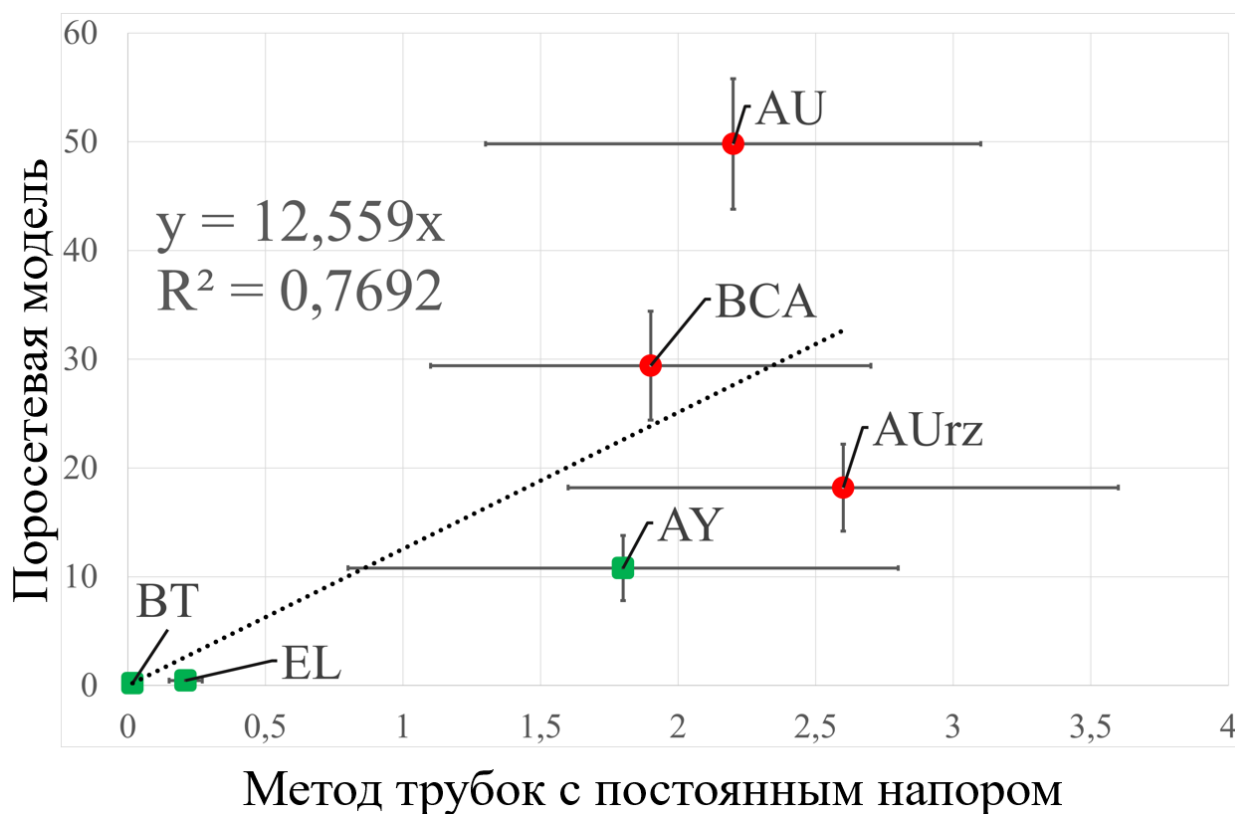


Рисунок 4. Средние коэффициенты фильтрации (см/мин), полученные полевым методом и моделированием в поросетевых моделях (ПСМ) для каждого из 6 исследованных горизонтов.

Несмотря на описанные причины расхождений, коэффициент детерминации линейной регрессии между методами составляет 0,7692, что говорит о неплохой сходимости методов. Кроме того, разбросы значений полевого метода существенно шире, чем разбросы, получаемые при моделировании в поросетевых моделях.

Полученные результаты позволяют говорить об общей применимости поросетевых моделей для получения коэффициентов фильтрации. Оба метода – поросетевые модели и полевое определение – обладают рядом особенностей, которые так или иначе оказывают влияние на получаемые результаты. Тем не менее, различия между методами не превышает одного порядка. Кроме того, дальнейшее развитие методов компьютерной томографии, улучшения качества изображения, моделирования гидрофизических свойств в поросетевых моделях, а также использование мультимасштаба может и

должно существенно повлиять на результаты моделирования в поросетевых моделях, что доказывает его перспективность для применения в современной физике почв.

3.3 Сравнение основных гидрофизических характеристик и функций влагопроводности с экспериментальными данными и расчетом по уравнению ван Генухтена-Муалема

Моделирование двухфазной проницаемости в поросетевой модели позволило построить кривые основных гидрофизических характеристик и относительных ненасыщенных гидравлических проводимостей (функций влагопроводности). В силу ограничения возможностей применения поросетевых моделей разрешением изображений компьютерной томографии, основные гидрофизические характеристики приводятся только в той области, где они могут быть применены ($S_w > 0.5$) (рисунок 5). На полученных графиках видно хорошее согласование между экспериментальными точками и кривыми ОГХ, полученными моделированием в поросетевой модели.

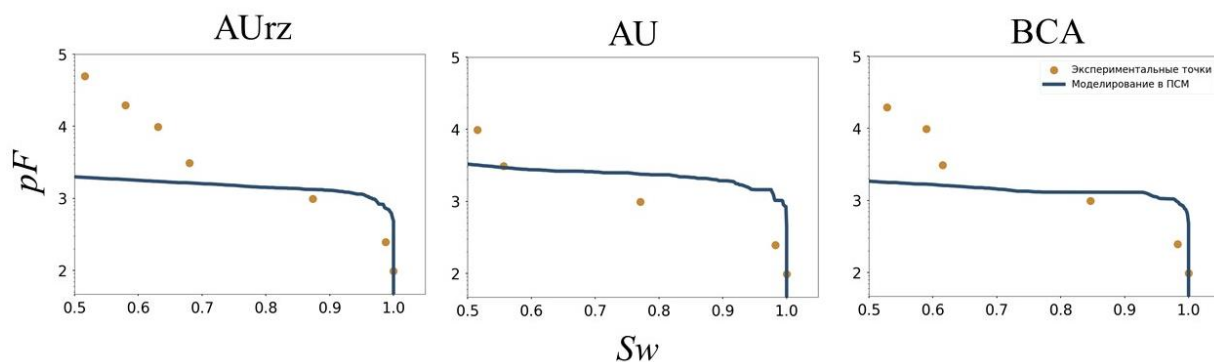


Рисунок 5. Сравнение основных гидрофизических характеристик, полученных моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема с экспериментальными данными. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат – pF .

Для количественной оценки точности аппроксимации использовалась метрика геометрического RMSE (Root Mean Square Error), измеряющая среднее минимальное расстояние от экспериментальных точек до аппроксимирующей кривой. RMSE вычислялся как квадратный корень из среднего квадрата этих минимальных расстояний для всех точек в выбранном диапазоне $0.6 < S_w < 1.0$. В основном тексте диссертации приведены полученные значения RMSE для всех исследованных горизонтов почвы. В рассматриваемом диапазоне RMSE варьирует от 0.24 до 0.44 для различных горизонтов, что свидетельствует о высокой согласованности экспериментальных данных с моделью. Помимо этого, в основном тексте диссертации приводится исследование абсолютной ошибки между экспериментальными измерениями и моделированием в поросетевой модели; абсолютная ошибка тем меньше, чем больше водонасыщенность.

Кривые относительной гидравлической проводимости (рисунок б), полученные по уравнению ван Генухтена–Муалема и моделированием в ПСМ, в целом хорошо совпадают, особенно в горизонте AU. В горизонтах AU_{tz} и ВСА небольшие расхождения можно уменьшить, варьируя параметр l в уравнении ван Генухтена-Муалема. В областях микропор (10^{-7} – 10^{-5} м) и макропор (10^{-3} – 10^{-1} м) наблюдается платообразное поведение кривых из-за ограничений разрешения томографии и граничных эффектов.

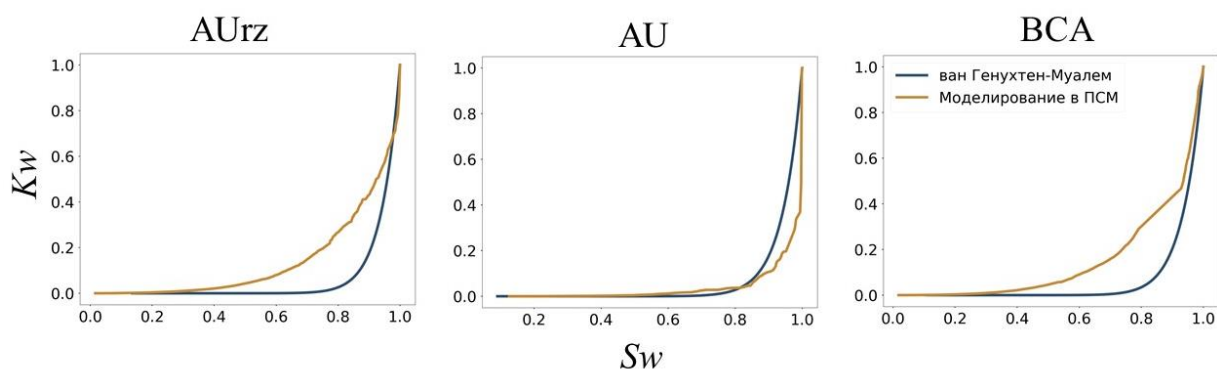


Рисунок 6. Относительные ненасыщенные гидравлические проводимости, рассчитанные по уравнению ван Генухтена-Муалема и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат относительная ненасыщенная проводимость (функция влагопроводности, K_w)

Применение поросетевых моделей для моделирования основной гидрофизической характеристики и функции влагопроводности является крайне перспективным подходом. Поросетевые модели позволяют учитывать «граничные поры» и моделировать движение влаги с высокой точностью, что трудно сделать в лаборатории, при этом время получения данных значительно сокращается. Кроме того, поросетевые модели весьма точно описывают экспериментальные результаты в области высокого водонасыщения. Именно эта область соответствует транспортной функции влаги в почве, поэтому поросетевые модели могут быть использованы для моделирования движения влаги и растворенных веществ в почве, переноса пестицидов и т.п. Важным преимуществом является и тот факт, что участок основной гидрофизической характеристики в области $S_w > 0.5$ может быть получен без проведения эксперимента.

Дальнейшее развитие метода, а также улучшение качества 3D томографических изображений и применение мультимасштабных исследований позволят расширить имеющиеся возможности и потенциально может позволить использовать поросетевое моделирование для исследования

основных гидрофизических характеристик в областях более низкого насыщения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методов регистрации и сегментации 3D томографических изображений, а также современных методов описания морфологических и топологических свойств почвы – корреляционных функций и поросетевых моделей – была исследована динамика структуры двух почв разного генезиса – чернозема миграционно-мицеллярного и дерново-подзолистой почвы – при увлажнении-иссушении.

Были детально описаны и охарактеризованы структурные изменения, происходящие в почвах разного генезиса при увлажнении-иссушении, сформулирована и проанализирована зависимость гистерезиса структуры порового пространства от содержания углерода и гранулометрического состава почв. Апробированная методика оценки изменений структуры порового пространства может быть использована в дальнейшем для анализа динамики структуры в результате других процессов (к примеру, промерзания-оттаивания), а также потенциально для установления прямой численной взаимосвязи между разнообразными почвенными свойствами и структурными параметрами.

Кроме того, в работе была проведена функциональная оценка структуры порового пространства с применением современных методов. Поросетевые модели показали свою пригодность при моделировании гидрофизических свойств почвы и могут быть использованы в дальнейшем при проведении дополнительных исследований по теме.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициенты фильтрации, получаемые моделированием в поросетевых моделях, показывают устойчивое завышение в сравнении с данными, полученными полевым методом трубок с постоянным напором; для исследованных двух типов почв это завышение находится в пределах

одного порядка, что может быть объяснено различием в граничных условиях в численном и натурном экспериментах, обусловленных разными природами методов, наличием в поровом пространстве органического вещества, влиянием нижележащих почвенных горизонтов, набуханием почвы при инфильтрации и сжатием воздуха. Несмотря на обозначенные причины, сходимость между полевым экспериментом и моделированием высока (коэффициент детерминации линейной регрессии равен 0.77).

2. Основные гидрофизические характеристики, получаемые моделированием в поросетевой модели, сходятся с экспериментом тем лучше, чем больше водонасыщенность в системе. Это позволяет говорить об общей применимости поросетевых моделей для моделирования основной гидрофизической характеристики в капиллярной и насыщенной областях, что может быть использовано в дальнейшем для моделирования движения влаги в почве. Функции влагопроводности, получаемые моделированием в поросетевой модели и рассчитываемые по уравнению ван Генухтена-Муалема, в общем сходятся. Поросетевые модели демонстрируют потенциальную применимость для моделирования основных гидрофизических характеристик и функций влагопроводности.
3. Апробированная методология оценки структуры порового пространства почвы при увлажнении-иссушении с использованием корреляционных функций и поросетевых моделей может быть использована в дальнейшем для анализа динамики структуры в результате других процессов, а также потенциально быть применена для установления прямой численной взаимосвязи между разнообразными почвенными свойствами и структурными параметрами.
4. Динамика структуры порового пространства при увлажнении-иссушении носит гистерезисный характер; этот гистерезис зависит как от содержания углерода, так и от гранулометрического состава почвы, а использование поросетевых моделей и корреляционных функций позволяет производить его количественную оценку.

**Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных для
защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова
по специальности и отрасли наук:**

1. **Толстыгин К.Д.**, Фомин Д.С., Юдина А.В., Герке К.М. Анализ гидрофизических свойств почв с использованием поросетевых моделей // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2025. – №. 123. – С. 30-64. EDN: FQERZQ (Импакт-фактор 1,222 (РИНЦ)). Вклад автора в печатных листах: (1,28/0,72). Здесь и далее в скобках приведён объем публикаций в печатных листах и вклад автора в печатных листах.
2. 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, Horst H.G. Soil hydraulic properties derived from pore-scale simulations: digital assessment of Ksat through model intercomparison and verification with experimental data // Soil and Tillage Research. – 2026. – V. 255. – P. 106790. EDN: UGZQKO (Импакт-фактор 6,63 (JIF)) (2,25/1,23).
3. **Tolstygin K.D.**, Zubov A.S., Karsanina M.V., Kulygin D.A., Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Gerke K.M. Morphological and topological dynamics of soil pore structure during wetting-drying // Soil and Tillage Research. – 2026. – V. 256. – P. 106895. EDN: TDKPGT (Импакт-фактор 6,63 (JIF)) (2,42/1,61).