

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ имени О.Ю. ШМИДТА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата
биологических наук

Научные руководители:

доктор сельскохозяйственных наук
Сапожников Петр Михайлович

кандидат физико-математических наук
Герке Кирилл Миронович

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	13
1.1 Структура и поровое пространство почвы	13
1.1.1 История развития представлений о структуре порового пространства.....	13
1.1.2 Процессы структурообразования в почве	18
1.1.3 Методы исследования структуры порового пространства почв	19
1.1.4 Методы оценки порового пространства почвы	23
1.2 Гидрофизические свойства почвы	28
1.2.1 Уравнение Ричардса, дифференциальная влагоемкость, функция влагопроводности	28
1.2.2 Полевые и лабораторные методы определения гидрофизических свойств почв	30
1.2.3 Применение педотрансферных функций для определения гидрофизических свойств почв	33
1.2.4 Недостатки уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема	34
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	37
2.1 Характеристика объектов исследования.....	37
2.2 Методы исследования	39
2.2.1 Полевые методы исследования	39
2.2.2 Лабораторные методы исследования	41
2.2.3 Расчетные методы исследования	43
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	60
3.1 Исследование и анализ динамики структуры почвы в циклах увлажнения-иссушения.....	60
3.1.1 Визуальный анализ	60
3.1.2 Анализ морфологических изменений посредством корреляционных функций	64
3.1.3 Анализ морфологических и топологических изменений посредством поросетевых моделей	72
3.1.4 Анализ применимости метрик, сравнение с классическими метриками структуры порового пространства	75
3.2 Сравнение коэффициентов фильтрации, полученных экспериментально и	

моделированием в поросетевых моделях	80
3.3 Сравнение основных гидрофизических характеристик и функций влагопроводности с экспериментальными данными и расчетом по уравнению ван Генухтена-Муалема	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
ВЫВОДЫ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Структура порового пространства почвы, то есть строение слагающих поровое пространство пор разного генезиса, их взаимосвязь, организация и взаимное расположение в пространстве, является важнейшим функциональным свойством почвы: поровое пространство отвечает за движение и аккумуляцию влаги и растворенных веществ (Роде, 1977; Дмитриев, 1985; Судницын, 2009; Vogel et al., 2022), эмиссию газов (Ball, 2013), секвестрацию углерода (Кудеяров, 2007; Курганова, 2010; Кау, 2018) и почвенное плодородие (Соколовский, 1933; Вершинин, 1958; Милановский, Шеин, 2003). Несмотря на то, что поровое пространство, наряду с твёрдой фазой, является составной частью почвенной структуры, внимание исследователей традиционно сосредоточено на изучении характеристик твёрдой фазы и агрегатного состава почв. Повышенное внимание исследователей к изучению твердой фазы почв объясняется тем, что почвенные агрегаты представляют собой объект, который можно выделить из почвы для дальнейшего изучения в инструментальных экспериментах, а поры являются пустотным пространством — нарушением сплошности внутри почвенной массы. Однако о необходимости уделять большее внимание изучению порового пространства писал еще А.Г. Дояренко в XX веке, поскольку считал, что поровое пространство лежит в основе структуры почвы (Орловский, 1980). Научная дискуссия о первостепенной роли в формировании почвенной структуры — агрегатов или порового пространства — получила определённое разрешение в работе (Yudina, Kuzyakov, 2023), где было показано, что оба аспекта имеют сопоставимое значение. В этом контексте исследование организации порового пространства и его функциональная оценка представляется одной из ключевых и актуальных задач агрофизики.

В современных агрофизических исследованиях существует ряд актуальных проблем, которые обуславливают важность исследований структуры порового пространства почвы с применением современных методов. Во-первых,

существующие модели, применяемые в физике почв, как правило не учитывают динамические изменения структуры порового пространства и опираются при этом на почвенные характеристики при фиксированных содержаниях влаги в почве (Pachepsky et al., 2006). Между тем, известно, что структура почвы динамична, зависит от влажности почвы, и существенно изменяется даже в пределах одного цикла увлажнения-иссушения (Качинский, 1965; Березин, 1983, 1985; Воронин, 1986; Diel, Vogel, Schlüter, 2019; Pires et al., 2020). Учёт динамики структуры почв необходим для корректной оценки почвенных характеристик, которые используются во множестве гидрофизических и прогностических моделей (Gijssman, Jagtap, Jones, 2002; Radcliffe, Simunek, 2018).

Основной концептуальной моделью порового пространства почв до настоящего времени являлась модель «капиллярных трубок», всё чаще подвергаемая критике ввиду слабой физической обоснованности (Дедюлина, Василевский, Поздняков, 2020; Терлеев и др., 2024; Hunt, Ewing, Horton, 2013). На основании этой модели сформулировано и активно применяется в физике почв уравнение ван Генухтена (van Genuchten, 1980), используемое для аппроксимации основной гидрофизической характеристики, и уравнение ван Генухтена-Муалема (Mualem, 1976), используемое для расчета коэффициента влагопроводности. В последние годы оба уравнения регулярно подвергаются критике ввиду их основания на модели «капиллярных трубок» (Дедюлина, Василевский, Поздняков, 2020; Терлеев и др., 2024). Между тем, эти уравнения рутинно используются для определения ключевых гидрофизических параметров почвы и расчетов структурных характеристик, таких как распределение пор по размерам, напрямую получаемое из основной гидрофизической характеристики, аппроксимированной уравнением ван Генухтена. Всё это приводит к появлению некорректных оценок как со стороны оценки структуры почвы, так и при оценке гидрофизических параметров. Современные методы исследования структуры – рентгеновская компьютерная томография, электронная микроскопия с применением фокусированного ионного пучка, – и современные методы моделирования

гидрофизических свойств – поросетевые модели, потенциально способны улучшить наше понимание структуры и ее влияния на гидрофизические свойства почвы.

Еще одной проблемой является слабая применимость стандартных показателей, разработанных на основе классических методов физики почв для оценки динамики структуры. Применяемые практически повсеместно общая пористость, плотность и распределение пор по размерам имеют низкое информационное содержание о структуре порового пространства (к примеру, два образца с различными свойствами и структурой порового пространства могут иметь одну и ту же пористость). Применение современных расчетных методов – корреляционных функций и поросетевых моделей – позволяет учесть как геометрические, так и топологические (связность) изменения структуры порового пространства при её динамике под воздействием различных процессов, тем самым обеспечивая высокое информационное содержание. В современном почвоведении эти методы представлены слабо, в то время как их использование может оказать существенное влияние на развитие физики почв.

Таким образом, оценка динамики структуры порового пространства почв и её функциональных свойств, в частности гидрофизических, с применением современных методов морфологического и топологического анализа, является одной из наиболее 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 способствует возвращению 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» (Пущино, 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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Структура и поровое пространство почвы

1.1.1 История развития представлений о структуре порового пространства

Разнообразие почвенной структуры и ее влияние на различные свойства почв отмечалось еще на заре почвоведения. В.В. Докучаев в своих работах (1892) использовал понятие структуры почв через призму агрегатного состояния, то есть распределения почвенных отдельностей в профиле почвы. В дальнейшем В.Р. Вильямс (1897) развил этот подход и сформулировал первую численную классификацию такого распределения, а также привел первую методику определения почвенной структуры. В дальнейшем эта идея развивалась в трудах Саввинова (1931) и Виленского (1935).

С развитием почвоведения в целом и физики почв в частности исследователи стали обращать внимание не столько на агрегатный состав почвы, но также и на пустоты, находящиеся между почвенными агрегатами – то есть на поровое пространство почв, его строение и структуру. Еще основатель советской школы агрофизиков А.Г. Дояренко писал, что *«Основной характеристикой должно быть соотношение пространства, занимаемого веществом, и пустотами между ними, т.е. скважность»* (цитата по Орловский, 1980) и делал вывод о необходимости определения структуры почвы именно по поровому пространству, подчеркивая тем самым его важную роль.

Эта идея и наработки в ее области были в дальнейшем развиты в работах Н.А. Качинского (1965), где утверждалось введенное совместно с А.Г. Дояренко понятие дифференциальной пористости почвы – таким образом был сформулирован функциональный подход к исследованию порового пространства: были выделены внутриагрегатные и межагрегатные поры, а также поры, заполненные водой и воздухом. Стоит заметить, что сама эта идея не нова: еще в 1864 году Шумахер предложил разделение пористости на общую, капиллярную и некапиллярную. В дальнейшем Фагелер, Секелер и Качинский развили представление об активных порах – тех, в которых размещается капиллярная и

гравитационная влага – и неактивных, в которых размещается связанная влага (Воронин, 1986). Н.А. Качинский (1965) предпринял попытку разделить поровое пространство почв по объемам, занятым разными категориями почвенной влаги. Эти шаги в развитии понимания структуры порового пространства привели в дальнейшем к развитию математических моделей, оценивающих и прогнозирующих передвижение веществ по профилю почвы.

В дальнейшем в работах А.Д. Воронина (1984, 1986) была развита концепция влияния функциональных характеристик порового пространства на структуру почвы: постулировалось влияние геометрии порового пространства и распределения пор по размерам на структуру почвы как таковую, то есть А.Д. Воронин считал пористость почвы «функцией структуры», во многом предвосхищая современные взгляды на двойственный характер почвенной структуры (Yudina, Kuzyakov, 2023).

Впоследствии в работах П.Н. Березина (1983, 1985) был сформулирован энергетический подход к оценке порового пространства почвы: количественная оценка порового пространства производилась по потенциальной энергии взаимодействия твердой фазы почвы с почвенной влагой, и оценка этого взаимодействия позволила оценивать процессы набухания-усадки, то есть изменения объема порового пространства. При этом главенствующая роль в этих работах посвящалась текстурной (то есть внутриагрегатной) пористости при разных влажностях, поскольку по мнению авторов это давало основное понимание о дифференциальной пористости и, как следствие – о физических составляющих почвенного плодородия.

В работах Е.В. Шеина (2005) формулируется основное современное представление о поровом пространстве в отечественной физике почв. Поровое пространство рассматривается с двух точек зрения. Согласно первой точке зрения, поровое пространство обладает двумя характеристиками: объемом и диаметром. Объем пор таким образом отображает общее структурное состояние, а диаметр используется как характеристика функциональной оценки порового пространства:

крупным порам отводится транспортная роль, средним порам – аккумулирующая влагу для растений, а тонким – накапливающая влагу, недоступную растениям, но являющуюся средой для жизнедеятельности микроорганизмов. Согласно другой точке зрения, поровое пространство характеризуется посредством, дифференциальной пористости, то есть внутри- и межагрегатного порового пространства. Как подчеркивает автор, прямое сопоставление первого и второго подхода обычно неудачно, поскольку сильно зависит от многих других факторов, влияющих на генезис почвы и, как следствие – её структуру.

Появление в почвоведении новых методов исследования порового пространства – в особенности микроморфометрии -- позволил развить её функциональную оценку. Наиболее весомый вклад в такую оценку был внесен в работах Е.Б. Скворцовой (1998, 1999), где оценивалась динамика структуры почвы при различных процессах (к примеру, промерзании-оттаивании почвы). В дальнейшем Е.Б. Скворцовой была сформулирована классификация пор по их фактору-формы, определяемому по формуле (1.1):

$$F = \frac{\frac{4\pi S}{P^2} + \frac{D}{L}}{2} \quad (1.1)$$

где F – фактор-формы поры, S – площадь поры, P – периметр поры, D – поперечный габарит поры, L – продольный габарит поры.

В этой классификации типы пор разделяются на пять классов в зависимости от величины фактора-формы (варьирующего от 0 до 1). Эти классы связываются не только с функциями пор, относящимися к ним, но и с тем, какие именно процессы привели к их формированию. Таким образом поровое пространство используется в том числе как количественная характеристика генезиса почвы на разных уровнях структурной организации.

Скачок в понимании и оценке порового пространства почв произошел в момент внедрения в почвоведение метода компьютерной томографии. Это позволило изучать твердую фазу и поровое пространство в ненарушенном состоянии. Первые опыты в этом направлении в почвоведении были проведены в

Почвенном институте имени В.В. Докучаева (Герке, Скворцова, Корост, 2012). В настоящий момент компьютерная томография стала одним из основных методов исследования порового пространства почвы: ее применяют для общей оценки структуры и порового пространства почв (Шейн и др., 2019), при изучении динамики структуры и порового пространства при увлажнении-иссушении (Fomin et al., 2023; Tolstygin et al., 2026 (a)) и промерзании-оттаивании (Tolstygin et al., 2026 (b)), оценке роста и развития корней (Mooney et al., 2012), изучения активности ферментов (Тимофеева и др., 2022) и во множестве других работ. В 2024 году на факультете почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова впервые была защищена кандидатская диссертация, в которой основным методом исследования порового пространства выступила компьютерная томография (Калнин, 2024). В последние годы метод активно вовлекается в современные исследования по физике почв и на данный момент считается одним из ключевых при изучении структуры порового пространства почвы (Абросимов и др., 2021).

Развитие современных методов позволяет все детальнее оценивать поровое пространство на всех уровнях иерархии. В последнее время активно развивается метод фокусированного ионного пучка с применением сканирующей электронной микроскопии (FIB-SEM), что позволяет оценивать структуру порового пространства уже на наноуровне (Gerke et al., 2021). Такие исследования позволяют нивелировать недостатки компьютерной томографии, основной из которых – нехватка разрешения. Комбинируя компьютерную томографию и FIB-SEM, а также применяя современные расчетные методы multi-scale image fusion и image super resolution (Gerke et al., 2015, 2017), физики почв могут добиться очень детального описания структуры порового пространства.

Параллельно с эволюцией взглядов на поровое пространство почвы *per se*, развивалась и концепция пор с точки зрения их *функции*. В этом отношении ключевым считается не поровое пространство как таковое, а его функциональная роль в почве, то есть оценка проводящей и аккумулирующей способностей. Как было отмечено выше, первым шагом в этом направлении стали работы по

изучению дифференциальной пористости. Вместе с тем получили развитие и другие концептуальные модели, основной из которых является так называемая модель «капиллярных трубок». Эта модель представляет поровое пространство почвы как набор капилляров разного диаметра. Именно с этим связывается, к примеру, разная скорость инфильтрации в почвах разного гранулометрического состава. Кроме того, такой подход позволяет производить прямой переход от гидрофизических свойств напрямую к распределению пор по размерам по формуле Лапласа (Шейн и др., 2005). Впрочем, этот подход все чаще подвергается критике. Еще в пятидесятых годах двадцатого века в работе (Fatt, 1956) отмечался главный недостаток модели капиллярных трубок – отсутствие кросс-пересечений между капиллярами, которое однозначно присутствует в почве. Критика развивалась в работе (Dullien, 1992), где автор писал, что основной недостаток модели – чрезвычайное упрощение реального порового пространства. Аналогичная, но более развернутая критика, комментирующая вместе с тем и взаимосвязь между поровым пространством и гидрофизическими свойствами развивалась и в XXI веке, в частности, в работе (Hunt et al., 2013). Тем не менее, такой концептуальный подход не утратил популярности в современности, в первую очередь в связи с тем, что основные расчетные методы получения гидрофизических свойств почвы (к примеру, уравнение ван Генухтена, более детальная речь о котором идет в разделе 1.2) основаны именно на нём.

Вместе с экспериментальными методами изучения структуры порового пространства развиваются и расчетные методы. Одним из основных методов, давно применяющихся в смежных с почвоведением областях науки – геофизике, нефтегазовом деле и т.п. – еще в девяностых годах стал метод поросетевых моделей. Поросетевая модель – это представление порового пространства в виде графа, в котором вершины графа соответствуют порам, а ребра – тонким вытянутым пустотам или каналам, связывающим поры. Метод был сформулирован еще в пятидесятых (Fatt, 1956), а первые опыты по представлению природных пористых сред в таком формате были начаты в восьмидесятые годы (Lenormand et

al., 1983). Со временем метод активно развивался: с появлением компьютерной томографии поросетевые модели начали извлекать из 3D-изображений, используя их как удобный метод исследования порового пространства и моделирования в нем однофазной и двухфазной проницаемостей. В последние годы к методу был приложен современный математический аппарат, позволяющий сохранять геометрию и топологию порового пространства (Zubov et al., 2022). Использование такого подхода кажется более точным, чем представление порового пространства в виде дифференциальной пористости или модели «капиллярных трубок», поскольку позволяет учитывать структуру порового пространства как есть, не прибегая при этом к концептуальным или методическим упрощениям (Hunt et al., 2013).

Поросетевые модели широко используются для исследования морфологических свойств почвы (Tolstygin et al., 2026 (a, b)), задач динамики флюидов в пористой среде, включая моделирование гистерезиса (Ahrenholz, 2008), исследования сорбции флюидов (Xu, Prodanović, 2018), анализа связности порового пространства (Bernabé et al., 2010), исследования распределения пор по размерам (Толстыгин и др., 2025; Vogel, 2000; Gerke, 2025; Tolstygin et al., 2026), получения капиллярных кривых (Vogel, 2000; Gerke, 2025; Толстыгин 2025), исследования поведения газов (Mahabadi et al., 2016) и так далее.

Несмотря на широкую область применения, использование поросетевых моделей в почвоведении на данный момент довольно скудно. Задачи, связанные с его использованием, находятся на фронте научного развития, в особенности с учетом увеличивающейся частоты использования компьютерной томографии в исследованиях порового пространства почв (Толстыгин и др., 2025).

1.1.2 Процессы структурообразования в почве

Различные процессы, протекающие в почве, так или иначе оказывают влияние на её структуру. Изучению этих процессов посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных исследователей. К таким процессам относятся увлажнение-иссушение, промерзание-оттаивание, химическое

воздействие, структурообразование под влиянием деятельности почвенных животных, корневых систем растений, а также в результате антропогенного воздействия. Увлажнение-иссушение оказывает сильное воздействие на поровое пространство почвы. Исследование влияния этих процессов на структуру содержит ряд актуальных проблем. Увлажнение и иссушение почвы приводят к объемным изменениям в почве вследствие ее набухания и усадки. Ключевым в этом отношении являются гранулометрический состав и органическое вещество почвы. Еще в работе (Ревут, 1972) отмечается, что чем выше дисперсность почвы, тем более выражены в ней объемные изменения в следствие набухания частиц. Связи структурных особенностей и текстуры с органическим веществом посвящены множество современных работ (Pires et al., 2005, 2007, 2020; Blanco-Canqui, Lal, 2007; Johannes et al. 2017; Kay, 2018; Diel, Vogel, Schlüter, 2019; Jensen et al., 2019). С развитием компьютерной томографии удалось подтвердить, что структура почвы очень динамична и претерпевает сильные изменения в ходе увлажнения-иссушения, а также начать исследования структуры в ненарушенном состоянии (Fomin et al., 2023; Tolstygin et al., 2026). Актуальной проблемой в исследованиях влияния увлажнения-иссушения на структуру почвы является количественная оценка такого изменения. Решение этой проблемы кроется в использовании метрик с высоким информационным содержанием, что позволит количественно оценивать динамику структуры на каждом шаге увлажнения-иссушения и проводить численный анализ поведения структуры (Tolstygin et al., 2026 (b)).

Влияние увлажнения-иссушения на структуру и поровое пространство почвы является актуальной проблемой физики почв. Для ее корректного решения должны быть выбраны соответствующие методы и критерии (метрики) оценки.

1.1.3 Методы исследования структуры порового пространства почв

1.1.3.1 Полевые методы

Вместе с историческим развитием понимания порового пространства почв, развивались и методы его исследования. Одним из первых параметров, интересовавших физиков почв была, собственно, «порозность» (в русской

литературе его теперь принято именовать как «пористость»). Одно из первых определений этого свойства звучит как «величина и число пор и трещин в почве». Поры, в свою очередь, определяются как «небольшие полые пространства преимущественно с круглым сечением, пронизывающие почву, подобно каналам», а к трещинам относят щели и расселины (Ревут, Роде, 1969).

В работах Андрианова (1947) приводятся первые полевые методы определения пористости. Несмотря на очевидные недостатки (ведь при профильном описании невооруженным взглядом можно обнаружить лишь макропоры) и относительную простоту этих методов, они в той или иной модификации присутствуют в современных методах полевого описания, вплоть до алгоритмов описаний почвенного профиля, используемых в методологии полевых практик факультета почвоведения (Прокофьева, Малышева, Алексеев, 2008; WRB 2022).

1.1.3.2 Расчетные методы

Для характеристики порового пространства в классической физике почв используется ряд расчетных параметров. Е.В. Шеин (2005) выделяет следующие виды таких параметров:

- Пористость почвы ε , определяемая как $\varepsilon = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{m_s/\rho_s}{m_s/\rho_b} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$, где V_t , V_s – объемы почвы и твердой фазы, соответственно, m_s – масса твердой фазы почвы, ρ_b , ρ_s – плотности почвы и твердой фазы, соответственно;
- Объем пор, занятый воздухом ε_{air} , определяемый как $\varepsilon_{air} = \varepsilon - \theta$, где θ – объемная влажность почвы
- Приведенная пористость e (она же коэффициент пористости), определяемая как $e = \frac{V_0}{V_s} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$, где V_0 – объем порового пространства
- Удельный объем пор почвы Φ , определяемый как $\Phi = \frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_s}$

- Суммарная агрегатная пористость $\varepsilon_{\Sigma agr}$, определяемая как $\varepsilon_{\Sigma agr} = \frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_a}$, где ε_a – агрегатная пористость, равная частному объему пор агрегата ко всему объему агрегата
- Межагрегатная пористость $\varepsilon_{межагр}$, определяемая как $\varepsilon_{межагр} = \varepsilon - \varepsilon_{\Sigma agr}$

В дополнение к этим видам пористости, в работах Н.А. Качинского приводятся и параметры объемов пор, заполненных разными типами почвенной влаги, для определения которых нужно знать соответствующие почвенно-гидрологические константы (Вадюнина, Корчагина, 1961; Ревут, Роде, 1969):

- Объем пор, занятый прочносвязанной влагой
- Объем пор, занятый рыхлосвязанной влагой
- Объем пор, занятый капиллярной водой
- Объем пор, занятый водой всех категорий

Стоит так же отметить метод Мичурина (Годлин, 1958), основанный на методе сферической упаковки. Предполагая, что структуру почвы можно воспроизвести как упакованные в гексагональную систему сферы, эту структуру можно выразить через объемный вес, удельный вес и относительную пористость почвы. Отталкиваясь от этой взаимосвязи, можно вывести суммарную агрегатную пористость, межагрегатную пористость, полевую влагоемкость в объемном измерении, влажность разрыва капилляров, влажность устойчивого завядания, содержание доступной растениям влаги и пористость аэрации. Тем не менее, идея сферической упаковки обладает рядом серьезных недостатков (в первую очередь, физической необоснованностью). Поэтому, несмотря на широту параметров, определяемых по методу Мичурина, он не нашел применения в современной физике почв. Кроме того, в литературе так же описаны методы Долгова и Климес-Смика для расчетов дифференциальной пористости. Оба этих метода требуют знания об удельном весе и почвенно-гидрологических константах.

Использование компьютерной томографии и метода FIB-SEM позволяет напрямую определять различные типы пористости (общая пористость, закрытая

пористость, число пор, локальные диаметры пор), а также ряд других параметров порового пространства: Эйлерову характеристику, степень анизотропии, рассчитать функционалы Минковского и числа Бетти (Fomin et al., 2023; Калнин, 2024). Применяя современные методы исследования порового пространства, мы можем получать значительно больший набор характеристик. Однако, как правило (что раскрыто в разделе 1.1.4 настоящей работы), одних этих метрик недостаточно для полноценного описания структуры порового пространства. Для получения более детального представления о структуре порового пространства в современных исследованиях производят дополнительные манипуляции с изображениями компьютерной томографии: извлекают поросетевые модели, рассчитывают корреляционные функции и так далее (Tolstygin et al., 2026 (a, b)).

1.1.3.3 Лабораторные методы

Как было показано в предыдущем параграфе, большинство расчетных методов определения собственно пористости (за исключением методов компьютерной томографии и FIB-SEM) основано на предварительном определении плотности (удельного веса). Впрочем, существуют и прямые лабораторные методы, которые позволяют исследовать поровое пространство. К таким методам относятся:

- Определение дифференциальной пористости посредством решения обратной задачи: на основании концепции «капиллярных трубок» радиус пор связывается с их водоудерживающей силой по формуле Жюрена $h = \frac{2\sigma \cos\varphi}{r\rho g}$ (где h – высота капиллярного поднятия, σ – поверхностное натяжение, φ – угол смачивания, r – радиус капилляра, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения). Высота капиллярного поднятия определяется методом капилляриметра или вакуум-капилляриметра (Вадюнина, Корчагина, 1961)
- Определение общей пористости при помощи воздушного пикнометра по методу Кунце, Поликайта и Свеницкого (Ревут, Роде, 1969);

- Методы Шаповаловой, Линдера и Климес-Смика для определения дифференциальной пористости (Ревут, Роде, 1969);
- Методы Пигулевского, Авдусина, канифольный и карбинольный методы Польского, а также метод Кубиена в различных модификациях для определения пористости в шлифах (Ревут, Роде, 1969);

Все перечисленные методы в том или ином виде применяются в современных исследованиях, но обладают рядом недостатков: требуют соответствующей материальной базы и/или дают недостаточное понимание о структуре порового пространства. Кроме того, их применение для оценки динамики структуры при циклических процессах увлажнения-иссушения в принципе практически невозможно.

1.1.4 Методы оценки порового пространства почвы

Из предыдущего раздела становится ясно, что основной характеристикой для оценки порового пространства в физике почв является собственно пористость (именуемая так же в литературе прошлого как «порозность», а еще ранее и как «скважность»). В современной литературе встречаются и другие метрики, используемые исследователями для сравнения порового пространства различных образцов. Каждая из них используется довольно широко, однако большинство из них обладают серьезными недостатками (Tolstygin et al., 2026 (a, b)). Ниже приводится перечисление этих метрик с указанием некоторых активно цитируемых современных исследований, где применяются эти метрики, а также дана их краткая характеристика:

- **Различные типы пористости** (Zhang, Cui, 2018; Leuther, Schlüter, 2021; Abramyan et al., 2021; Fomin et al., 2023)

Основная проблема пористости как характеристики порового пространства заключается в том, что это скалярная метрика, которая не дает представления о структуре порового пространства. В работах (Tolstygin et al., 2026 (a, b)), а также в результатах настоящей работы показано, что образцы с совершенно разной структурой порового

пространства могут обладать одинаковой или близкой пористостями.

- **Плотность почвы** (Torrance et al., 2008; Taina et al., 2013; Sun et al., 2022; Wang et al., 2022)

Плотность обладает теми же недостатками, что и пористость. Кроме того, попытки установить взаимосвязь структуры и порового пространства почвы с плотностью может внести значительные ошибки в интерпретацию результатов, так как даже небольшие изменения в составе образца (например, случайное попадание в инструменты пробоотбора частиц с заведомо высокой или низкой плотностью) могут внести значительные изменения в получаемые численные значения

- **Распределение пор по размерам** (Ma et al., 2015; Pires et al., 2020; Wang et al., 2020; Liu, Ma, Fan, 2021)

Распределение пор по размерам может выступать в качестве валидного параметра оценки структуры порового пространства, однако это во многом зависит от метода получения этого распределения. Наиболее распространен метод получения распределения пор по размерам из основной гидрофизической характеристики (ОГХ) (Шеин, 2005). Но такой подход сложно назвать точным, поскольку для аппроксимации ОГХ преимущественно используется уравнение ван Генухтена. Это уравнение же основано на концептуальном представлении порового пространства в виде капиллярных трубок. Недостатки такого концептуального представления были упомянуты выше, недостатки уравнения ван Генухтена приведены в работе (Терлеев и др., 2024) и раскрыты в разделе 1.2 настоящей работы. Если использовать для получения распределения пор по размерам более точные подходы (к примеру, поросетевые модели), то эта метрика становится довольно полезной при оценке структуры порового пространства (Tolstygin et al., 2026 (a, b))

- **Корреляционные функции** (Gerke et al., 2012; Karsanina et al., 2015,

2021)

Корреляционные функции – набор векторных характеристик, описывающих морфологические особенности порового пространства. Метрика широко используется в изучении природных пористых сред, в том числе и почв (Tolstygin et al., 2026 (a, b)). Ее основным преимуществом является высокая степень информационного содержания; более того, корреляционные функции содержат внутри себя ряд других параметров: пористость, связность, степень анизотропии, извилистость порового пространства, сами по себе которые представляют ценность, однако недостаточны для полноценной характеристики структуры порового пространства. Главным недостатком корреляционных функций являются трудности при интерпретации, особенно при наличии большого числа образцов для сравнения (Tolstygin et al., 2026 (b)).

- **Функционалы Минковского** (Калнин, 2024; Ivonin et al., 2020, 2022)
Отдельные функционалы Минковского не несут в себе достаточной информации для однозначной характеристики порового пространства. Кроме того, они уже содержатся внутри корреляционных функций.
- **Эйлерова характеристика** (Leuther, Schlüter, 2021; Abramyan et al., 2021)
Эйлерова характеристика – важный топологический параметр пористой среды, но он скалярный и не отражает всех топологических особенностей и их ориентации в пространстве, поэтому одной только Эйлеровой характеристики недостаточно для полноценного описания структуры порового пространства почвы.
- **Статистики поросетевых моделей** (Tolstygin et al., 2026 (a, b))
Поросетевые модели позволяют получать подробную информацию о распределении пор и каналов по размерам. При использовании современного математического аппарата, сохраняющего топологию

порового пространства (Zubov et al., 2022) можно также исследовать топологические параметры среды – Эйлерову характеристику и связность порового пространства. Главный недостаток поросетевых моделей связан с ограничениями компьютерной томографии, однако эта проблема может быть решена привлечением дополнительных методов.

- **Персистентная гомология** (Tolstygin et al., 2026 (b))

Персистентная гомология дает детальное представление о топологии порового пространства и твердой фазы, но обладает рядом серьезных недостатков. Основной из них – сложность в интерпретации результатов. Метрика сама по себе несет большую информационную нагрузку. При попытке сравнения нескольких образцов, интерпретация такого сравнения довольно сложна, что неизбежно ведет к потере информации. В первую очередь это связано с крайне скудным применением метода в почвоведении и, как следствие, отсутствием некоторой базы понимания персистентной гомологии в приложении к почвам (Tolstygin et al., 2026 (b))

- **Гидрофизические параметры: основная гидрофизическая характеристика, коэффициент влагопроводности и коэффициент фильтрации** (Estabragh et al., 2017; Alaoui, Lipiec, Gerke, 2021; Cheng et al., 2021)

Каждая из этих метрик очень важна для понимания процессов, происходящих в почве. Несмотря на то, что их получение в лабораторных условиях как правило затруднительно, они очень важны для апробации результатов моделирования. Гидрофизические параметры также с завидной регулярностью применяются для описания структуры и порового пространства почвы, однако в целом они дают только косвенные сведения об этих свойствах почвы.

Исходя из достоинств и недостатков этих метрик (как правило, широко применяющихся в современных исследованиях структуры порового пространства),

их можно условно разделить на метрики с низким (пористость, плотность и т.д.) и высоким (корреляционные функции, поросетевые модели и т.д.) информационным содержанием. Сложно сказать о том, какие из них «лучше», поскольку метрики с низким информационным содержанием как правило значительно проще определить; во многом база для их лабораторного и расчетного определения была осуществлена еще в середине двадцатого века (как описано в разделе 1.1.3). Но исследователи вынуждены платить низким информационным содержанием за простоту расчетов. К примеру, в работе (Fomin et al., 2023) авторы предприняли попытку характеризовать поведение почвенной структуры на основании разных типов пористости. В более чем половине случаев они потерпели неудачу, поскольку использованные параметры не обладают достаточным информационным содержанием. В свою очередь, метрики с высоким информационным содержанием требуют больших временных затрат на получение и определенных компетенций в их интерпретации, однако позволяют делать более корректные выводы о структуре порового пространства почвы (Tolstygin et al., 2026 (a, b))

Многолетние исследования структуры порового пространства сформулировали их определенную парадигму. Эта парадигма пользуется рядом допущений и некоторыми недостатками, за что в последние годы активно критикуется в научном сообществе (Hunt et al., 2013). Развитие современных методов и применение характеристик с высоким информационным содержанием 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.

1.2 Гидрофизические свойства почвы

1.2.1 Уравнение Ричардса, дифференциальная влагоемкость, функция влагопроводности

Основным уравнением влагопереноса в физике почв является уравнение Ричардса (1.4), выводимое из фундаментальных физических законов – уравнения неразрывности (1.2) и уравнения Дарси для ненасыщенной почвы (1.3):

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta q}{\delta z} \quad (1.2)$$

где θ – объёмная влажность почвы, t – время, q – поток влаги, z – величина толщи почвы

$$q = K_{\text{вл}}(P_{\text{к-с}})(\nabla P_{\text{к-с}} - 1) \quad (1.3)$$

где $K_{\text{вл}}$ – коэффициент влагопроводности почвы (ненасыщенная гидравлическая проводимость), $P_{\text{к-с}}$ – капиллярно-сорбционное давление

Объединяя (1.2) и (1.3), и подставляя член «источник/сток» $I(z, t)$ получим:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} (K_{\text{вл}}(P_{\text{к-с}})(\nabla P_{\text{к-с}} - 1)) \pm I(z, t) \quad (1.4)$$

Поскольку решение такого дифференциального уравнения с двумя переменными (капиллярно-сорбционным давлением и объёмной влажностью почвы) невозможно, уравнение сводится к одной переменной $C(\theta, P_{\text{к-с}}) = \frac{d\theta}{dP_{\text{к-с}}}$, которую называют *дифференциальной влагоемкостью* (Шеин, Рыжова, 2016). Для того, чтоб получить такую величину, необходимо построить зависимость объёмной влажности почвы от капиллярно-сорбционного давления – основную гидрофизическую характеристику (ОГХ) или «кривую водоудерживания» почвы.

Для получения основной гидрофизической характеристики нам необходимо подобрать такое уравнение аппроксимации, которое опишет эту кривую. Разрешая это уравнение, мы сможем получить дифференциальную влагоемкость и тем самым описать влагоперенос в почве по уравнению Ричардса. В физике почв существует

несколько таких уравнений: уравнение Брукса-Кори (Brooks, Corey, 1963), уравнение Хаверкампма и соавторов (Haverkamp et al., 1977), уравнение Косуги (Kosugi, 1994, 1996). Наиболее общепринятым же в отечественной практике считается уравнение ван Генухтена (1.5):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right)^{1-1/n} \quad (1.5)$$

где S_e – 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).

Для получения функции влагопроводности используется уравнение ван Генухтена-Муалема (1.6):

$$K_{вл} = K_{\phi} * S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (1.6)$$

Где K_{ϕ} – коэффициент влагопроводности, $m = 1 - 1/n$, где n – параметр из уравнения ван Генухтена, а l – параметр, зависящий от связности пор и как правило принимаемый равным 0.5 (Mualem, 1976).

Таким образом, чтобы получить основную гидрофизическую характеристику, и, как следствие, дифференциальную влагоемкость, необходимо получить параметры θ_r , θ_s , n , и α из уравнения ван Генухтена. После этого мы так же сможем рассчитать коэффициент влагопроводности, используя при этом экспериментально определенный коэффициент фильтрации. Для решения этой задачи в классической физике почв используется два подхода. Первый – экспериментальный: при помощи лабораторного или полевого эксперимента можно получить точки зависимости «давление-влажность», а затем аппроксимировать полученные данные уравнением ван Генухтена (Шеин, 2005). Второй подход – использовать педотрансферные функции: статистические регрессионные модели, связывающие основные свойства

почвы (гранулометрический состав, плотность, содержание органического углерода и так далее) с параметрами уравнения ван Генухтена-Муалема (Pachepsky, Rawls, 2004). С развитием компьютерной томографии и различных сопутствующих методов, появился еще один подход – прямое моделирование двухфазной проницаемости в поросетевых моделях (Толстыгин и др., 2025), а также метод решеточных уравнений Больцмана и метод конечных разностей уравнения Стокса для получения коэффициента фильтрации (Gerke et al., 2026). Ниже приводится краткий обзор классических методов; отдельно обсуждаются недостатки и уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема.

1.2.2 Полевые и лабораторные методы определения гидрофизических свойств почв

1.2.2.1 Определение потенциала почвенной влаги

Для определения потенциала почвенной влаги (капиллярно-сорбционного давления) в классической физике почв применяются следующие экспериментальные методы:

- Тензиометрия и капилляриметрия. Оба этих метода основаны на одной и той же идее: керамическая свеча, подключенная к измерительному прибору (например, манометру), сообщается с почвой, и влага поступает в почву из прибора или наоборот. Тензиометры применяются в полевых условиях, и вода из них поступает в почву до момента установления равновесия. Капилляриметры применяются в лабораторных условиях и наоборот, создавая давление при помощи компрессора вытягивают почвенную влагу из подготовленного образца (Вадюнина, Корчагина, 1961). Этот метод так же широко применяется для определения коэффициента влагопроводности. Общим недостатком этих методов является неизбежное разрушение исходной почвенной структуры при помещении в почву керамической свечи-датчика.
- Метод мембранного пресса. Суть метода заключается в выравнивании потенциала ненасыщенной влагой почвы и свободой воды путем

повышения внешнего давления над почвой (Вадюнина, Корчагина, 1961). Этот метод позволяет охватить широкий диапазон давлений, однако его минус заключается в больших временных затратах на проведение эксперимента.

- Метод тензиостатов. В этом методе используется та же идея, как и в методе капилляриметров: установление равновесия в почве при задании определенного давления. Давление же задается путем создания ряда боксов с постоянным давлением влаги. После достижения насыщения в одном боксе (например, с $pF=1.0$), образец почвы переставляется в другой. Главным недостатком метода является их ограничение по максимальному давлению (не более -800 сантиметров водного слоя, что примерно равняется $pF=2.9$).
- Метод адсорбции над растворами солей. При использовании этого метода устанавливается равновесие между относительными давлениями растворов солей и влагой в почве. Этот метод обладает двумя недостатками: большими временными затратами на проведение эксперимента и тем фактом, что в этом случае достигается полный потенциал почвенной влаги, а не капиллярно-сорбционный. Вторым недостатком обычно компенсируется тем, что в области адсорбированной влаги отличия между капиллярно-сорбционным и полным давлениями почвенной влаги настолько невелико, что им можно пренебречь. Поэтому этот метод хорошо подходит для определения кривой водоудерживания в областях высоких (pF больше 4.0) давлений (Шеин, 2005).
- Метод центрифугирования. В этом методе влага из почвы удаляется под воздействием центробежной силы. Взвешивая образцы почвы после центрифугирования при определенном количестве оборотов центрифуги, можно по разнице масс определить зависимость давления от влажности (Смагин, Садовникова, Али, 1998). Основным

недостатком этого метода является разрушение структуры почвы при приложении к ней центробежной силы.

Таким образом, все экспериментальные методы определения зависимости «давления-влажность» обладают некоторыми недостатками. Тем не менее, при правильном комбинировании этих методов можно получить кривую водоудерживания для полного диапазона давлений почвенной влаги. Также экспериментальные методы являются важнейшим этапом любого моделирования, поскольку только сравнивая результаты с экспериментом можно провалидировать модель и оценить её адекватность.

1.2.2.2 Определение коэффициента фильтрации

Для определения коэффициента фильтрации применяются следующие полевые и лабораторные методы:

- Метод заливаемых площадей. В этом методе рамы различных площадей врезают в почву, заливают их водой и подсчитывают расход влаги при постоянном контролируемом уровне напора воды.
- Метод трубок. Этот метод схож с методом заливных площадей: в нескольких повторностях (как правило, от десяти и более) трубки определенного диаметра заливаются водой, в них поддерживается постоянный уровень влаги и контролируется её расход в фиксированные промежутки времени. Метод очень удобен для определения фильтрации послойно в почвенном профиле, однако обладает большой дисперсией (для чего и необходимо большое количество повторностей). Метод трубок наиболее распространен в классической физике почв для определения коэффициента фильтрации.
- Лизиметрический метод. В этом методе создается почвенная колонна с дренажем; эксперименты на таких установках продолжаются на протяжении многих лет. Действующие лизиметры установлены на почвенном стационаре факультета почвоведения МГУ имени М.В.

Ломоносова.

- Различные лабораторные методы, основанные на принципе конструирования некоего устройства, которое будет фиксировать образец почвы, снизу которого будет организован сток влаги, а сверху будет поддерживаться постоянный напор воды. Пример такого устройства приведен в работе (Rangel et al., 2013). Такие методы получили распространение в последнее время, особенно с ростом популярности 3D-печати: при помощи 3D-принтера легко изготовить девайс под нужный размер образца почвы. Основной проблемой этих методов является нарушение принципа общего поля давления: при стоке влаги из почвы вода неизбежно будет проходить через некий резервуар, где почвы нет, а потому показания таких приборов будут далеки от истинных значений фильтрации (Khirevich, Yutkin, Patzek, 2022).

1.2.3 Применение педотрансферных функций для определения гидрофизических свойств почв

Помимо лабораторных исследований, для получения параметров уравнения ван Генухтена применяются педотрансферные функции (ПТФ) – модели, связывающие основные почвенные свойства с параметрами основной гидрофизической характеристики (Pachepsky, Rawls, 2003). Как правило, ПТФ представляют из себя регрессионные модели, связывающие гранулометрический состав, плотность, органическое вещество, емкость катионного обмена и прочие свойства почвы с параметрами уравнения ван Генухтена. В последнее время популярность приобретает машинное обучение (Achieng, 2019) для предсказания кривой водоудерживания и коэффициентов фильтрации и влагопроводности, а применение нейронных сетей для этой цели широко началось еще в девяностых годах прошлого века (Pachepsky, Timlin, 1996; Koekkoek, Booltink, 1999). Существуют разнообразные ПТФ для глобальных расчетов, а также локальные,

используемые для некоторого региона Земли. Широко известна модель Rosetta (Schaap, Leij, Van Genuchten, 2001), применяемая в том числе в программе Hydrus (Radcliffe, Simunek, 2018).

Педотрансферные функции, несмотря на их большой потенциал, обладают и рядом недостатков. Главный из них – практически повсеместное использование исключительно гранулометрического состава, плотность и содержания органического вещества для расчетов гидрофизических параметров. Считается, что достаточно крупная и достоверная база данных этих свойств и экспериментально определенных кривых водоудерживания и коэффициентов фильтрации и влагопроводности необходимо и достаточно для формулирования педотрансферной функции. Однако совершенно ясно, что одних этих свойств не может быть достаточно, поскольку гидрофизические свойства почвы напрямую зависят от структуры порового пространства, которая не определяется одним лишь набором базовых свойств почвы. Тем не менее, физики почв повсеместно применяют педотрансферные функции в силу простоты их использования, которая обусловлена широкой распространенностью различных ПТФ для разных регионов Земли, а также большой накопленной базой информации о текстуре, плотности и прочих свойствах разных почв.

Несмотря на то, что часто применение ПТФ позволяет получить более или менее приемлемые результаты (ведь в противном случае множество расчетов, например, поливных норм, были бы неприемлемо для сельского хозяйства и тем самым продемонстрировало бы свою полнейшую непригодность), большинство ПТФ (в том числе и популярная программа RETC (Van Genuchten, Leij, Yates, 1992), определяют параметры из уравнения ван Генухтена, которое используется для последующих расчетов. Однако само по себе уравнение ван Генухтена (как и уравнение ван Генухтена-Муалема) обладает массой недостатков.

1.2.4 Недостатки уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема

Уравнения ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема завоевали внушительную популярность среди физиков почв по всему миру. Тем не менее, они обладают

внушительным перечнем недостатков, которые ставят под сомнение адекватность их применения. Среди таких недостатков:

1. Нефизичность параметров n , и α . В работе (Терлеев и др., 2024) авторы поясняют, что параметр n не может быть интерпретирован ни как пористость, ни как распределение пор по размерам, ни как наклон кривой водоудерживания, ни как даже подгоночный параметр, поскольку был выбран ван Генухтеном для удобства расчетов. В определении параметра α же вообще допущена методологическая ошибка.
2. Сама по себе модель ван Генухтена основана на нефизичной концептуальной модели «капиллярных трубок», которая неоднократно подвергалась критике (Hunt et al., 2013)
3. Параметр l из уравнения ван Генухтена-Муалема не несет под собой физического смысла. Часто его пытаются интерпретировать как параметр «кривизны пор» или «связности порового пространства», однако такая интерпретация не обоснована ничем. В оригинальной работе (Muallem, 1976) Муалемом было принято значение l равное 0.5 и это было обусловлено удобством расчетов. Однако в реальных исследованиях этот параметр приходится варьировать для сходимости с экспериментальными данными; в том числе варьировать и в область отрицательных значений (Дедюлина и др., 2020), что в целом не имеет под собой физического смысла.
4. Уравнение ван Генухтена никак не учитывает динамику структуры порового пространства, предполагая её статичной, что не так (Fomin et al., 2023; Tolstygin et al., 2026)

Таким образом, применение уравнений ван Генухтена и ван Генухтена-Муалема в современных исследованиях является крайне сомнительным. Однако они всё ещё широко распространены в разнообразных работах по физике почв. Это обуславливает необходимость исследования и валидации современных методов,

которые могут послужить альтернативой и дополнением при моделировании гидрофизических свойств.

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

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика объектов исследования

Объектом исследования являются черноземные и дерново-подзолистые почвы. Полевые работы были проведены на двух участках: в районе деревни Дарьино Пушкинского района Московской области и в Центральном черноземном заповеднике имени профессора В.В. Алехина, расположенном в Курской области. Выбор именно таких объектов исследования обусловлен следующими факторами:

- Дерново-подзолистые почвы Пушкинского района Московской области и черноземы Курской области представляют собой два объекта чрезвычайно разного генезиса; сформированы под действием разных факторов почвообразования и, как следствие, отличаются друг от друга по свойствам. Это приводит к формированию разной структуры в отдельных горизонтах почвенного профиля. Таким образом, в этом исследовании мы охватываем внушительный спектр различных почвенных структур почв разного генезиса
- Оба объекта представляют собой особый интерес для сельского хозяйства. Дерново-подзолистые почвы представляют типичный объект культивации в Нечерноземной полосе России, а черноземы в целом являются одним из основных объектов сельского хозяйства на территории России и некоторых стран бывшего СССР.
- Образцы чернозема были отобраны именно в черноземном заповеднике имени профессора В.В. Алехина по той причине, что этот объект остается одним из немногих мест, где черноземы не были затронуты антропогенным воздействием. Как следствие, гумусовые горизонты этих черноземов представляют собой практически эталон структуры, что особенно важно при изучении структуры порового пространства и происходящих в ней процессах.

На рисунке 2.1-1 приведена карта с указанием точек полевых исследований.

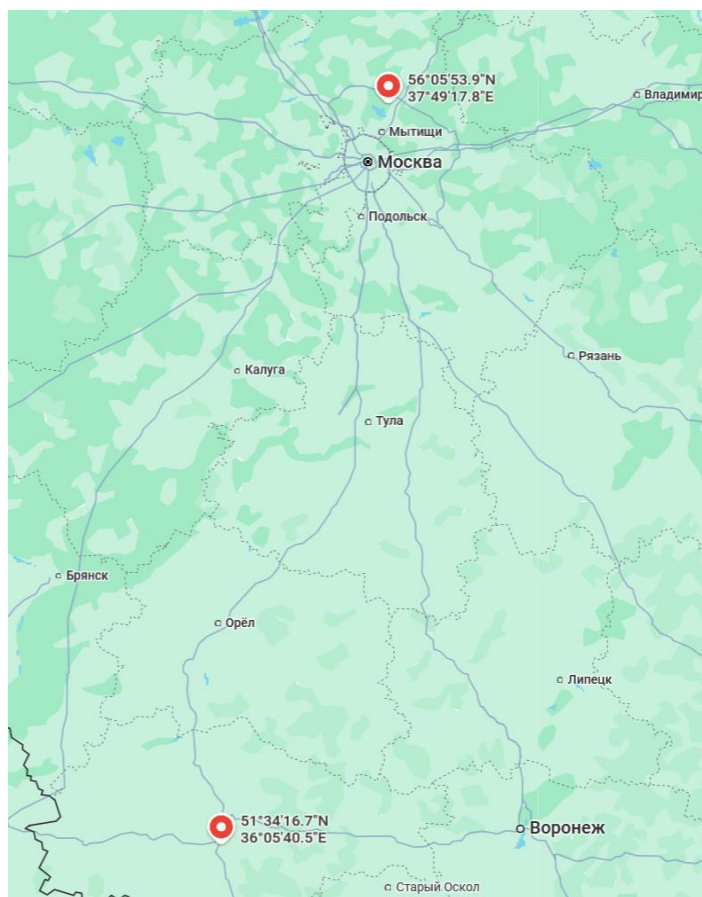


Рисунок 2.1-1. Карта с указанием точек полевых исследований.

Опорный разрез на участке 1 под 90-летним еловым лесом с примесью березы был заложен близ деревни Дарьино (Скворцова и др., 2018). Почва в разрезе была классифицирована как дерново-подзолистая типичная ненасыщенная мелкая мелкоосветленная на покровных суглинках (Полевой определитель почв России, 2008), Albic Glossic Retisol (Cutanic, Differentic) (WRB, 2022). Для исследования использовались образцы, отобранные из трех почвенных горизонтов: серогумусового горизонта АУ (глубина пробоотбора 5 см), элювиального горизонта ЕL (глубина пробоотбора 10 см), и текстурного горизонта ВТ (глубина пробоотбора 45 см) (здесь и далее названия горизонтов приводятся согласно Полевому определителю почв России, 2008).

Опорный разрез на участке 2 был заложен на участке косимой степи в «Стрелецкой степи» Центрального черноземного государственного заповедника имени профессора В.В. Алехина. Почва в разрезе была классифицирована как чернозём миграционно-мицеллярный карбонатсодержащий среднемошный

карбонатный на карбонатных лессовидных суглинках (Полевой определитель почв России, 2008), Greyzemic Chernozem (Loamic, Pachic) (WRB, 2022). Для исследования использовались образцы, отобранные из трех почвенных горизонтов: темногумусового дернинного горизонта AU_{tz} (нижний индекс tz приведен согласно (Хитров, Герасимова, 2022)) (глубина пробоотбора 20 см), темногумусового горизонта AU (глубина пробоотбора 40 см), и аккумулятивно-карбонатного горизонта $BСА_{mc}$ (далее по тексту и в рисунках нижний индекс mc опущен для удобства) (глубина пробоотбора 80 см). Все образцы всех почв были отобраны в течение лета 2021 года. Сроки пробоотбора подбирались таким образом, чтобы на протяжении предыдущего дня и дня пробоотбора стояла безоблачная солнечная погода.

2.2 Методы исследования

2.2.1 Полевые методы исследования

Пробоотбор для проведения дальнейших лабораторных экспериментов был проведен по следующей схеме:

1. Для проведения эксперимента по увлажнению-иссушению почв из каждого исследованного почвенного горизонта было отобрано по 5 микромонолитов;
2. Из каждого использованного в исследовании почвенного горизонта был отобран средний образец для определения гранулометрического состава и содержания органического углерода. Кроме того, в каждом из этих горизонтов была определена плотность. Эти почвенные свойства приводятся в разделе 2.2.2.3;
3. В каждом из исследованных горизонтов был определен коэффициент фильтрации для последующего сравнения с моделированием.

Образцы почв (микромонолиты) для эксперимента по увлажнению-иссушению были отобраны в полипропиленовые цилиндры диаметром 2 сантиметра и высотой 5 сантиметров. Процедура пробоотбора выглядела следующим образом:

1. В подготовленной площадке в почвенном горизонте вырезался куб размером 5x5x5 сантиметров
 2. Сверху на куб помещался полипропиленовый цилиндр
 3. Куб аккуратно обрезался со всех сторон до диаметра в 2 сантиметра, чтобы он мог быть помещен внутрь цилиндра
 4. После обрезки цилиндр аккуратно надевался на почву, при этом на цилиндр не оказывалось давления
 5. Лишняя почва, не поместившаяся в цилиндр, аккуратно обрезалась со дна
- Сразу же после отбора, цилиндры были обернуты полиэтиленовой пленкой для предотвращения испарения влаги. Для переноски образцов была использована рефрижераторная камера с температурой 4 °С.

Определение коэффициентов фильтрации проводилось методом трубок в пяти повторностях. Диаметр трубки – 5 см, высота трубки – 10 см. Напор воды составлял 10 см и поддерживался путем фиксирования времени долива, когда уровень воды снижался на 1 сантиметр. Детальная методика определения описана в (Вадюнина, Корчагина, 1961; Шеин, 2005).

2.2.2 Лабораторные методы исследования

2.2.2.1 Лабораторный эксперимент по увлажнению-иссушению

Для эксперимента были использованы образцы всех горизонтов дерново-подзолистой почвы участка 1 и чернозема участка 2. Схема лабораторного эксперимента по увлажнению-иссушению показана на рисунке 2.2.2.2-1.

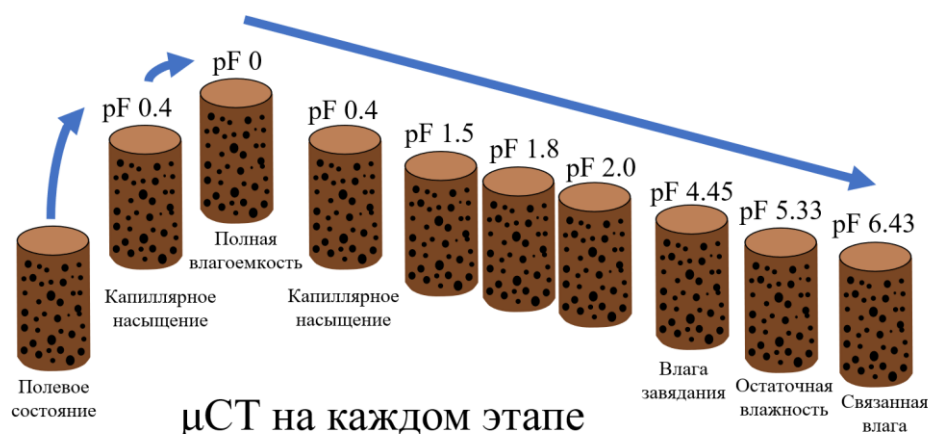


Рисунок 2.2.2.1-1. Схема лабораторного эксперимента по увлажнению-иссушению почвенных микромонолитов. Более детальная схема приведена в работах (Fomin et al., 2023, Tolstygin et al., 2026 (b))

Почвенные микромонолиты были подвержены равновесному циклу увлажнения-иссушения с компьютерной томографией образца в каждом из состояний насыщения. Иссушение образцов до $pF=2.7$ проводилось методом тензиостатов (Шеин, 2005), достижение равновесия для каждой точки занимало 14-21 дней. Увлажнение-иссушение образцов проводилось следующим образом:

1. Насыщение от полевой влагоемкости до полного насыщения ($pF = 0$) было осуществлено капиллярным подъемом в течение 2 недель.
2. Иссушение до $pF=1.8$ осуществлялось с использованием песчаной мембраны
3. Иссушение от $pF=1.8$ до $pF=2.7$ осуществлялось с использованием каолинит-песчаной мембраны.
4. Диапазон $pF=4.45-6.43$ был охвачен с использованием равновесия давления пара путем сорбционного баланса над солями. Для давлений pF

= 4.45, 5.33 и 6.43 были использованы насыщенные солевые растворы K_2SO_4 , KCl и $LiCl$ соответственно. Равновесие гарантировалось поддержанием давления 100 кПа в течение 14 дней.

5. Для достижения абсолютно сухих условий образцы высушивались в течение 48 ч при температуре $T = 105\text{ }^\circ\text{C}$.

Для каждого из исследованных образцов была проведена компьютерная томография (μCT) в выбранных точках насыщения, а именно: начальная полевая влажность, $pF=0.4$ (капиллярная влагоемкость) во время увлажнения, полная влагоемкость, $pF=0.4$ (капиллярная влагоемкость) во время иссушения, $pF=1.5$, $pF=1.8$, $pF=2.0$, $pF=4.45$, $pF=5.33$, $pF=6.43$. Таким образом, каждый образец был изучен в 10 состояниях увлажнения иссушения. Совокупное количество исследованных 3D-изображений равнялось 300 (по 5 образцов из 6 горизонтов (по 3 на каждую из почв) в 10 состояниях насыщения). Описанный эксперимент позволил описать весь возможный спектр насыщения почв, а схема на рисунке 2.2.2.2-1 может быть разделена на три основных этапа с прямыми аналогиями с реальными процессами перераспределения почвенной влаги в естественных условиях. Несмотря на то, что в природных условиях горизонты AU и $AUrz$ вряд ли могут подвергнуться всему диапазону насыщенных условий, для горизонтов EL , BT , AU и BCA такие стационарные изменения более или менее обычны

2.2.2.2 Лабораторные методы определения свойств почв.

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). Эти свойства, а также текстурные классы горизонтов (согласно WRB, 2022) приведены в таблице 2.2.2.3-1.

Таблица 2.2.2.3-1. 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), %	Текстурный класс		
Дерново-подзолистая почва	A _У (0—7 см)	15,90	76,30	7,80	Дерново-подзолистая почва	A _У (0—7 см)	15,90
	E _L (7—15 см)	8,90	85,40	5,70	Тонкий суглинок (silt)	E _L (7—15 см)	8,90
	B _T (15—65 см)	6,40	61,00	32,60	Пылевато-глинистый суглинок (silty clay loam)	B _T (15—65 см)	6,40
Чернозем	A _{U_{гз}} (0—25 см)	8,47	83,82	7,71	Чернозем	A _{U_{гз}} (0—25 см)	8,47
	A _U (25—70 см)	8,08	84,45	7,47	Тонкий суглинок (silt)	A _U (25—70 см)	8,08
	B _{CA} (70—100 см)	8,07	83,82	8,11	Тонкий суглинок (silt)	B _{CA} (70—100 см)	8,07

2.2.3 Расчетные методы исследования

2.2.3.1 Алгоритмы расчетных экспериментов

На рисунке 2.2.3-1 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 согласно схеме, описанной в параграфе 2.2.2.1.
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.
 - а. 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.
 - б. 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 сушке. 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.

б. Анализ результатов, формулирование выводов о применимости методов, сравнение структурных и гидрофизических параметров почв разного генезиса

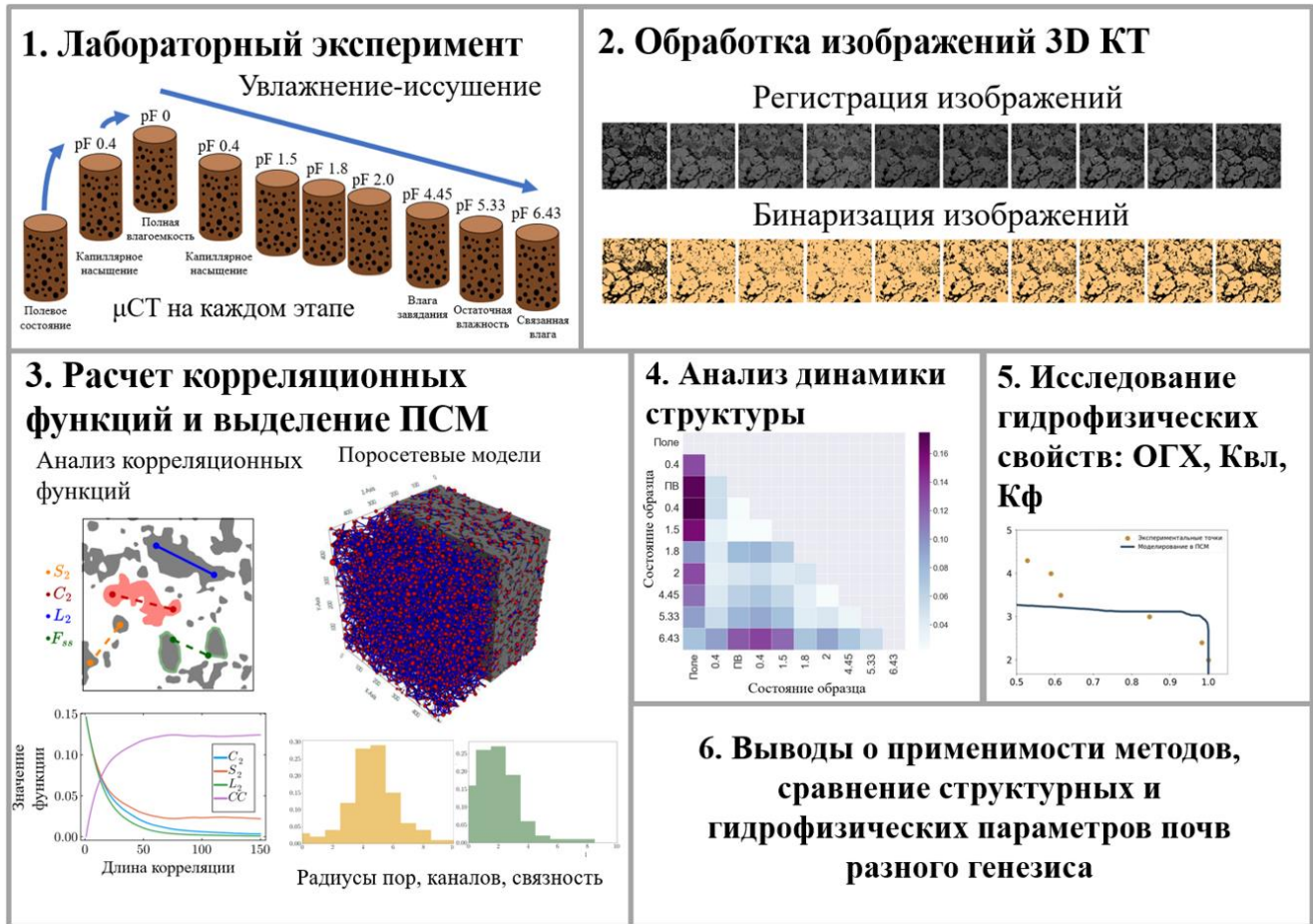


Рисунок 2.2.3-1. Схема алгоритма по оценке динамики структуры почвы при увлажнении-иссушении.

Компьютерная томография почв выполнялась на томографе SkyScan 1172 (Bruker, Бельгия) с ускоряющим напряжением 70 кВ, силой тока 130 мА, применением 0.5 мм алюминиевого фильтра и углом поворота 0.2 градуса. Образцы, подверженные увлажнению-иссушению, были сняты с разрешением 7.92 микрометра на пиксель; их выходной размер составил 2000x2000x1500 пикселей по осям X, Y и Z соответственно.

После компьютерной томографии образцов полученные изображения необходимо реконструировать. Реконструкция по обратным проекциям выполнялась с помощью программного обеспечения nRecon (Bruker) со

следующими параметрами: сглаживание (размытие по Гауссу) = 2, усиление пучка = 30%, гистограмма в оттенках серого от -500 до 3000 единиц Хаусенфилда, где -500 соответствует сигналу ниже сигнала воздуха вокруг образца.

Последующая обработка изображений состояла из трех этапов:

1. Регистрация – поиск одной и той же области интереса внутри разных 3D-изображений одного и того же образца;
2. Фильтрация – очистка изображения от шумов;
3. Бинаризация (сегментация) – разделение изображения на твердую фазу и поровое пространство.

Для изучения динамики структуры необходимо выбрать одну и ту же область интереса на каждом из изображений, то есть сопоставить области видимости внутри каждого из 3D изображений. По этой причине после реконструкции изображения были подвергнуты так называемому алгоритму регистрации — поиску аффинных преобразований (углов поворота и длин сдвига) вдоль соответствующих осей), выполнив которые можно получить одну и ту же область интереса значений серого для сопоставления ее с этим местом внутри исходного образца с фиксированной ориентацией. В качестве фиксированного изображения выбиралось полевое состояние образца. Для других состояний производился поиск трех углов поворота и трех сдвигов до тех пор, пока не наблюдалось частичное или полное совпадение объема со стационарными данными (фиксированными изображениями полевого/исходного состояния образца) согласно функции стоимости (поиск углов поворота осуществляется на основании алгоритма роя частиц, поиск сдвигов – на основании дискретного преобразования Фурье). Алгоритм регистрации подробно описан в (Furat et al., 2018) и успешно применяется в почвоведении (Tolstygin et al., 2026 (a, b)) Вкратце, алгоритм состоит из трех частей:

1. Регистрация 2D-представительного среза стационарных данных в регистрируемых данных;
2. Согласно значениям, полученным на предыдущем этапе, из

регистрируемого и стационарного образца вырезаются кубические области для регистрации 3D-данных;

3. Регистрация 3D-вырезанного куба регистрируемых данных в 3D-вырезанном кубе стационарных данных

Последующая обработка изображения включала фильтрацию и сегментацию (бинаризацию). Первый этап - фильтрация - необходим для очистки изображения от шума. Этот этап был выполнен с использованием метода нелокальных средних (Buades et al., 2011) Параметры фильтрации: радиус поиска = 10, количество итераций = 4.

Второй этап — сегментация — включает в себя разделение исходного изображения на фазы, в данном случае — на твердую фазу и поровое пространство. Зарегистрированные изображения были сегментированы методом наращивания регионов (Hashemi et al., 2014) с параметром rve -радиус = 2. Для корректной работы алгоритма важно выбрать соответствующие пороговые значения. По результатам регистрации изображений изначально были выбраны области с крупными зернами для корректировки этих пороговых значений. Анализируя сегментацию этих зерен и пор, окружающих их, пороги были дополнительно уточнены, чтобы обеспечить единообразную сегментацию изображения в различных состояниях образцов при промерзании-оттаивании и увлажнении-иссушении. Таким образом были достигнуты гораздо лучшие результаты сегментации, чем при простом ручном выборе порога.

После всех этапов обработки изображений, эти изображения могут быть использованы в компьютерном моделировании.

2.2.3.2 Расчет и анализ корреляционных функций

Для получения информации о морфологических изменениях в образцах при промерзании-оттаивании и увлажнении-иссушении были использованы направленные корреляционные функции. Под корреляционной функцией подразумевается некоторая вероятностная характеристика, определяющая взаимосвязь между вероятностью некоторого события (к примеру, попадания

отрезка фиксированной длины в поровое пространство), с длиной этого отрезка (такую длину в литературе обычно называют «длиной корреляции»). Такие функции считаются по всем ортогональным направлениям X , Y , Z , что позволяет оценить анизотропию образца. Выбор этого метода обоснован тем, что корреляционные функции являются известным дескриптором структуры гетерогенных материалов (Torquato, 2012) и успешно используются для описания различных природных и искусственных пористых сред (Gerke et al., 2014; Gerke, Karsanina, 2015; Chen et al., 2015, 2019). Кроме того, их применимость для описания структуры и порового пространства почв также была неоднократно подтверждена. (Gerke, Karsanina, Skvorsova, 2012; Karsanina et al., 2015, 2021; Tolstygin et al., 2026 (a, b)).

Для описания структуры порового пространства образцов использовались следующие корреляционные функции: двухточечная функция $S_2(r)$, линейная функция $L_2(r)$, кластерная функция $C_2(r)$ и функция поверхность-поверхность $F_{ss}(r)$. Каждая из этих функций представляет вероятность наступления некоторого события и изменяется от нуля до единицы на длине корреляции (обычно равной половине длины направления, в котором вычисляется функция). В частности, функция $S_2(r)$, обозначает вероятность того, что оба конца сегмента длины r попадут в одну и ту же фазу, функция $L_2(r)$, обозначает вероятность того, что весь сегмент длины r попадет в одну и ту же фазу, функция $C_2(r)$, измеряет вероятность того, что концы сегмента находятся в одном и том же фазовом кластере и, наконец, функция $F_{ss}(r)$ подразумевает вероятность того, что концы сегмента попадут на границу между исследуемыми фазами (твердая фаза/поровое пространство) (Samarin et al., 2023, Postnicov et al., 2023). На рисунке 2.2.3.3-1 приведено схематичное объяснение принципа метода корреляционных функций.

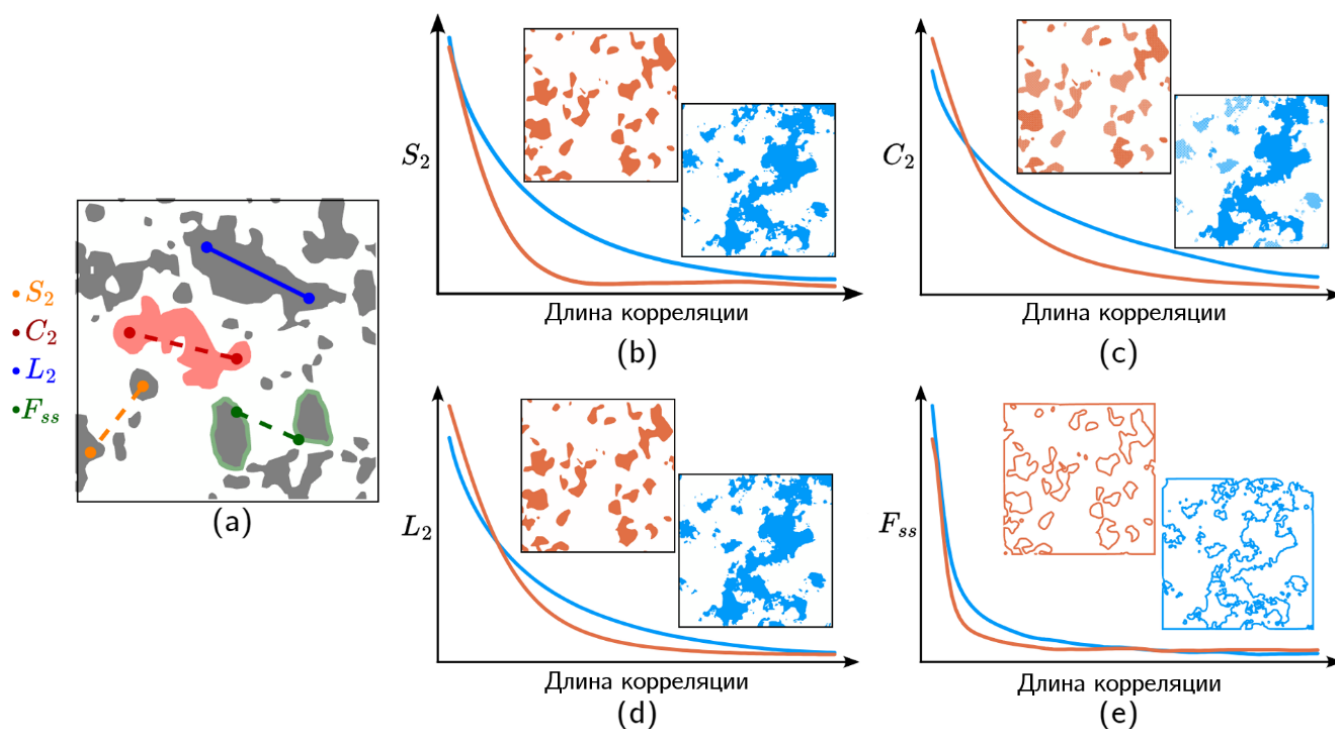


Рисунок 2.2.3.3-1. Схематичное объяснение принципа работы метода корреляционных функций. Здесь (a) – графическое представление четырех использованных в работе корреляционных функций, (b-e) – синтетический пример, поясняющий принцип работы функций. Видно, как в образцах с разной структурой порового пространства функции ведут себя по-разному. Анализ поведения наборов кривых корреляционных функций таким образом позволяет делать выводы о различиях в морфологии порового пространства образцов.

Несмотря на то, что дискуссии о необходимом и достаточном для детального описания структуры порового пространства наборе корреляционных функций еще ведутся (Karsanina et al., 2015), некоторые исследования постулируют, что набор из 4 функций $S_2(r)$, $L_2(r)$, $C_2(r)$, $F_{ss}(r)$ достаточен для такого описания (Jiao, Stillinger, Torquato, 2009).

Все корреляционные функции были рассчитаны вдоль трех ортогональных направлений X , Y и Z для порового пространства с использованием библиотеки с открытым исходным кодом *CorrelationFunctions.jl* (Postnikov et al., 2024) на личном компьютере автора.

2.2.3.3 Извлечение поросетевых моделей и моделирование однофазной и двухфазной проницаемостей¹

Моделирование гидрофизических свойств непосредственно в томографических изображениях почв и других пористых сред – очень ресурсоемкая задача. Для решения этой проблемы был предложен ряд подходов, наиболее распространенный из которых – применение поросетевых моделей. Поросетевые модели пористых сред (ПСМ) – это представление порового пространства пористого тела в виде связного графа (то есть множества вершин и связей – «ребер» – между этими вершинами), где вершины графа представляют собой поры, а ребра графа – каналы, связывающие эти поры (Fatt, 1956). Поросетевые модели позволяют не только моделировать гидрофизические свойства, но и исследовать морфологические и топологические особенности структуры порового пространства, поскольку де-факто являются ее прямым отображением. Долгое время метод поросетевых моделей был не очень точным, поскольку при извлечении такой модели из воксельного представления порового пространства в томографическом изображении часто некорректно интерпретировались топология и геометрия порового пространства. В недавнее время эта проблема была разрешена, поскольку появился метод извлечения поросетевых моделей, основанный на дискретной теории Морса, позволяющий сохранять геометрию и топологию порового пространства (Zubov et al., 2022). Этот метод был применен в работе; рабочий код, используемый для извлечения, был написан на языке программирования C++ и развернут на личном компьютере автора.

Для извлечения модели для каждого образца в каждом из состояний промерзания-оттаивания и увлажнения-иссушения были использованы 3D-изображения размером 1400x1400x1400. При извлечении модели сложные формы пор упрощаются до элементарных геометрических фигур: прямоугольника, круга

¹ Методика, описанная в данном параграфе, опубликована в научной статье автора 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)).

или треугольника – такое упрощение производится на основании факторы формы пор.

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 устойчивости 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 (Толстыгин и др., 2025). После извлечения модель сохраняется в виде ненаправленного графа в формате “statoil” с сохранением всей геометрической информации. Факторы формы для каждой поры также сохраняются. Подробная информация о работе этого формата приведена в работе (Gerke et al., 2020).

После извлечения поросетевой модели, можно приступить к моделированию однофазного и двухфазного течений. Базой такого моделирования служит уравнение Хагена-Пуазёйля для расчета гидравлической проводимости между двумя порами (2.1):

$$q = \frac{g_{el}}{L_{el}} \Delta p \quad (2.1)$$

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

В качестве закона сохранения используется уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости (2.2):

$$\sum_j q_{ij} = 0 \quad (2.2)$$

где мы суммируем потоки по j -ым каналам, связывающим i -ые поры. Расчет гидравлической проводимости для любого двумерного поперечного сечения (или менисков жидкости для многофазного потока) g основан на безразмерной модели проводимости (Patzek, Kristensen, 2001) (2.3):

$$g = \frac{A^2 \tilde{g}}{\mu_f} \quad (2.3)$$

где A - площадь поперечного сечения, \tilde{g} - безразмерная гидравлическая проводимость по модели «круг-треугольник-квадрат» (Patzek, Kristensen, 2001), а μ_f - вязкость жидкости.

В модели «круг-треугольник-квадрат» безразмерная гидравлическая проводимость пор и каналов g ($g_{пора1}$, $g_{пора2}$ и $g_{канал}$) аппроксимируется на основе фактора формы G . Такая аппроксимация очень надежна, поскольку она основана на полуаналитическом решении для этих трех простых форм (Patzek, Kristensen, 2001) (2.4):

$$\begin{cases} 0.6G \text{ если } 0 \leq G \leq \frac{\sqrt{3}}{36} : \text{треугольник} \\ 0.5623G \text{ если } \frac{\sqrt{3}}{36} \leq G \leq \frac{1}{16} : \text{квадрат} \\ 0.5G \text{ если } \frac{1}{16} \leq G \leq \frac{\sqrt{1}}{4\pi} : \text{круг} \end{cases} \quad (2.4)$$

Фактор формы G определяется из локальных геометрий пор/каналов во время извлечения поросетевой модели. Для каналов он определяется как (Ma, Mason, Morrow, 1996) (2.5):

$$G_{\text{канал}} = \frac{A}{P^2} \quad (2.5)$$

где площадь поперечного сечения канала A и периметр канала P определяются на основании пересечений пор. Фактор формы для пор определяется сходным образом (Dong, Blunt, 2009) (2.6):

$$G_{\text{пора}} = \frac{VL_V}{A_V^2} \quad (2.6)$$

где V – объем поры, L_V – удвоенное расстояние между центром поры и ее наиболее удаленным вокселем, A_V – площадь поверхности поры. Площадь поверхности и объем оцениваются путем подсчета количества вокселей и «состоянием» соседних с ними вокселей (то есть их нахождением в твердой фазе либо в поровом пространстве). Работоспособность этого простого метода очень зависит от разрешения исходных 3D-изображений компьютерной томографии (Samarin et al., 2023). Гидравлические характеристики элементов поросетевой модели определяются по формуле (2.7) (Sholokhova, Kim, Lindquist, 2009):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_{\text{элемент}}}{g_{\text{элемент}}} = \frac{wl_{\text{пора1-пора2}}}{g_{\text{канал}}} - (1+w) \left(\frac{l_{\text{пора1}} - l_{\text{канал}}}{g_{\text{пора1}}} - \frac{l_{\text{пора2}} - l_{\text{канал}}}{g_{\text{пора2}}} \right) \\ l_{\text{пора1-пора2}} = l_{\text{пора1-канал}} + l_{\text{пора2-канал}} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

После того, как все топологические и геометрические свойства порового пространства установлены, путем решения системы линейных уравнений, полученных из уравнений непрерывности (2) и импульса, то есть потока с использованием уравнения Хагена-Пуазейля (1) для каждой поры вычисляется абсолютная проницаемость (коэффициент фильтрации). Задавая давление на входе и выходе, мы можем сначала установить давление в каждой поре, а затем вычислить 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, может ли происходить вытеснение поршневого типа (широко известного в зарубежной литературе как *piston-type displacement*) при увеличении капиллярного давления, и воздух сначала проникает в самую большую пору. 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, Masson, Morrow, 1996). Затем давление входа воздуха вычисляется как (2.8) (Øren, Bakke, Arntzen, 1998):

$$\begin{cases} P_{\text{entry}} = \frac{\sigma \cos \gamma_{\text{res}} (1 + 2\sqrt{\pi G})}{r} F_d(\gamma_{\text{res}}, G), \\ F_d(\theta_{\text{res}}, G) = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4GD}{\cos^2 \theta_r}}}{(1 + 2\sqrt{\pi G})} \end{cases} \quad (2.8)$$

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, Masson, Morrow, 1996), r — радиус поры или канала, G — фактор формы. После входа воздуха в поровое пространство, локальные положения менисков можно вычислить в соответствии с P_{entry} . Если геометрия менисков в поперечном 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 образца, однако в данной работе такое моделирование не осуществлялось, и потому его подробное описание не приводится (Толстыгин и др, 2025).

После определения положений менисков на каждом шаге капиллярного давления мы вычисляем водонасыщенность в системе и относительные проводимости воды и воздуха по уравнениям (1) и (2), что позволяет нам получить ненасыщенную гидравлическую (коэффициент влагопроводности) 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 (Толстыгин и др, 2025).

Помимо использования поросетевой модели для исследования гидрофизических свойств почвы, она так же может быть применена для количественного анализа порового пространства. Используя извлеченные поросетевые модели, были оценены общее количество пор и каналов, а также связность – среднее число 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, что позволяет делать выводы о изменении физических свойств порового пространства. На рисунке 2.2.3.4-1 приведен пример поросетевой модели для одного из образцов чернозема, исследованных в этой работе, а также примеры полученных из нее статистик: радиусов пор, каналов и связности. Поросетевая модель приведена в формате «шаров и цилиндров», что является довольно удобным при её визуализации, но стоит заметить, что такой формат используется только для красоты отображения. В реальности же для последующих расчетов сохраняются все факторы формы пор. Все визуализации поросетевых моделей были созданы с использованием открытой библиотеки `vtk` (Толстыгин и др, 2025).

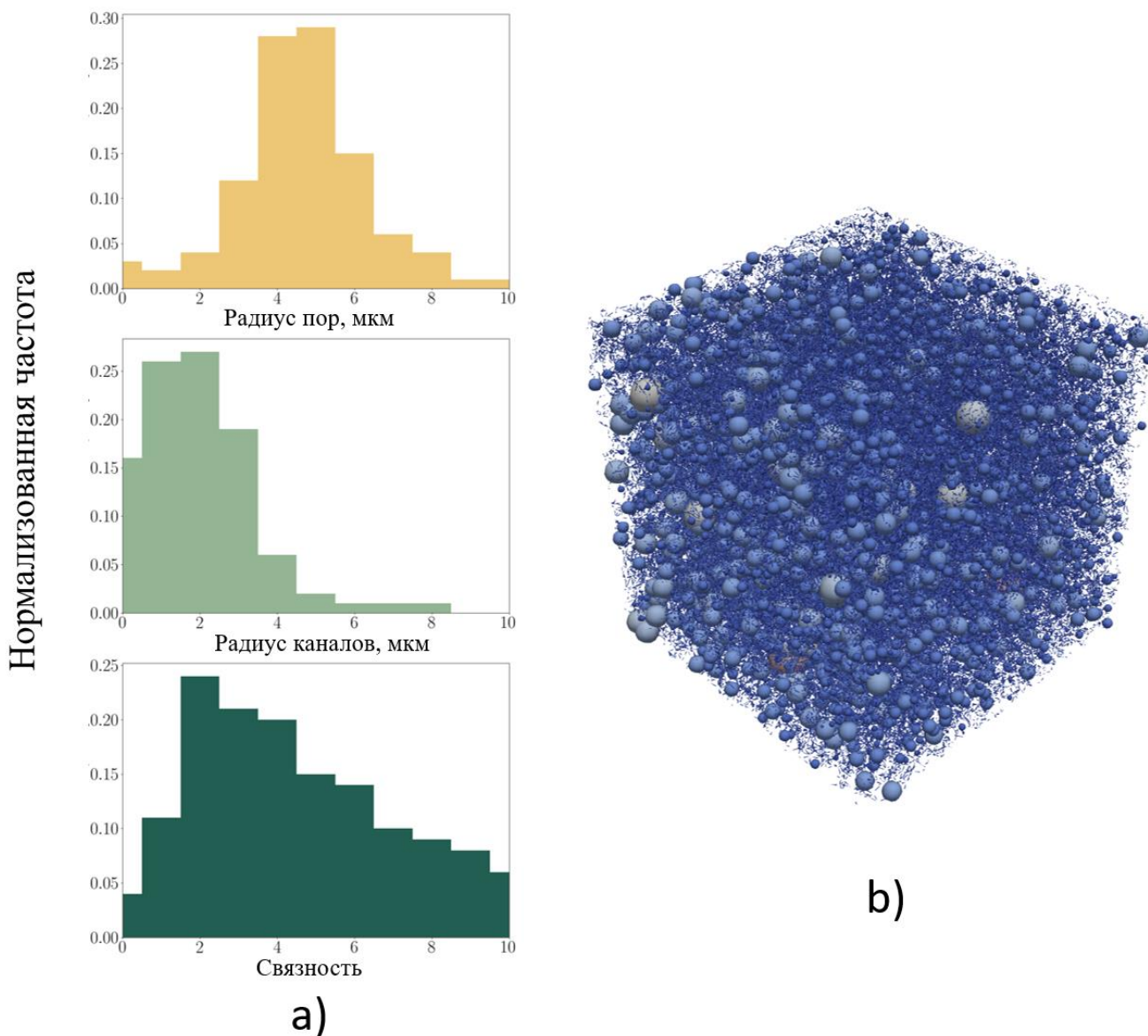


Рисунок 2.2.3.4-1. Пример расчета статистик поросетевой модели. Здесь (а) использованные в работе параметры поросетевой модели: радиусы пор, радиусы каналов и связность, (б) пример извлеченной поросетевой модели в виде диаграммы «шаров и цилиндров».

2.2.3.4 Векторизация структурных параметров, попарное сравнение образцов

Анализ отдельных корреляционных функций и статистик поросетевых моделей – нетривиальная задача. Как уже было упомянуто, они гораздо менее интуитивны, чем классические метрики (например, пористость). Но при этом они обладают большей информативностью и лучше подходят для описания структуры почвы. При небольшом количестве анализируемого материала задача довольно

проста. Однако при большем количестве образцов анализ значительно затрудняется. Для корректного сравнения результатов, полученных расчетом корреляционных функций и статистик поросетевых моделей, необходимо добиться единообразия этих результатов и их представления, для чего использовалась векторизация.

Пусть некоторые из используемых структурных параметров D_i , определенных для i -го состояния увлажнения-иссушения образца почвы, векторизованы в вектор V_i на основе одномерной гистограммы с числом бинов $N(i)$, размером бина $s(i)$, диапазоном $r(i)$ и значениями $a_i(k)$ k -го бина. Тогда такую гистограмму можно рассматривать как вектор $V_i = (a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(N(i)))$ (Zubov et al., 2024). Далее фиксируется размер бина для образца почвы в каждом состоянии для их корректного сравнения. После выполнения определенных процедур векторизации для каждой метрики мы можем вычислить евклидово расстояние между векторами (2.10):

$$d = \left\| V_i - V_j \right\| \quad (2.9)$$

где d – евклидово расстояние между векторами, V_i, V_j – векторизованная метрика для i, j состояния образца.

Таким образом мы можем посчитать попарные расстояния между всеми состояниями увлажнения-иссушения каждого образца. Удобно представлять такой набор данных в виде так называемой «карты расстояний», где обе оси соответствуют состояниям образца, на пересечении находится расстояние от одного состояния до другого, а по диагонали фактически находится расстояние по ряду увлажнения-иссушения. На рисунке приведен пример такой тепловой карты с соответствующими пояснениями.

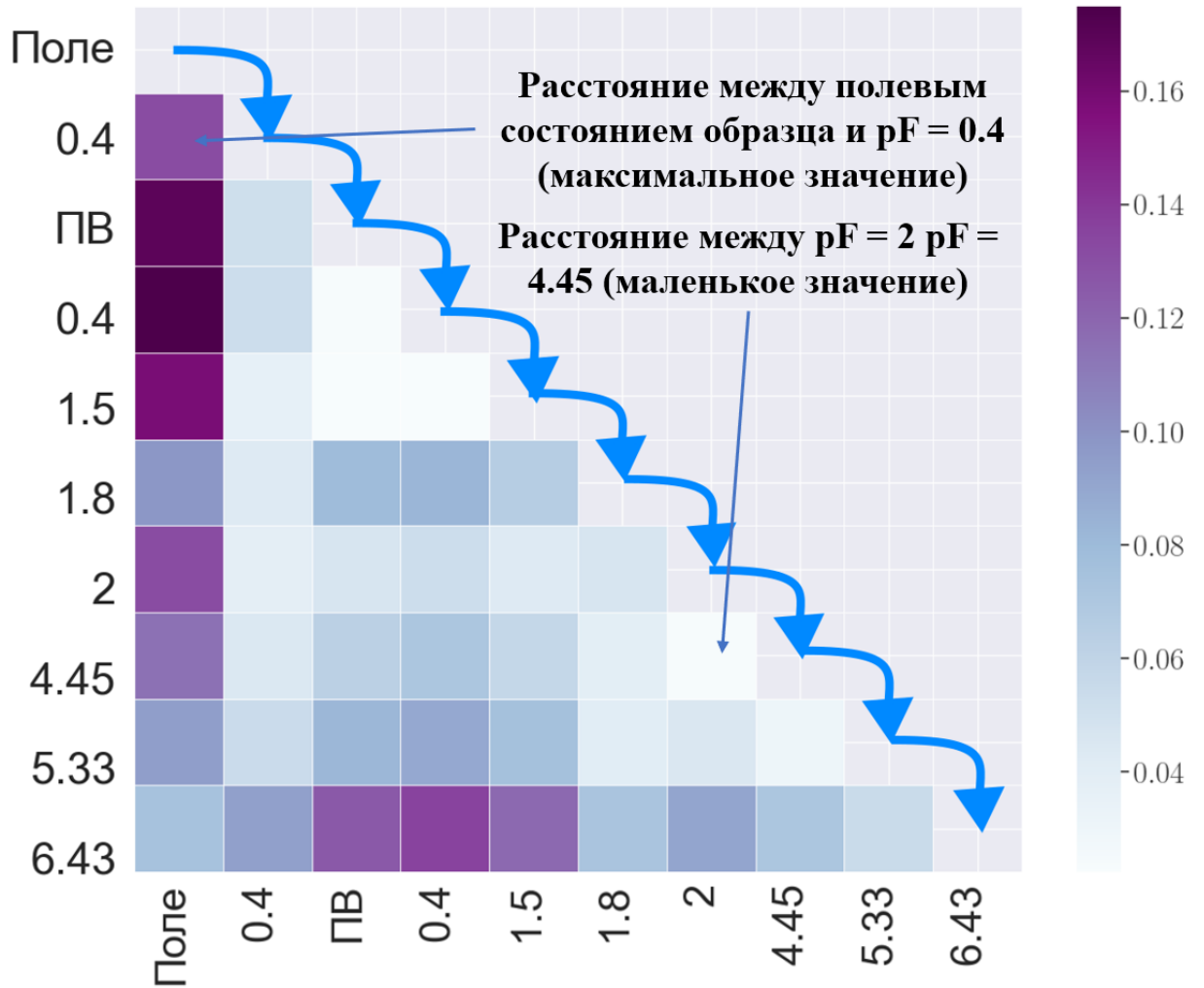


Рисунок 2.2.3.5-1. Пример карты расстояний, показывающий попарные расстояния для одного образца по одной структурной метрике. Оси X и Y представляют разные состояния, каждый квадрат на графике соответствует цветовому представлению расстояния между двумя состояниями, справа представлена цветовая карта для расшифровки расстояния.

2.2.3.5 Аппроксимация основной гидрофизической характеристики по уравнению ван Генухтена и расчет коэффициента влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема

Для получения функций влагопроводности, экспериментальные точки были аппроксимированы уравнением ван Генухтена (2.10):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha * P)^n} \right)^{1-1/n} \quad (2.10)$$

где S_e – 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_s , α и n были использованы для получения коэффициентов влагопроводности по уравнению ван Генухтена-Муалема (2.11)

$$K_{вл} = K_{\phi} * S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.11)$$

где $K_{вл}$ – 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 S_e , полученные из уравнения ван Генухтена были нормализованы на пористость почвы с целью получить значения относительной влагонасыщенности. Значения $K_{вл}$ были нормализованы на значения K_{ϕ} с целью получить относительную ненасыщенную гидравлическую проводимость. В таких координатах приведены графики относительных проводимостей в разделе 3.3 настоящей работы.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ²

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

3.1.1 Визуальный анализ

Во всех образцах из всех шести исследованных горизонтов наблюдалась значительная динамика структуры порового пространства почвы при увлажнении-иссушении. Используя метод регистрации, удалось выделить один и тот же регион интереса на всех изображениях и точно проследить эту динамику. На рисунках с 3.1-1 по 3.1-6 показаны двумерные срезы с одним и той же регионом интереса для всех образцов в разных состояниях (следует отметить, что весь последующий анализ проводился на трёхмерных изображениях).

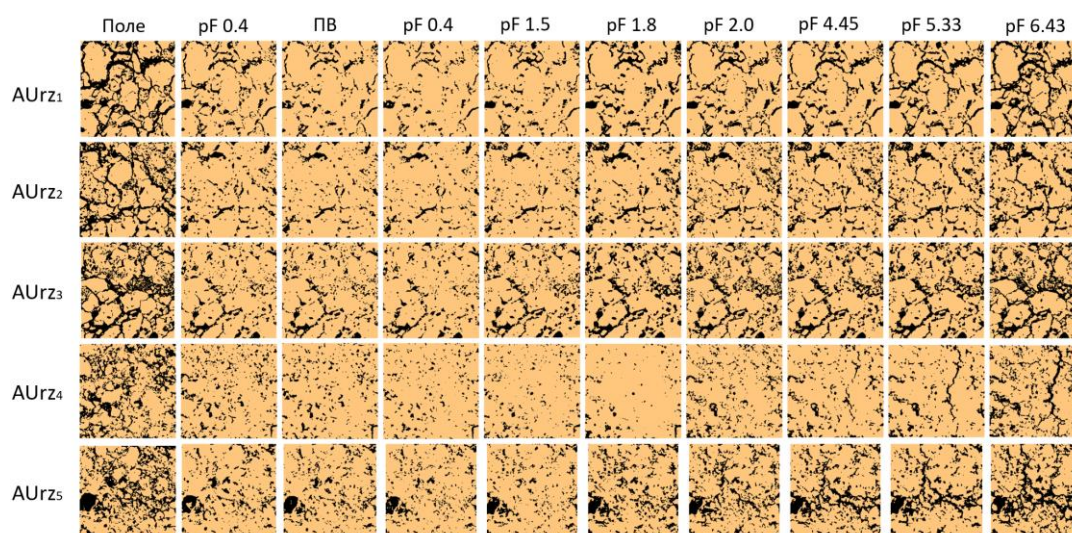


Рисунок 3.1-1. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта AU_{rz} . Построчно представлены пять повторностей от AU_{rz1} до AU_{rz5} , по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения.

² Результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в следующих научных статьях автора:

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)).
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. – Т. 255. – С. 106790. EDN: UGZQKO (Импакт-фактор 6,63 (JIF)).
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. – Т. 256. – С. 106895. EDN: TDKPGT (Импакт-фактор 6,63 (JIF)).

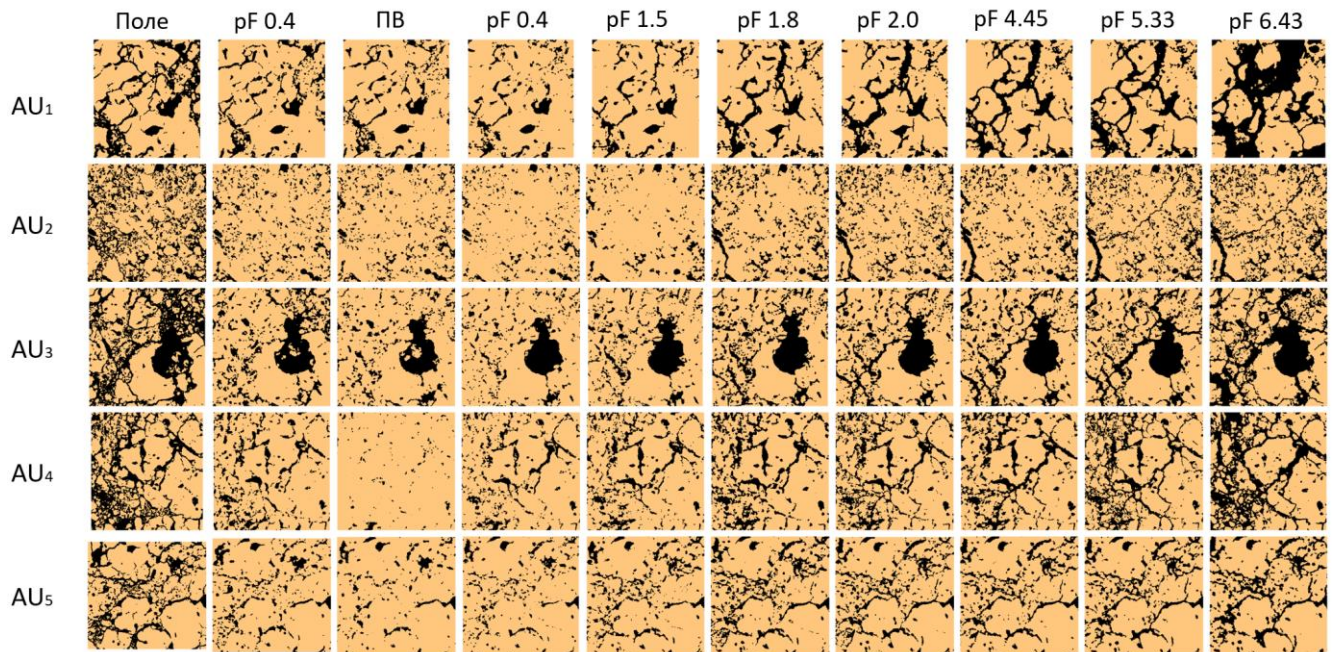


Рисунок 3.1-2. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта AU. Построчно представлены пять повторностей от AU₁ до AU₅, по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения

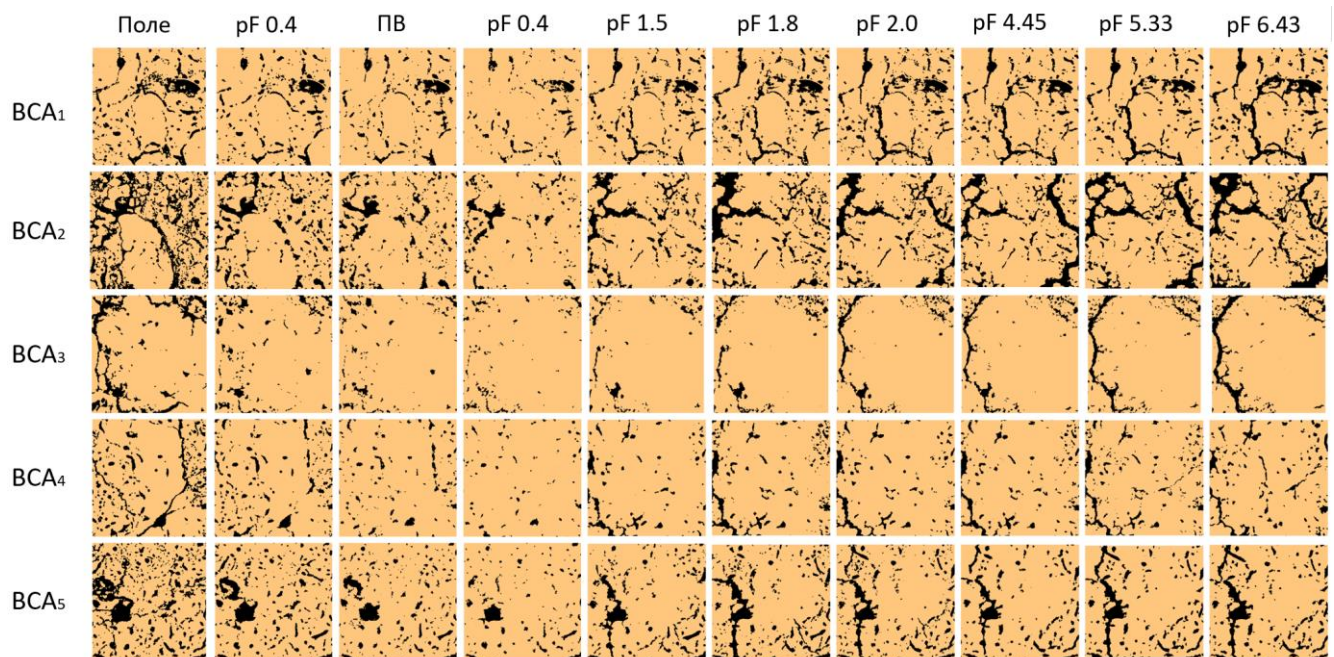


Рисунок 3.1-3. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта ВСА. Построчно представлены пять повторностей от BCA₁ до BCA₅, по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения

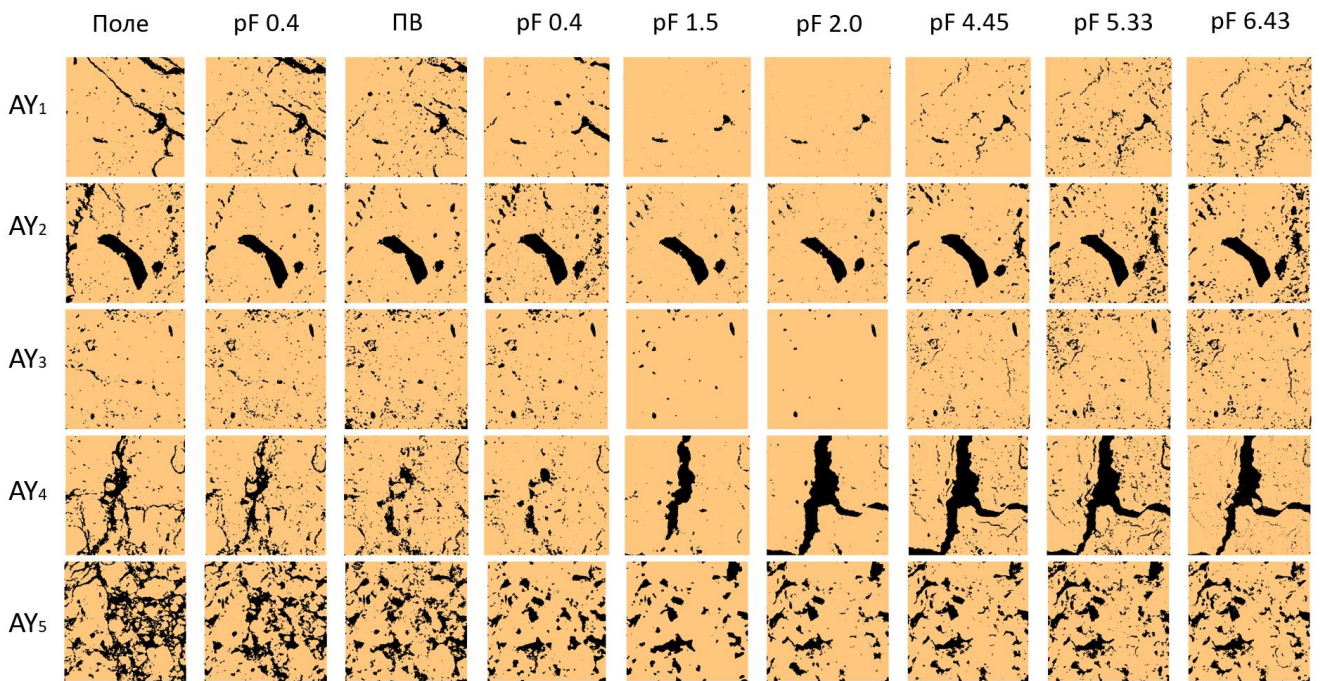


Рисунок 3.1-4. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта АУ. Построчно представлены пять повторностей от АУ₁ до АУ₅, по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения

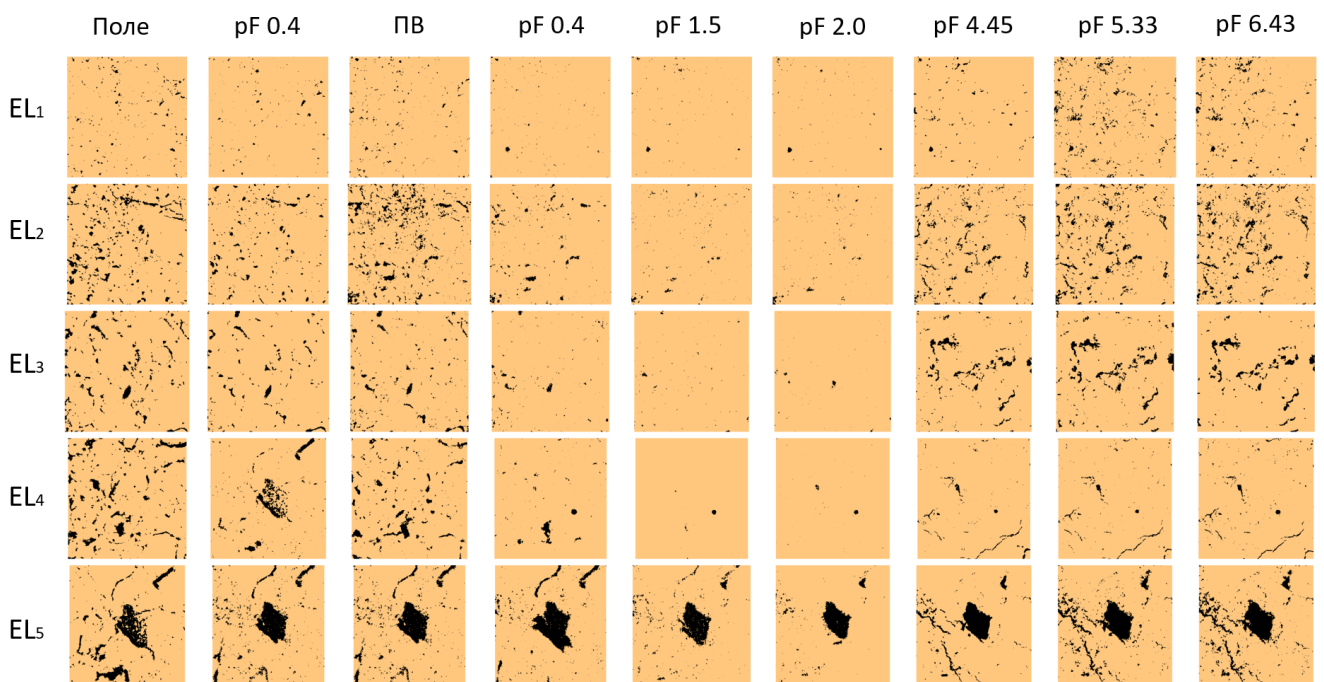


Рисунок 3.1-5. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта EL. Построчно представлены пять повторностей от EL₁ до EL₅, по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения

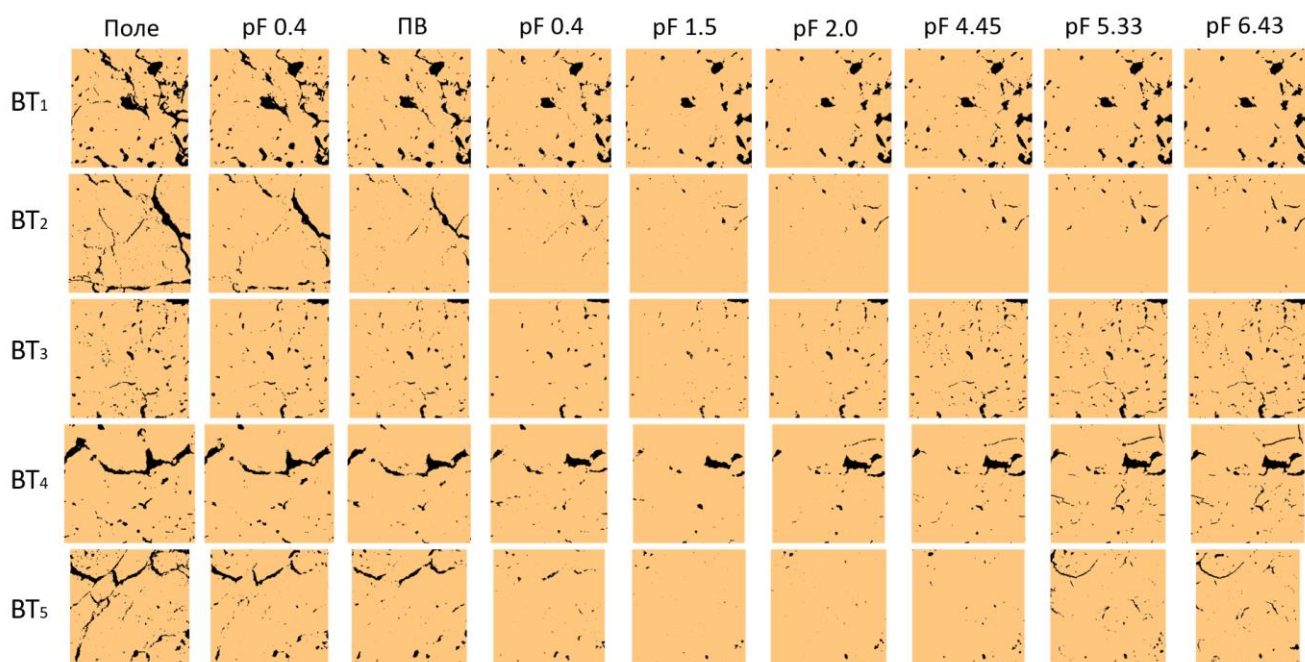


Рисунок 3.1-6. Один и тот же регион интереса в бинаризованных двумерных срезах пяти различных образцов из горизонта ВТ. Построчно представлены пять повторностей от ВТ₁ до ВТ₅, по столбцам представлено изменение состояния увлажнения-иссушения

Используя рисунки с 3.1-1 по 3.1-6 можно выделить ключевые закономерности в динамике структуры порового пространства при увлажнении-иссушении:

1. Капиллярное насыщение существенно влияет на поровое пространство: отчетливо видно набухание отдельных агрегатов, общее уменьшение объема порового пространства и слипание отдельных агрегатов в один;
2. По мере иссушения наблюдается обратный процесс: усадка агрегатов, расширение порового пространства и расслоение агрегатов с образованием трещин;
3. Примечательно, что большинство образцов чернозема в наиболее сухом состоянии близки к образцам в исходном полевом состоянии. Эта особенность хорошо заметна в образцах из горизонта АU_{гз}, немного меньше в образцах из горизонта АU и значительно меньше в образцах из горизонта ВСА. В образцах же дерново-подзолистой почвы такого не наблюдается вообще; только в некоторых образцах из горизонта АУ.
4. В образцах из горизонтов ЕL и ВТ дерново-подзолистой почвы при сушке наблюдается задержка усадки образцов. Только при «досушивании»

образцов начиная с $rF=4.45$ наблюдается растрескивание и образование нового порового пространства.

Основное различие в свойствах исследуемых горизонтов заключается в меньшем количестве органического вещества в горизонтах ВСА, EL и BT по сравнению с АУ и особенно АUrz и АU. Таким образом, в данной работе в очередной раз подтверждается связь между содержанием органического вещества в почве и устойчивостью её структуры. Хотя эти выводы уже хорошо известны, до сих пор попытки численно проанализировать эту закономерность практически не предпринимались, а те, что были (например, Fomin et al., 2023), использовали классические метрики структуры порового пространства (разные виды пористости) и не смогли добиться большого успеха. В этой работе для решения этой задачи были использованы корреляционные функции и поросетевые модели.

3.1.2 Анализ морфологических изменений посредством корреляционных функций

Ввиду чрезмерной сложности проведения прямого сравнительного анализа графиков корреляционных функций и параметров поросетевых моделей для исследованного количества образцов, для анализа морфологических изменений были построены карты расстояний, на которых отображены расстояния между разными состояниями образца для каждого из исследованных образцов по каждой из корреляционных функций. На рисунках с 3.2-1 по 3.2-7 представлены такие тепловые карты для средних значений по пяти повторностям для образцов АU_{rz}, АU, ВСА, АУ, EL и BT.

Горизонт АUrz

В образцах из горизонтов АU_{rz} функции S_2 и C_2 показывают идентичные закономерности в расстояниях между различными состояниями образца (рисунок 3.2-1). Это, в свою очередь, означает, что образцы горизонта АU_{rz} всегда сохраняли единый кластер пор на 3D-изображениях в ходе увлажнения-иссушения. Как показывает функция F_{ss} , степень изменения нерегулярности интерфейса пора-

твердое фаза сильно коррелировала с общими структурными особенностями и связностью, определяемой S_2 и C_2 . Аналогичное происходило и для функции L_2 . Эти наблюдения позволяют предположить предполагают, что все морфологические характеристики порового пространство (форма, кривизна, связность) изменяются одинаково для этого горизонта. Важно отметить выраженную разницу между первым этапом иссушения ($pF = 0.4$) и полевым состоянием. Хотя само изменение условий не оказывает существенного влияния на структуру (разница между $pF = 0.4$ и $pF = 1.5$, а также между $pF = 1.5$ и $pF = 1.8$ очень мала по всем корреляционным функциям), именно второй этап иссушения наиболее существенно отдаляет структуру от исходного полевого состояния, а последующие этапы иссушения возвращают почву в исходное состояние. Поскольку полевые условия были близки к $pF = 1.8$, то при сравнении разницы между полевыми условиями и условиями с той же степенью насыщения после сушки до $pF = 1.8$, выяснится, что разница не так уже велика. Таким образом можно говорить о наблюдаемом в цикле увлажнения-иссушения гистерезиса, который тем не менее нельзя отследить полноценно, поскольку в лабораторном эксперименте не хватает данных для всех этапов увлажнения.

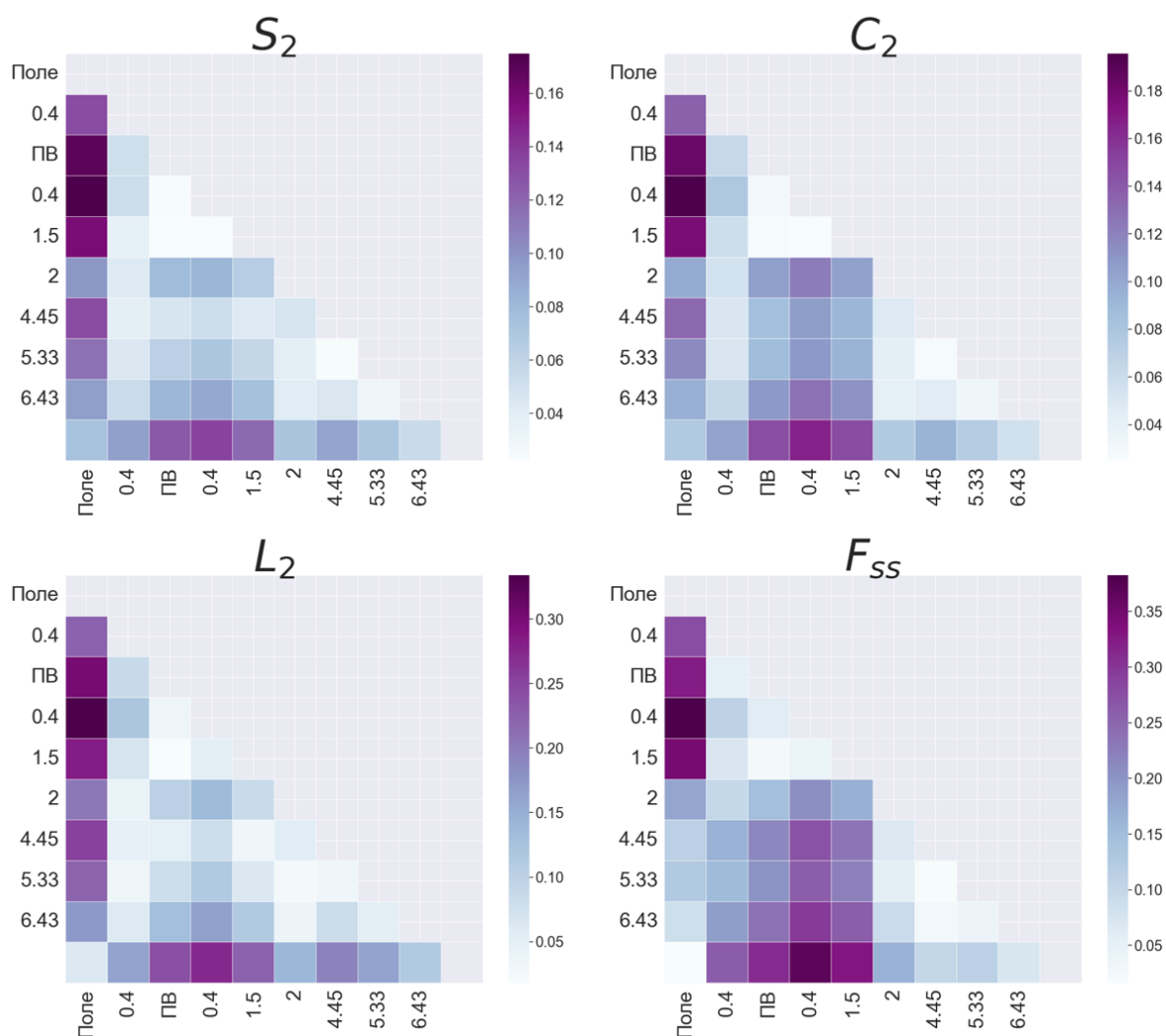


Рисунок 3.1.2-1. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте AU_{tz}

Горизонт AU

Корреляционные функции в горизонте AU (рисунок 3.2-2) несколько отличаются от образца AU_{tz} . Можно заметить, что функции S_2 и C_2 показывают схожее поведение, которое совпадает с поведением AU_{tz} (рисунок 3.2-1). Однако само их поведение отличается – мы не видим такого большого расстояния между полевым и насыщенным состояниями: изменения происходят постепенно. Только последний этап сушки ($rF = 6.43$) вносит наиболее значительный вклад в реструктуризацию порового пространства – разница между этим состоянием и другими наибольшая. Однако величина изменения между $rF = 5.33$ и 6.43 аналогична максимальной между rF в полевом состоянии и 0.4 . Это наблюдение

дополнительно подтверждается поведением функции L_2 – согласно тепловой карте, состояние $rF = 6.43$ принципиально отличается от других. Морфология границы поры-твердая фаза, описываемая функций F_{ss} , демонстрирует ту же тенденцию, что и для горизонта AU_{rz} .

В общем и целом, можно прийти к выводу, что динамика морфологических особенностей в горизонте AU существенно отличается от такой динамики в горизонте AU_{rz} . Большинство корреляционных функций подчеркивают разницу между самым сухим состоянием и всеми остальными. Наибольшие изменения наблюдаются между полевым состоянием и $rF = 0.4$ при увлажнении и на последнем шаге иссушения: скачок в расстояниях между rF 5.33 и 6.43 характерен только для этого горизонта. Разница между $rF = 1.8$ и полевым состоянием также значительна, что наблюдалось и в предыдущем горизонте.

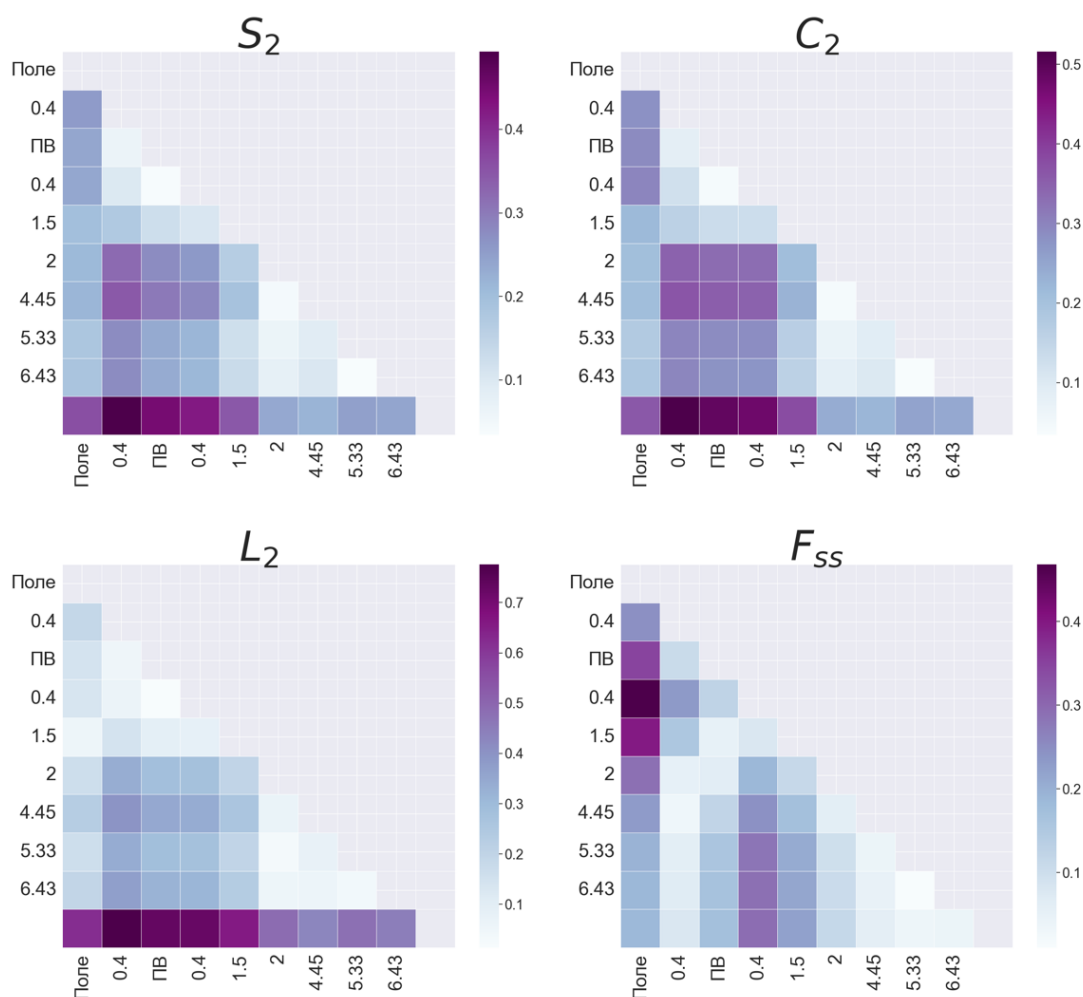


Рисунок 3.1.2-2. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте AU

Горизонт ВСА

Образцы из горизонта ВСА (рисунок 3.2-3) демонстрируют существенные отличия от образцов из горизонтов AU_{tz} и AU . Расстояния по функциям S_2 и C_2 перестают быть схожими, что говорит о том, что в процессе увлажнения-иссушения структура претерпевает значительные изменения с точки зрения связности порового пространства. Кроме того, функция S_2 при $rF = 6.43$ сильно отличается от полевого состояния, в то время как расстояние по функции C_2 является наибольшим при иссушении при $rF = 0.4$. Также бросается в глаза сильное различие между состоянием $rF = 0.4$ и остальными; можно заметить, что различия увеличиваются от исходного состояния до $rF = 0.4$, а затем начинают уменьшаться до $rF = 6.43$. То есть, при сушке при $rF = 0.4$ структура отличается от полевого состояния наиболее существенно. Что касается границы раздела поры-твердая фаза, основные различия наблюдаются при первом шаге увлажнения и сушке от rF от 1.5 до 1.8.

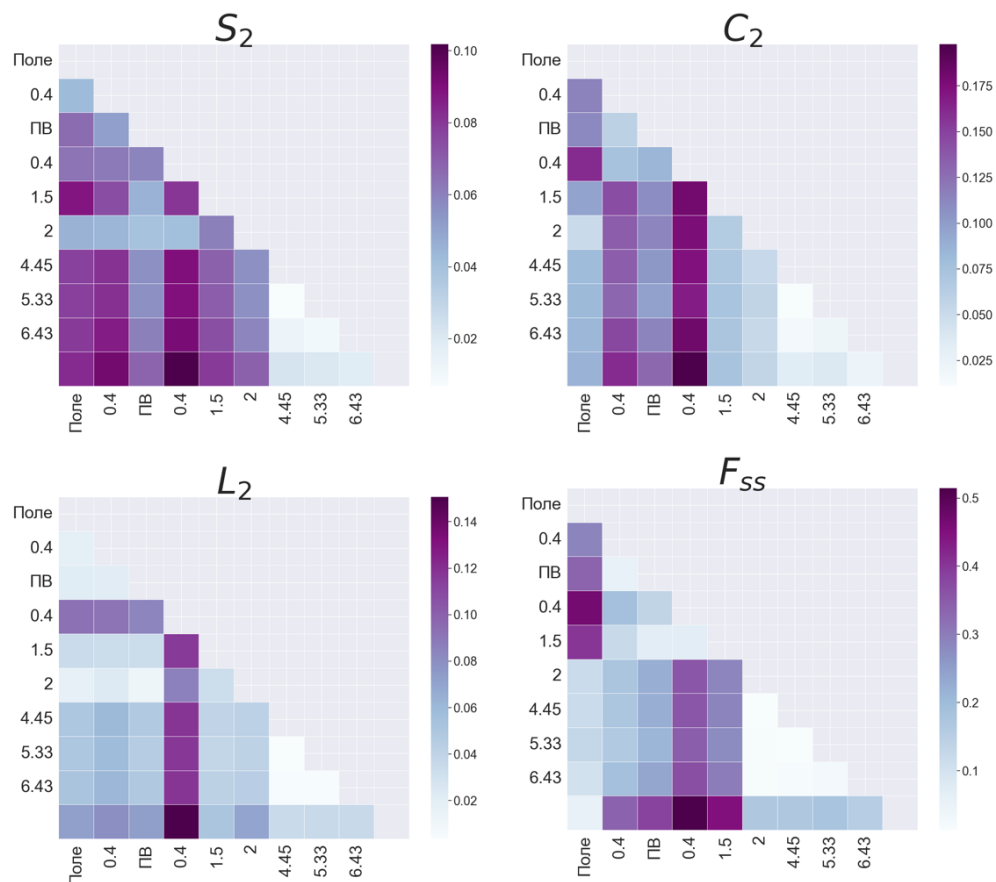


Рисунок 3.1.2-3. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте ВСА

Горизонт АУ

В образцах из горизонта АУ (Рисунок 3.2-4) наблюдается довольно занимательная картина. Во-первых, функции S_2 и S_2 аналогично схожи друг с другом, то есть поровое пространство находится в одном кластере. Но при этом полевое состояние не похоже на последний шаг иссушения нигде, за исключением функции L_2 . Таким образом выходит, что, несмотря на наличие органического вещества, цикл увлажнения-иссушения коренным образом меняет структуру порового пространства, оставляя в примерно исходном состоянии лишь микропористость (о чем, собственно, свидетельствуют расстояния по функции L_2). Если в образцах чернозема было видно четкую корреляцию между содержанием органического углерода и возвращением структуры в исходное состояние, то здесь такого не наблюдается. Причиной тому может служить гранулометрический состав. Необходимо обратиться к анализу следующих горизонтов, в особенности – текстурного горизонта ВТ, куда происходит перенос глинистых частиц.

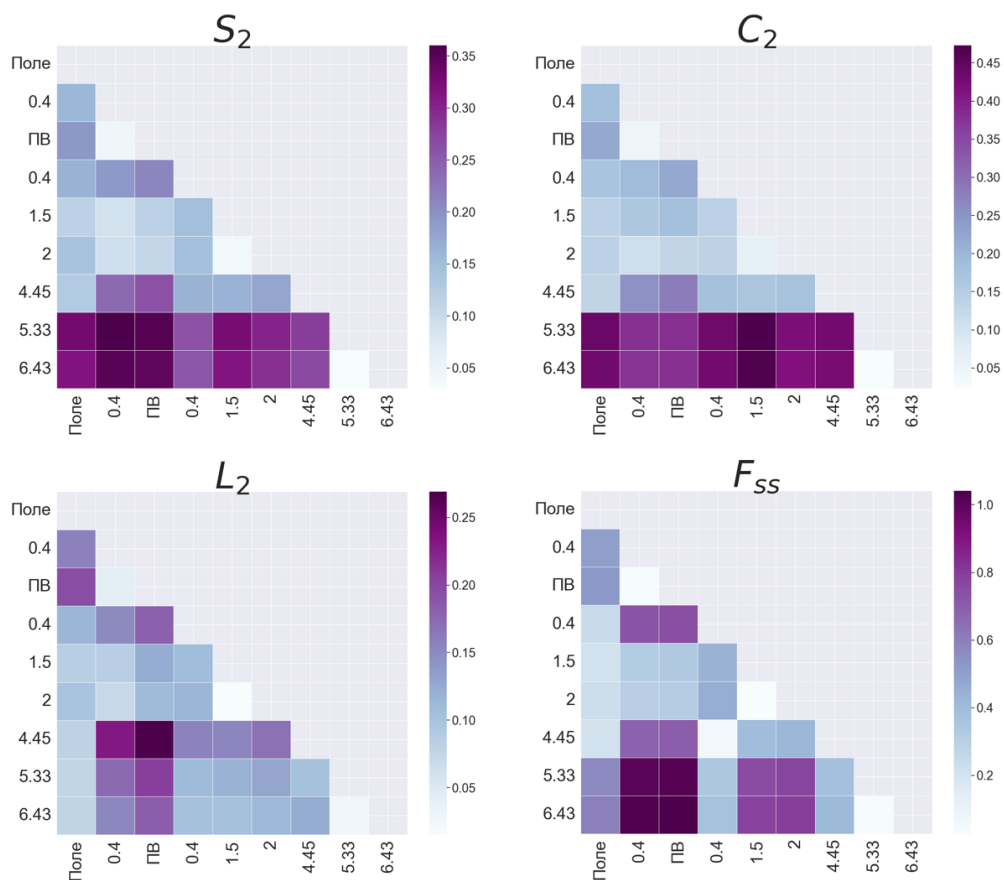


Рисунок 3.1.2-4. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте АУ

Горизонт EL

В горизонте EL (Рисунок 3.2-5) наблюдается аналогичная горизонту АУ картина. В следствие того, что из горизонта происходит вымывание глинистых частиц и органического вещества, в нем не наблюдается возвращения к исходной структуре, а функции C_2 и S_2 теряют схожесть.

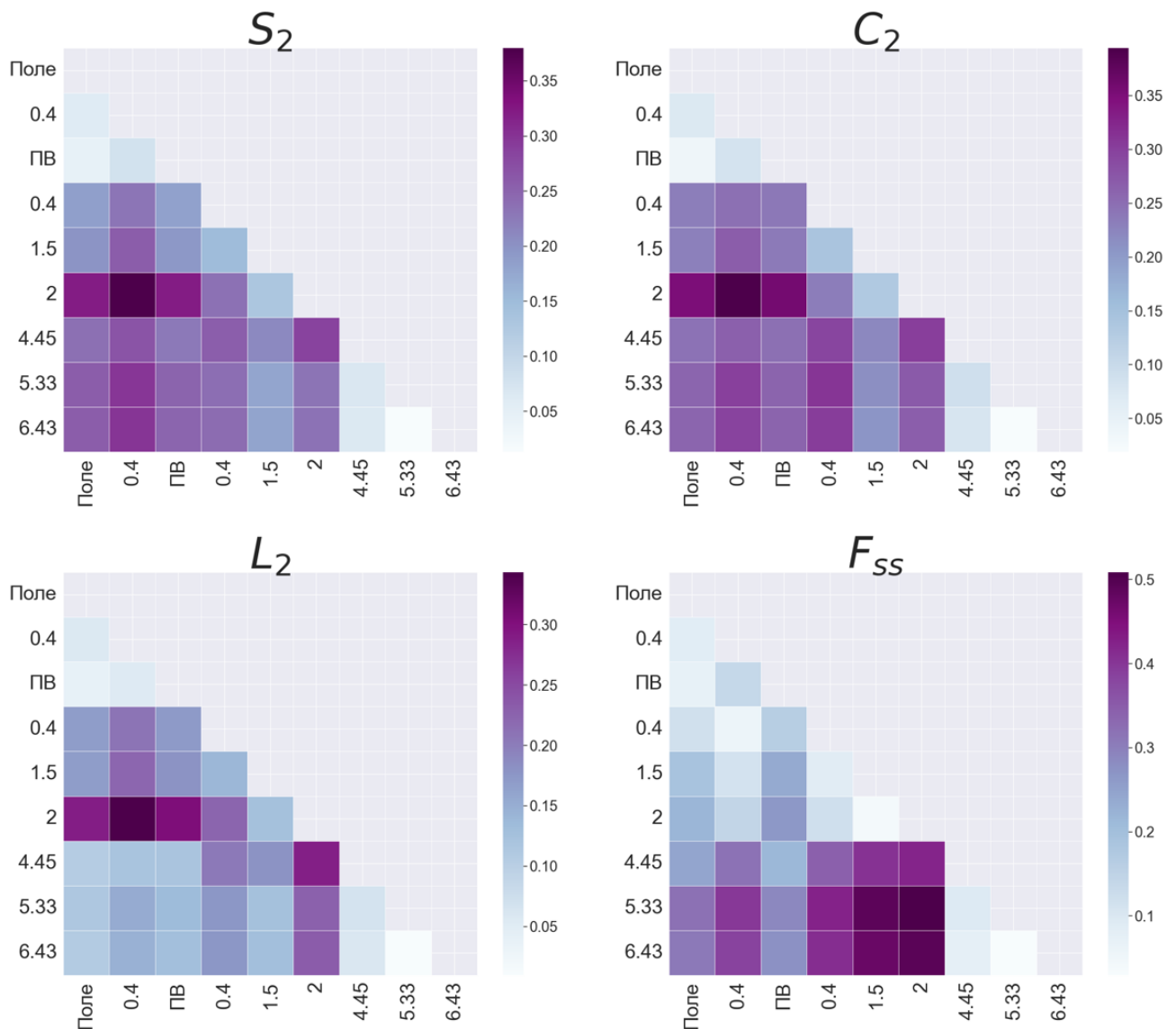


Рисунок 3.1.2-5. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте EL

Горизонт BT

В горизонте BT (рисунок 3.2.6) можно увидеть похожую на аккумулятивно-карбонатный горизонта чернозема (рисунок 3.2-3) закономерность. Отмечаются некоторая схожесть функций C_2 и S_2 , а также не такое большое расстояние между

полевым состоянием и последним шагом иссушения. По всей видимости, причиной такого поведения является активное накопление в горизонте глинистых частиц. Тем не менее, в силу не столь большого содержания органического вещества (в особенности в сравнении с гумусовыми горизонтами чернозема), полного гистерезиса структуры порового пространства не наблюдается.

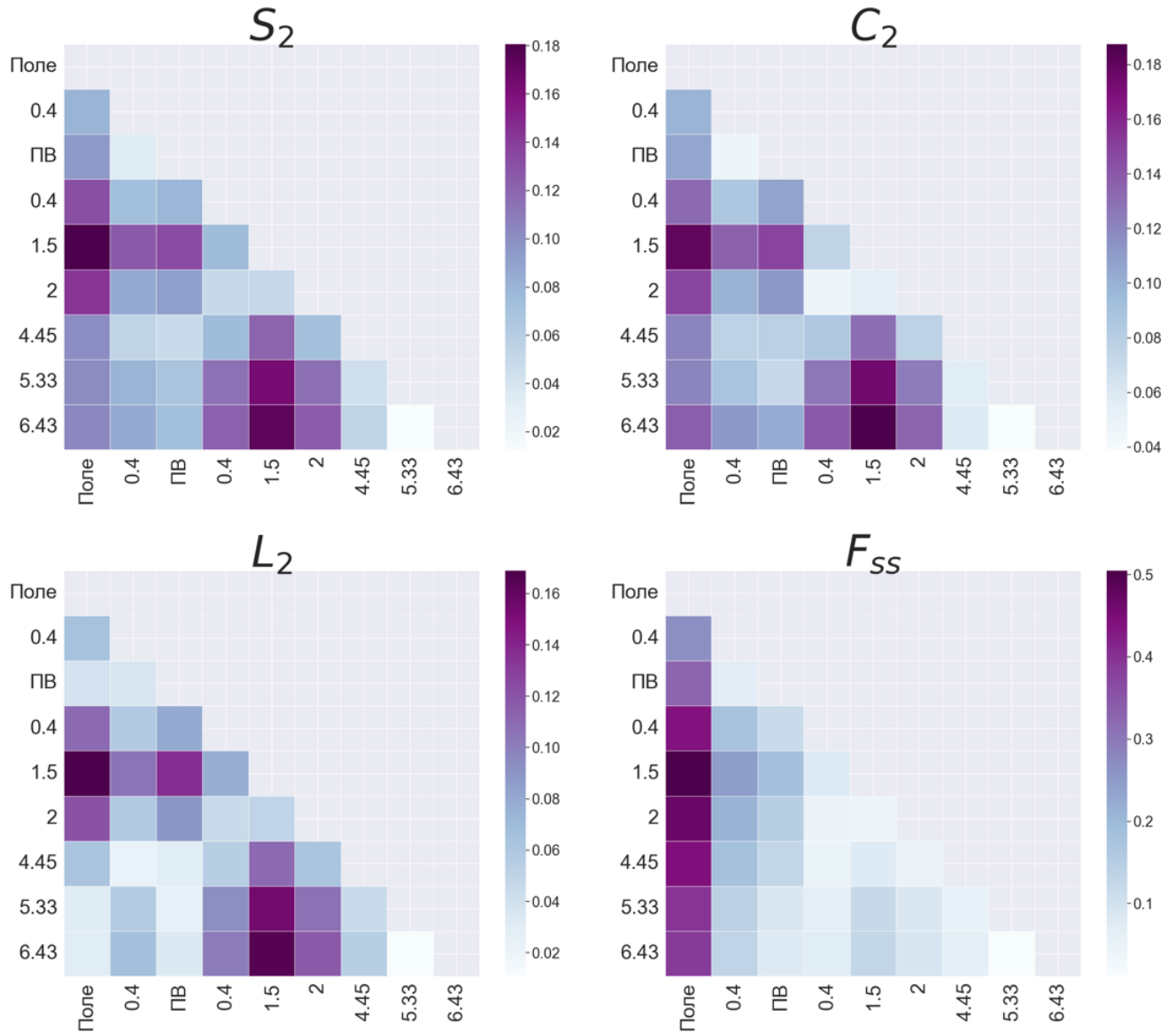


Рисунок 3.1.2-6. Карты расстояний для средних значений каждой из исследованных корреляционных функций в горизонте ВТ

Набор корреляционных функций позволяет улавливать общие морфологические закономерности, соответствующие динамике образца. Удалось выявить закономерности изменения морфологических изменений в зависимости от содержания органического углерода и гранулометрического состава отдельных

горизонтов. Для изучения более тонких морфологических и топологических особенностей, таких как локальные изменения радиусов пор и каналов и связности, необходимо обратиться к анализу статистик поросетевых моделей.

3.1.3 Анализ морфологических и топологических изменений посредством поросетевых моделей

На рисунках 3.3-1 и 3.3-2 показаны тепловые карты для трех горизонтов чернозема и дерново-подзолистой почвы соответственно.

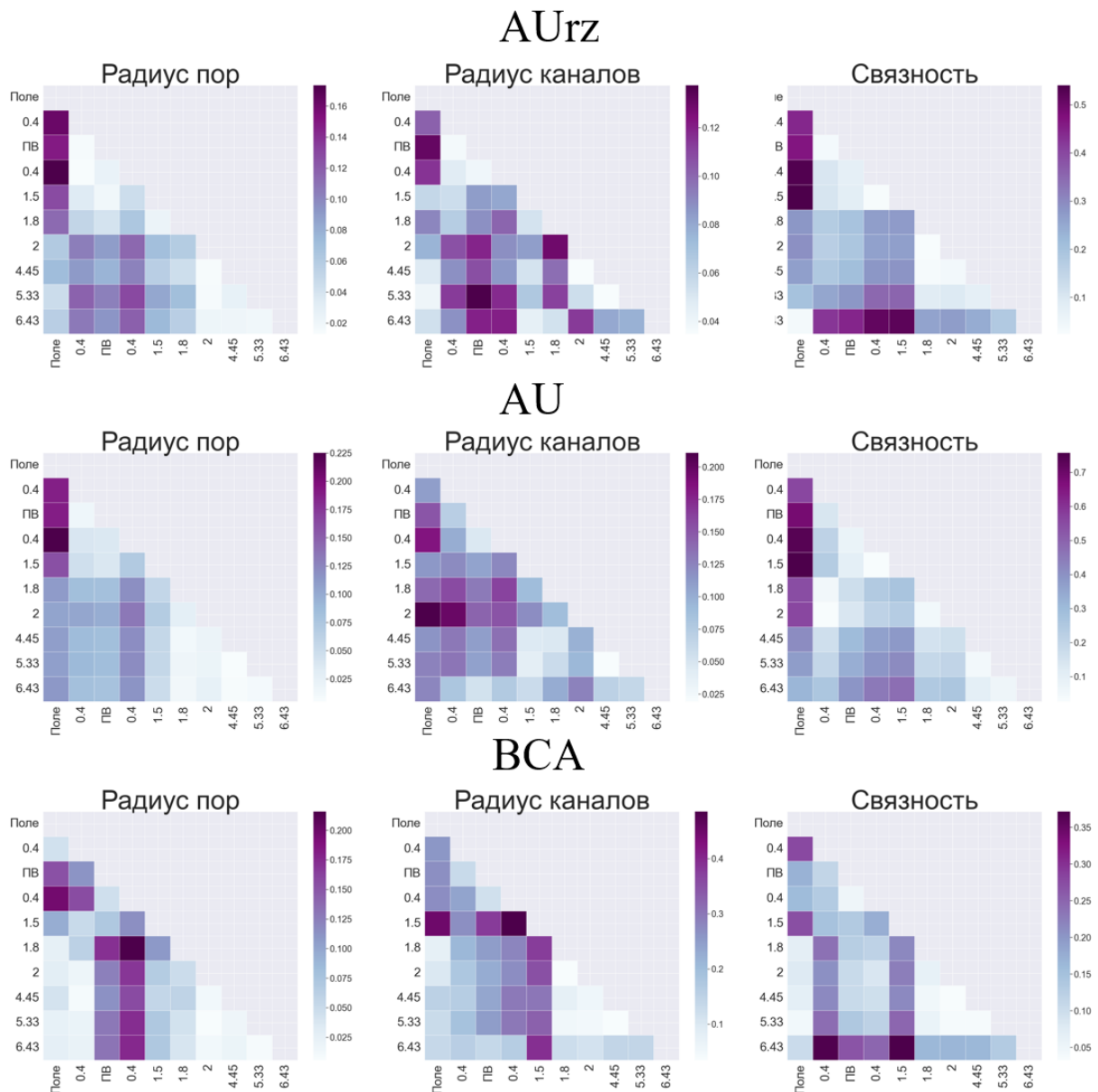


Рисунок 3.1.3-1. Карты расстояний для средних значений статистик поросетевых моделей (радиусов пор, радиусов каналов и связности) для всех горизонтов чернозема

Горизонты чернозема

В целом для всех трёх горизонтов тепловые карты похожи на то, что мы видели при анализе корреляционных функций (рисунки 3.2-1, 3.2-2 и 3.2-3). Однако также заметны некоторые особенности, характерные для каждого горизонта:

- В горизонте AU_{tz} статистики поровой сети аналогичны корреляционным функциям,
- В горизонте AU поросетевые модели больше похожи на AU_{tz} и меньше похожи на собственные корреляционные функции

В горизонте $BСА$ поросетевые модели отличаются от других горизонтов и согласуются с результатами анализа корреляционных функций. Радиусы пор и каналов заметно отличаются, поскольку большинство изменений размера пор и каналов происходит во время иссушения

Горизонты дерново-подзолистой почвы

В отличие от чернозема, тепловые карты статистик поросетевых моделей для дерново-подзолистой почвы позволяют заметить ряд интересных особенностей и в целом сильно отличаются от того, что наблюдалось при анализе корреляционных функций. Во-первых, в горизонте $AУ$ наблюдается постепенный градуированный переход от полевого состояния к последнему шагу иссушения. Отсутствуют резкие скачки, наблюдавшиеся на рисунке 3.2-4. Полевое состояние все так же далеко от последнего шага, тем не менее, этот переход происходит постепенно. Во-вторых, в горизонте EL наблюдается схожесть полевого состояния с $rF=6.43$ в радиусах пор и каналов. Тем не менее, поскольку в связности мы видим сильно выраженное отличие между этими состояниями, мы не можем говорить о гистерезисе этих свойств, поскольку их функциональная нагрузка (а связность пор напрямую отвечает за функцию проводимости) совершенно иная. В этой связи мы видим схожесть с классическими метриками: несмотря на общую схожесть распределений пор и каналов по размерам, в полученных результатах они отличаются коренным образом. В-третьих, в горизонте BT видно, как сильно

отличаются полевое и финальное состояния образца. Несмотря на схожесть в морфологии порового пространства, с функциональной точки зрения цикл увлажнения-иссушения сильно меняет горизонт ВТ.

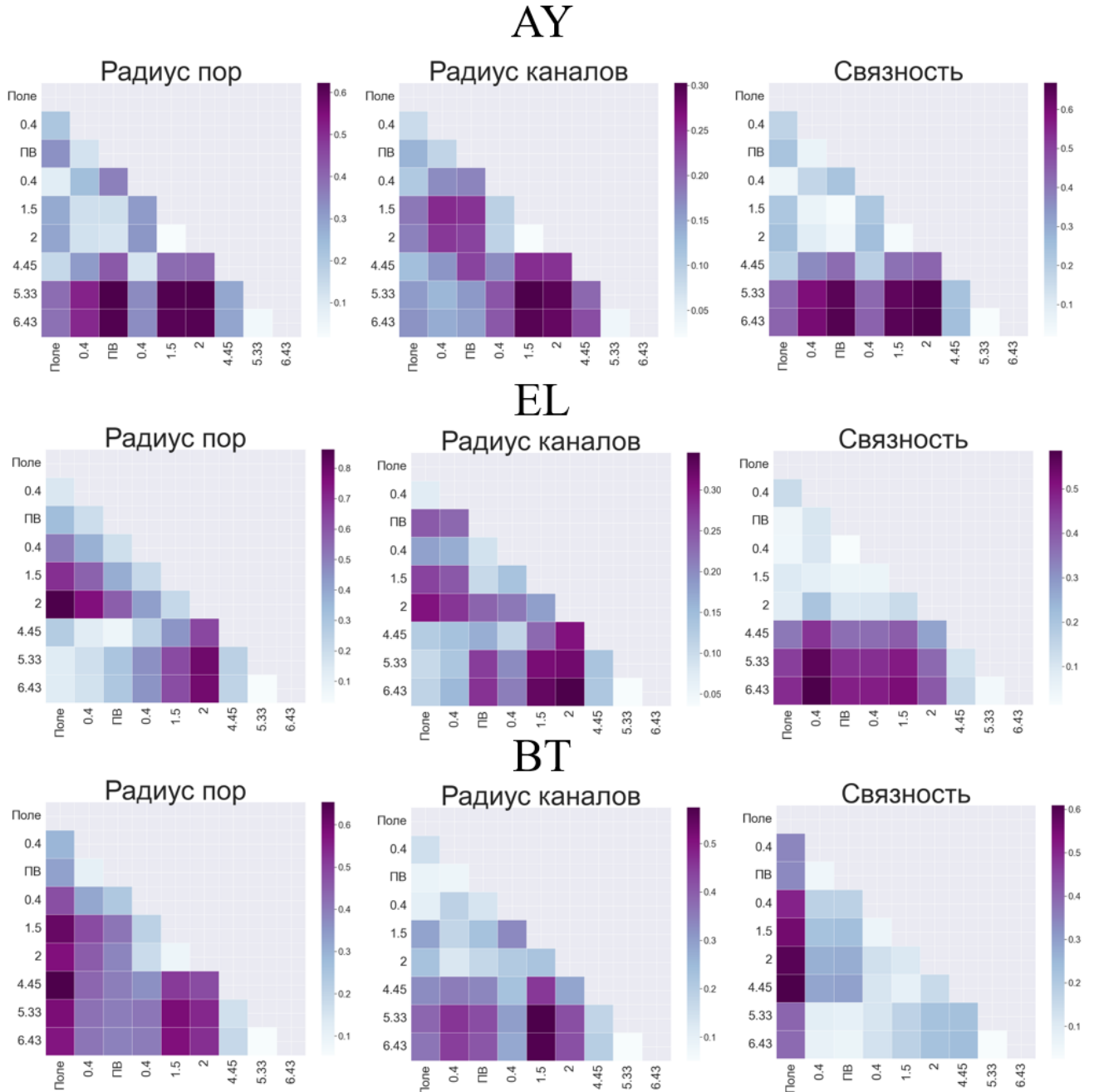


Рисунок 3.1.3-2. Карты расстояний для средних значений статистик поросетевых моделей (радиусов пор, радиусов каналов и связности) для всех горизонтов дерново-подзолистой почвы

Как видно, модели поровой сети дополняют анализ динамики структуры порового пространства: данные о порах и каналах как отдельных объектах с той же топологией, что и исходная структура порового пространства в изображениях

компьютерной томографии, дополняют общий анализ. Таким образом, модели поровой сети позволяют нам фиксировать функциональные изменения, связанные с гидравлическими и водоудерживающими свойствами, происходящие с образцами в процессе увлажнения-иссушения.

3.1.4 Анализ применимости метрик, сравнение с классическими метриками структуры порового пространства

В данном разделе была продемонстрирована и оценена динамика структуры порового пространства почвы, подтверждающая существующие исследования по данной теме (Fomin et al., 2023), а также были показаны взаимосвязь этой динамики с базовыми свойствами почвы: содержанием органического углерода и гранулометрическим составом. Несмотря на то, что такая связь между устойчивостью структуры и порового пространства с одной стороны, и гранулометрическим составом почвы и содержанием углерода, с другой, не является открытием и известна довольно давно (к примеру, в работе (Dexter, 1997)), главным достижением является то, что с помощью методов, примененных в диссертационной работе, можно установить численную зависимость между этими свойствами. Это, в свою очередь, открывает способ связать устойчивость структуры почвы – ее гистерезисное поведение при увлажнении-иссушении – с гранулометрическим составом, и содержанием углерода. Кроме того, используя корреляционные функции и поросетевые модели удастся провести более комплексный анализ, чем при использовании классических метрик, тем самым предоставляя полноценную морфологическую и топологическую характеристику исследуемых образцов. Чтобы наглядно описать преимущества использованных методов, обратимся к следующему примеру.

Как было показано в главе «Современное состояние проблемы», большинство используемых в физике почв метрик – скалярные, а наиболее часто для описания структуры порового пространства применяется пористость. На рисунках с 3.1.4-1 по 3.1.4-6 приведены средняя пористость, эйлера характеристика и средний радиус пор (рассчитанный как радиус наибольшей

вписанной в пору сферы) и стандартное отклонение для каждого из исследованных образцов. Можно заметить наложение стандартных отклонений пористости для разных образцов, особенно заметное в диапазоне от $pF = 1.5$ до $pF = 5.33$ (в случае пористости). То есть, при отборе образцов и сравнении их исключительно по базовым структурным характеристикам, используемым в большинстве исследований (собственно, пористости, эйлеровой характеристики и/или среднего радиуса пор), эти характеристики могут быть одинаковыми или близкими для различных состояний структуры порового пространства и не будут таким образом описывать текущее состояние структуры почвы. Кроме того, только по этим характеристикам невозможно оценить, вернулась ли структура пор к исходному состоянию (например, образование трещин при иссушении увеличит пористость, но таким образом совершенно изменится связность порового пространства), что возможно с использованием векторных метрик (рисунки в разделах 3.1.2 и 3.1.3). В предыдущих исследованиях динамики структуры почвы при увлажнении-иссушении (Fomin et al., 2023) были использовали различные виды пористости: общая, микропористость, несвязная пористость и так далее. Используя этот подход и пытаясь исследовать поведение порового пространства почвы, исследователи потерпели неудачу в половине изученных ими горизонтов с половиной различных показателей, поскольку пористость сама по себе не содержит структурной информации. В свою очередь, методы, использованные в работе, позволяют достоверно и *численно* сравнивать различные состояния образца друг с другом.

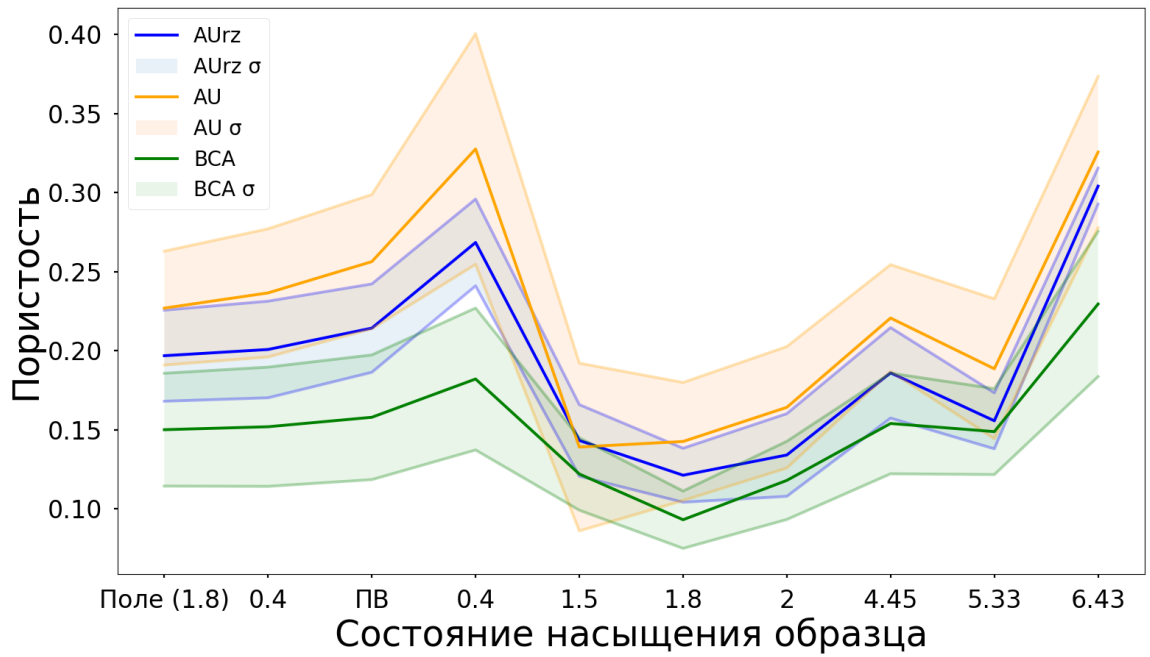


Рисунок 3.1.4-1. Изменение средней пористости и ее стандартного отклонения σ для горизонтов чернозема

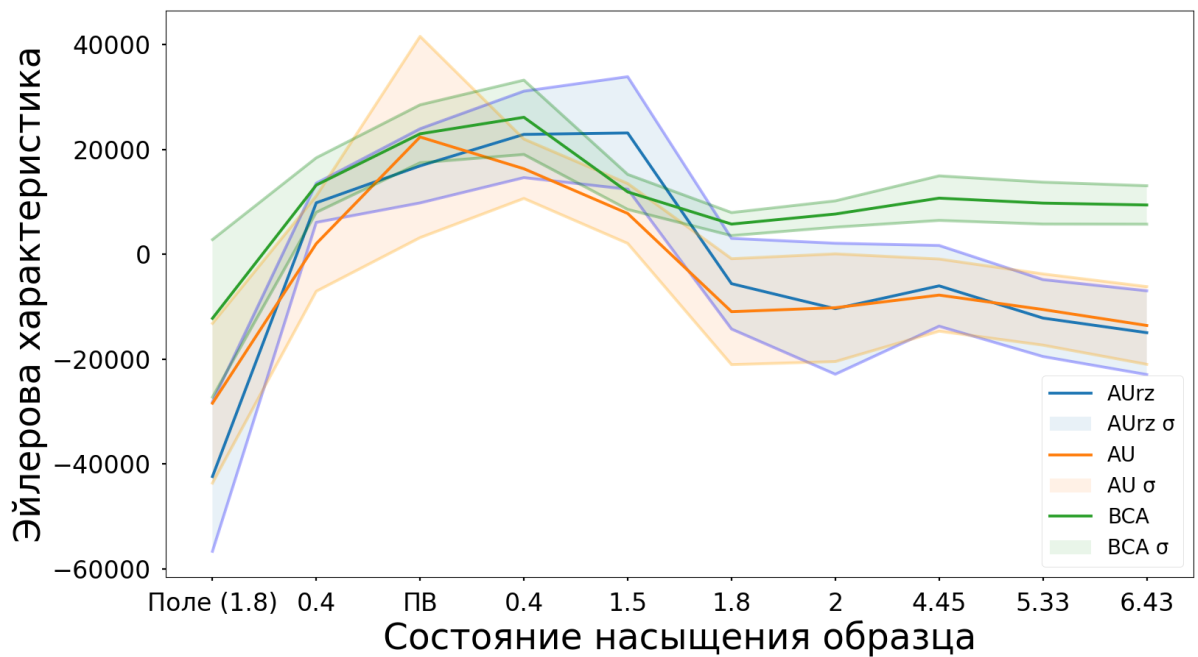


Рисунок 3.1.4-2. Изменение эйлеровой характеристики и ее стандартного отклонения σ для горизонтов чернозема

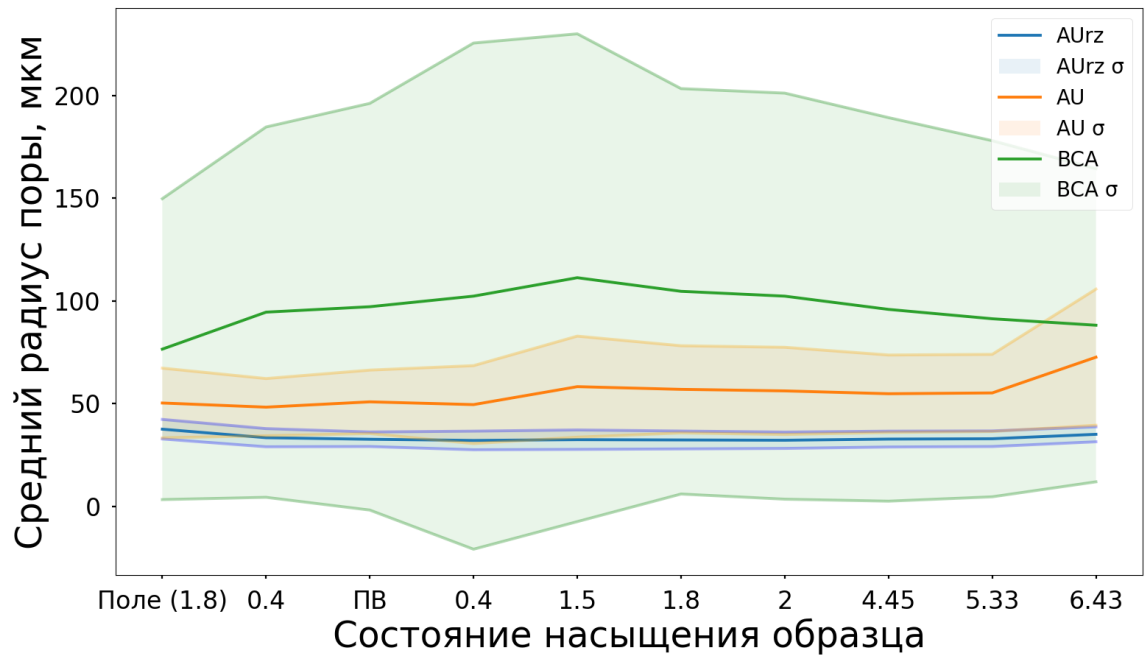


Рисунок 3.1.4-3. Изменение среднего радиуса поры (мкм) и его стандартного отклонения σ для горизонтов чернозема

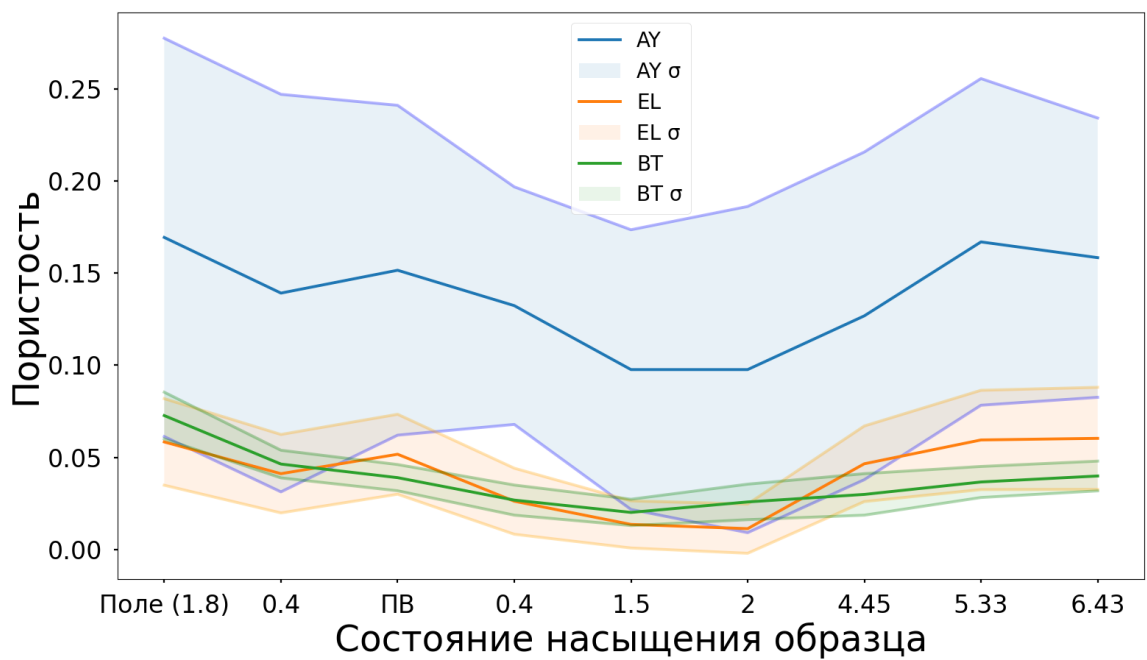


Рисунок 3.1.4-4. Изменение средней пористости и ее стандартного отклонения σ для горизонтов дерново-подзолистой почвы

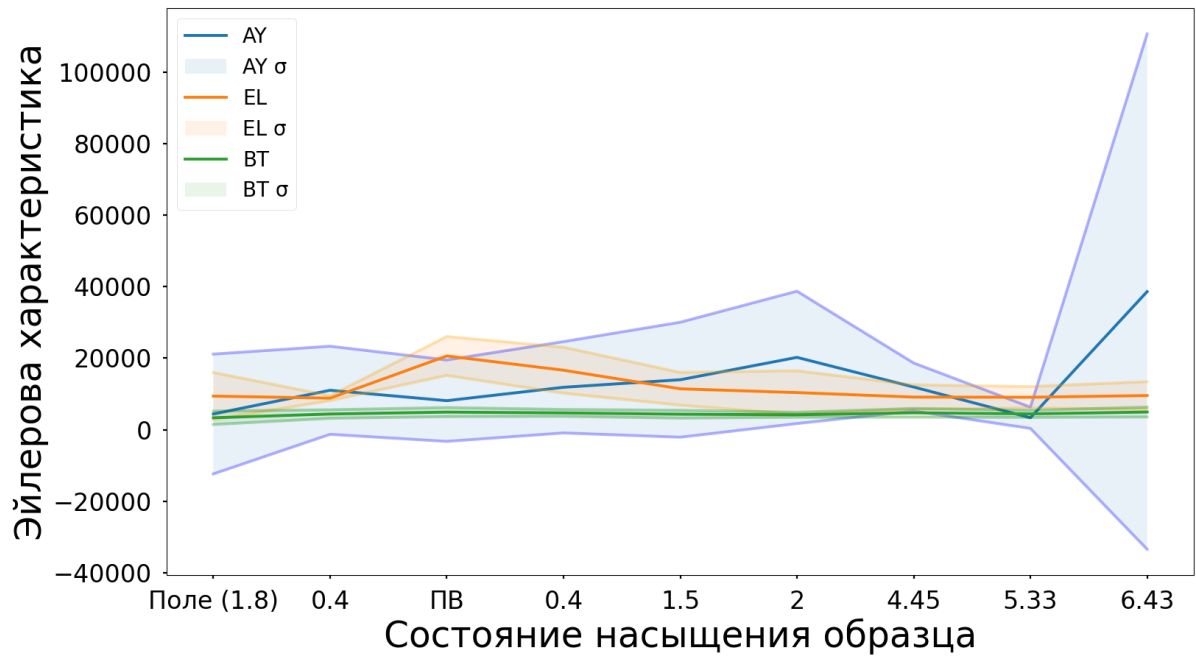


Рисунок 3.1.4-5. Изменение эйлеровой характеристики и ее стандартного отклонения σ для горизонтов дерново-подзолистой почвы

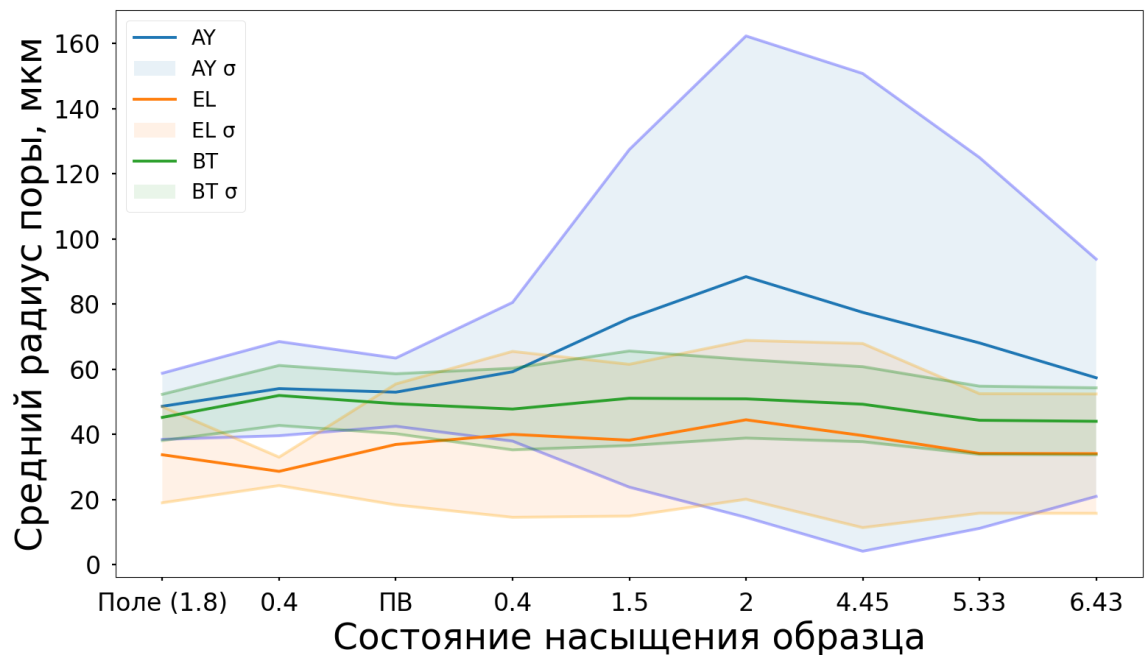


Рисунок 3.1.4-6. Изменение среднего радиуса поры (мкм) и его стандартного отклонения σ для горизонтов дерново-подзолистой почвы

Таким образом, были проанализированы современные подходы к оценке динамики структуры порового пространства при увлажнении-иссушении и промерзании-оттаивании. При этом было отмечено, что оба этих процесса

приводят к изменению функциональных свойств порового пространства. Для более детальной оценки этих функциональных свойств, попробуем сравнить классические подходы к их получению и интерпретации, с современными – поросетевыми моделями.

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 (рисунки 3.2-1 и 3.2-2).

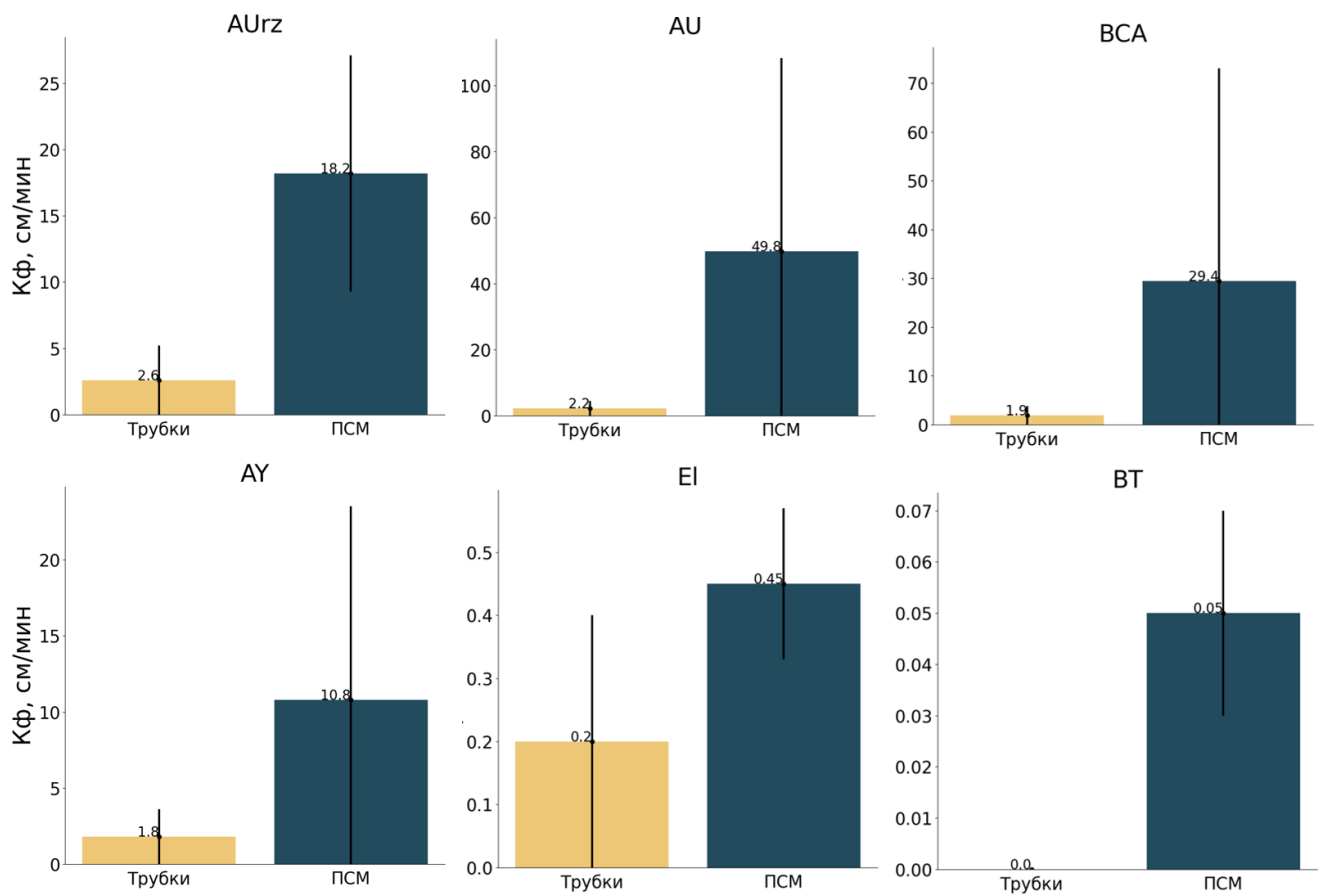


Рисунок 3.2-1. Средние коэффициенты фильтрации, полученные полевым методом и моделированием в поросетевых моделях (ПСМ) для каждого из 6 исследованных горизонтов. По оси ординат отложен коэффициент фильтрации в сантиметрах в минуту; на каждом столбце отложено стандартное отклонение для пяти повторностей

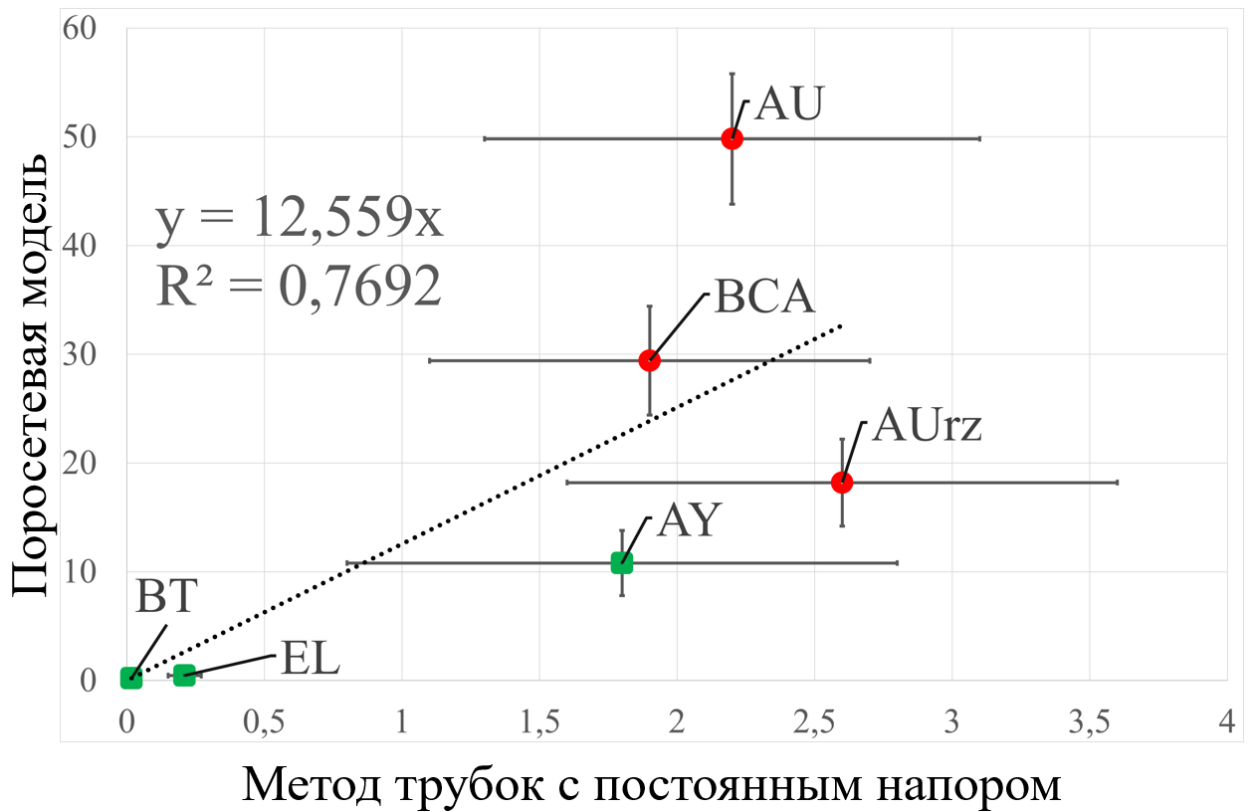


Рисунок 3.2-2. Средние коэффициенты фильтрации, полученные полевым методом и моделированием в поросетевых моделях (ПСМ) для каждого из 6 исследованных горизонтов. По оси ординат отложен коэффициент фильтрации в поросетевых моделях, по оси абсцисс – методом трубок с постоянным напором (в сантиметрах в минуту). На графике представлена линейная регрессия и коэффициент R^2

Полученные данные показывают, что поросетевое моделирование показывает стабильно более высокие результаты (в 10-20 раз больше) по фильтрации, чем полевой метод трубок. 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. При моделировании в поросетевой модели поддерживается постоянный напор, течение осуществляется по направлению Z, а «стенки» образца по осям X и Y закрыты. В полевом эксперименте поддержание постоянного напора может быть затруднено, латеральный поток никак не ограничен, а его учет невозможен.
2. Влияние нижележащих слоев. В то время как в моделировании в

поросетевой модели исследуется конкретный образец, в полевом определении нижележащие слои могут оказывать существенное влияние на значения коэффициента фильтрации. В частности, в изученной дерново-подзолистой почве присутствует непроницаемый горизонт ВТ, характеризующийся утяжелением гранулометрического состава. Его присутствие приводит к уменьшению коэффициентов фильтрации системы, включающей вышележащие горизонты АУ и ЕL, которая и измеряется в такой экспериментальной постановке.

3. Набухание почвы при инфильтрации. Моделирование посредством поросетевой модели исследует конкретное состояние образца (в этом исследовании – образец в состоянии полевой влажности), в то время как в полевом эксперименте почва набухает, что приводит к уменьшению объема порового пространства и уменьшению значения коэффициентов фильтрации.
4. Наличие органического вещества в поровом пространстве. В исследованных 3D томографических изображениях обнаруживается наличие некоего материала (по всей видимости, органического вещества) в поровом пространстве. В этой связи сегментация была проведена на три фазы (твердая фаза, поровое пространство и третья фаза/органическое вещество), а затем фаза органического вещества была отнесена к поровому пространству, что является распространенной практикой, но может приводить к завышению коэффициентов фильтрации, рассчитанных в поросетевой модели.
5. Влияние зажатого воздуха и других механизмов непроводимости. Инфильтрация влаги в почву в полевом эксперименте может приводить к зажатию воздуха и похожим процессам, что может оказывать влияние на полученные значения коэффициентов фильтрации.

Несмотря на указанные выше причины, коэффициент детерминации R^2 линейной регрессии (рисунок 3.2-2) равен 0.7692, что говорит о хорошей сходимости получаемых результатов.

Важно заметить, что коэффициент фильтрации в поросетевых моделях будет сильно зависеть от сегментации (бинаризации) исходных изображений компьютерной томографии, поэтому необходимо правильно подбирать пороги сегментации, избегая при этом «подгона» бинаризации под лабораторный эксперимент. Заметим также, что полевой метод определения фильтрации может демонстрировать недостоверные результаты. Важным выводом из этого является необходимость увеличения количества повторностей полевых определений и потенциальное использование других лабораторных и полевых методов определения фильтрации. Тем не менее, как было отображено в Главе 1, эта задача крайне нетривиальна. В работе (Khirevich et al., 2022) особенно отмечается несостоятельность абсолютного большинства существующих лабораторных методов определения фильтрации, а разработка и апробация новых могут вызывать затруднения.

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

Поросетевые модели также были применены для сравнения основных гидрофизических характеристик с экспериментальными измерениями и коэффициентов влагопроводности, рассчитанных по уравнению ван Генухтена-Муалема с рассчитанными в поросетевых моделях.

Посредством моделирования двухфазной проницаемости в поросетевой модели были получены основные гидрофизические характеристик в ходе процесса дренажа. В силу ограничения возможностей применения поросетевых моделей разрешением изображений компьютерной томографии, основные гидрофизические характеристики приводятся только в той области, где они могут быть применены ($S_w > 0.5$) (рисунки 3.3-1 и 3.3-2). На полученных графиках видно хорошее согласование между экспериментальными точками и кривыми ОГХ, полученными моделированием в поросетевой модели.

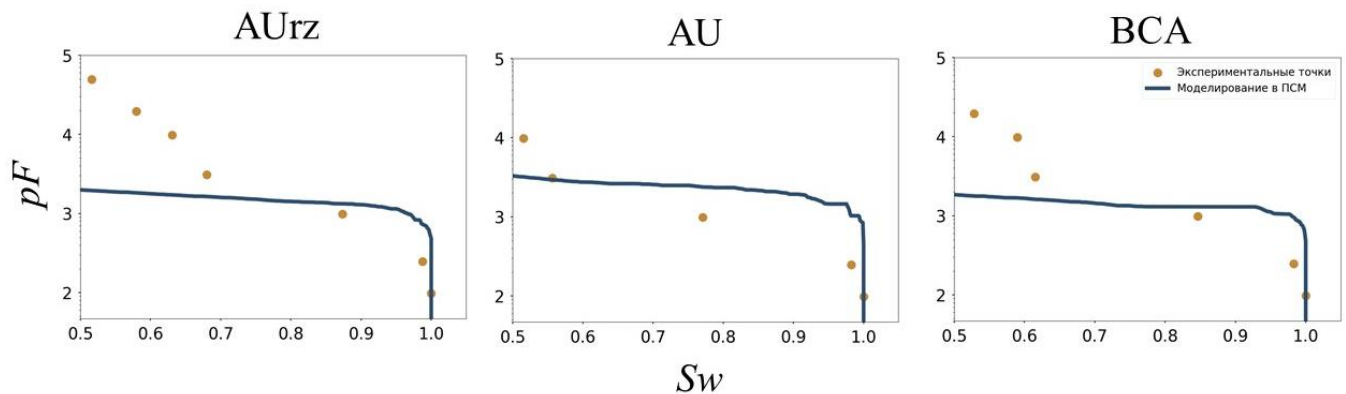


Рисунок 3.3-1. Сравнение основных гидрофизических характеристик, полученных моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема с экспериментальными данными. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат – pF .

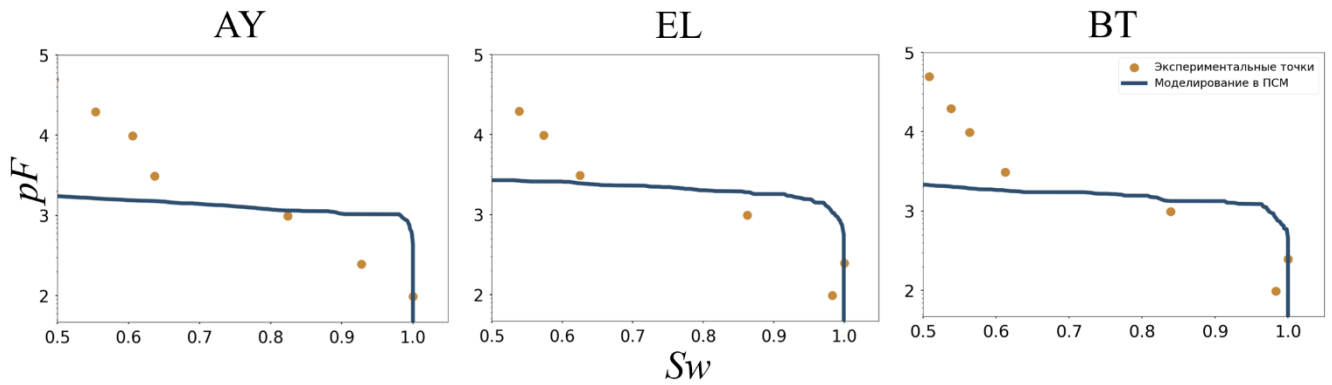


Рисунок 3.3-2. Сравнение основных гидрофизических характеристик, полученных моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема с экспериментальными данными. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат – pF .

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 таблице 3.3-1 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

Таблица 3.3-1. RMSE между экспериментальными точками и кривыми основных гидрофизических характеристик, полученных моделированием в поросетевой модели для всех исследованных горизонтов.

Почва	Горизонт	RMSE
Чернозем	AU _{гз}	0.33
	AU	0.34
	BCA	0.42
Дерново-подзолистая	AY	0.35
	EL	0.24
	BT	0.44

Помимо геометрического RMSE для оценки качества работы модели была оценена абсолютная ошибка по rF (рассчитанная как модуль разницы между экспериментальным значением и рассчитанным в поросетевой модели). На рисунке 3.3-3 представлены полученные ошибки. Согласно полученным результатам, согласованность модели с экспериментальными данными растет с увеличением относительной влагонасыщенности. Эта идея отражена на рисунке 3.3-4: красным цветом выделена зона наихудшей согласованности, желтым – приемлемой и зеленым – наилучшей.

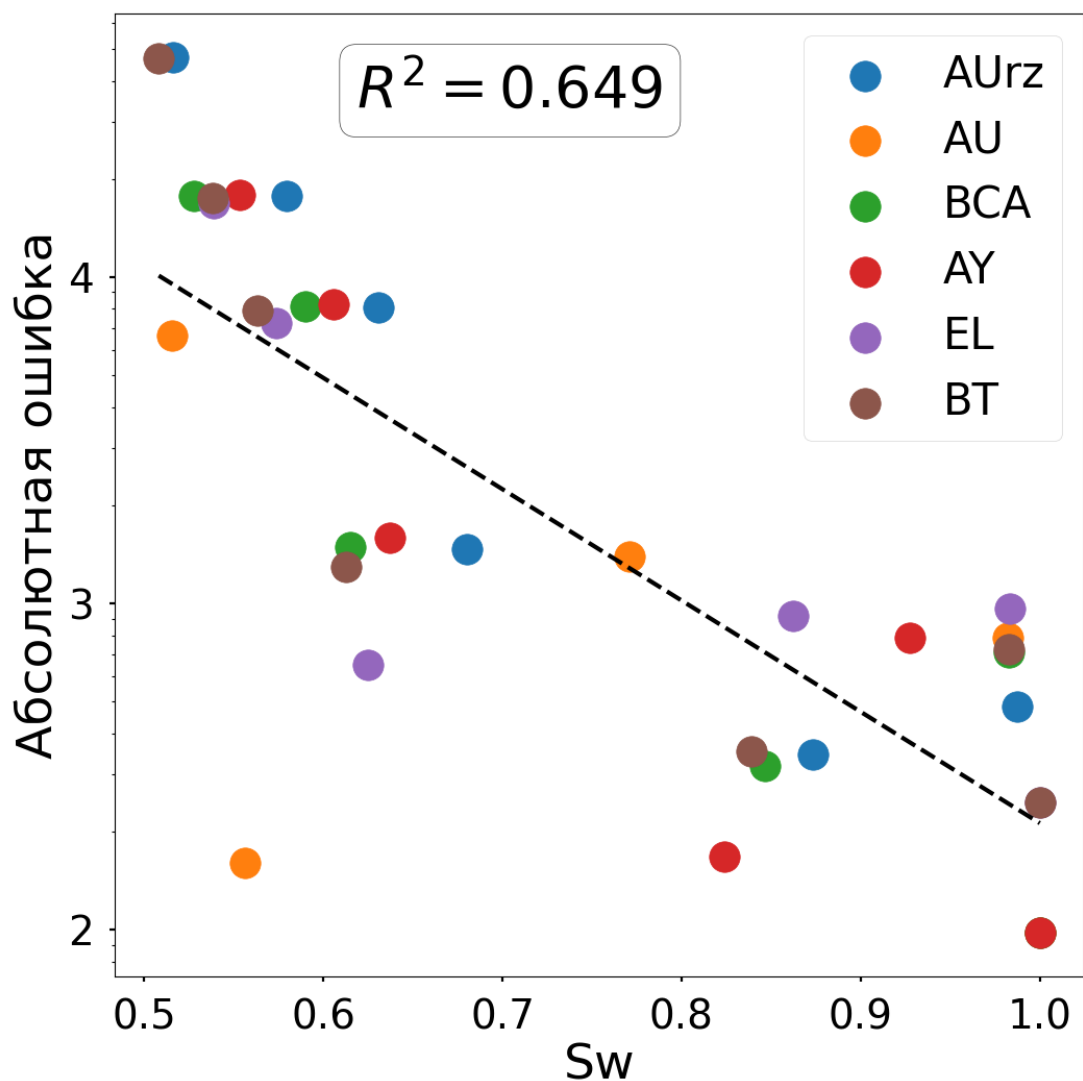


Рисунок 3.3-3. Абсолютная ошибка между экспериментальными значениями и поросетевой моделью для основных гидрофизических характеристик в диапазоне S_w от 0.5 до 1.0. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат – абсолютная ошибка в rF , на графике также представлен коэффициент детерминации.

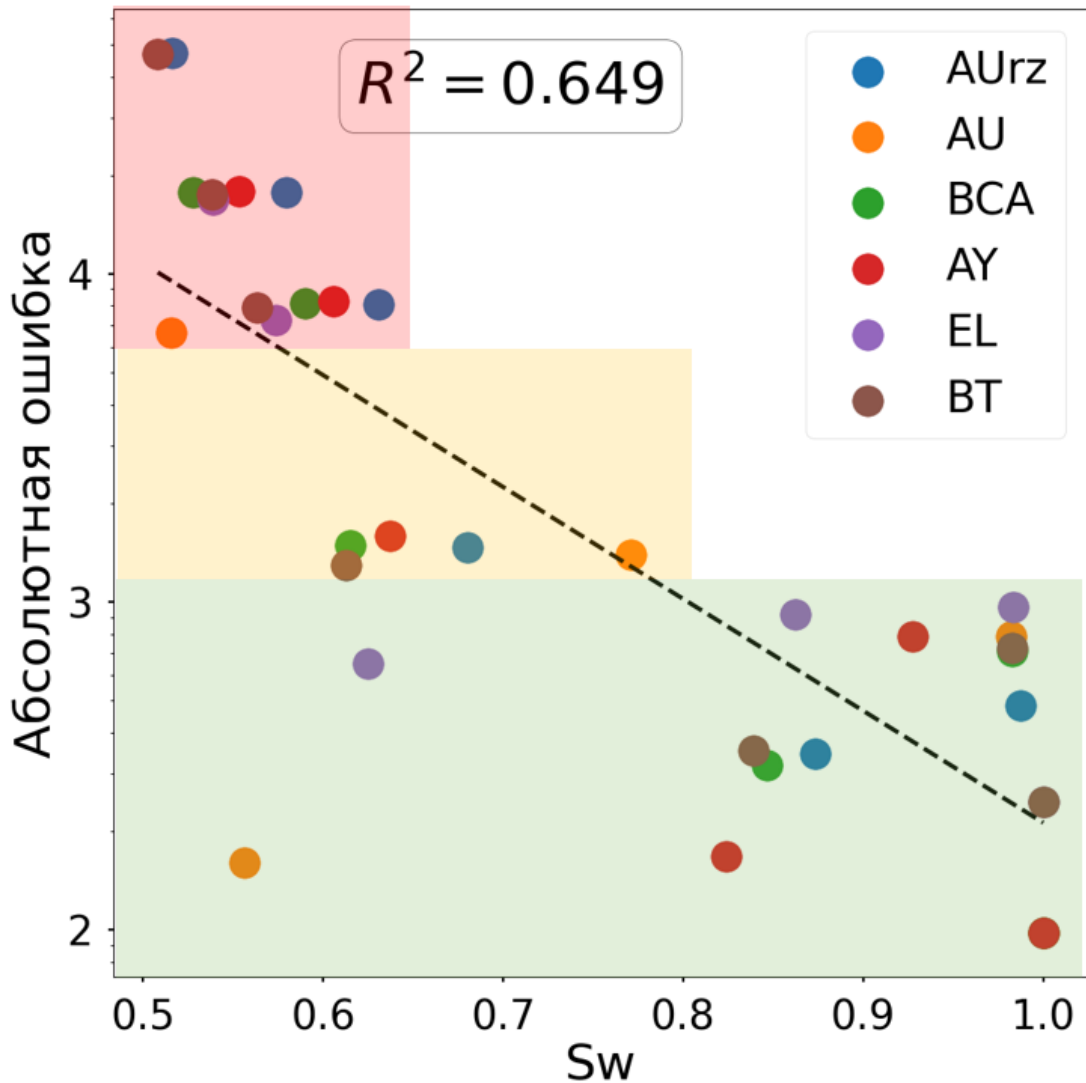


Рисунок 3.3-4. Абсолютная ошибка между экспериментальными значениями и поросетевой моделью для основных гидрофизических характеристик в диапазоне S_w от 0.5 до 1.0. Красным цветом выделена зона наихудшей согласованности, желтым – приемлемой и зеленым – наилучшей. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат – абсолютная ошибка в rF , на графике также представлен коэффициент детерминации.

На основе моделирования в поросетевых моделях исследуемых образцов были получены кривые 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 (рисунки 3.3-5 и 3.3-6). Коэффициент l в уравнении ван Генухтена-Муалема принят равным 0.5.

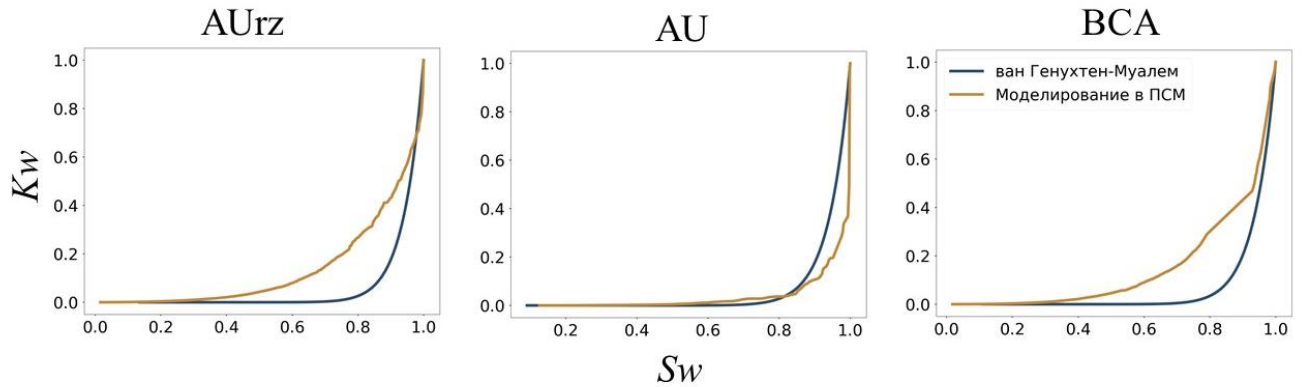


Рисунок 3.3-5. Относительные ненасыщенные гидравлические проводимости, рассчитанные по уравнению ван Генухтена-Муалема и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат относительная ненасыщенная проводимость (функция влагопроводности, K_w)

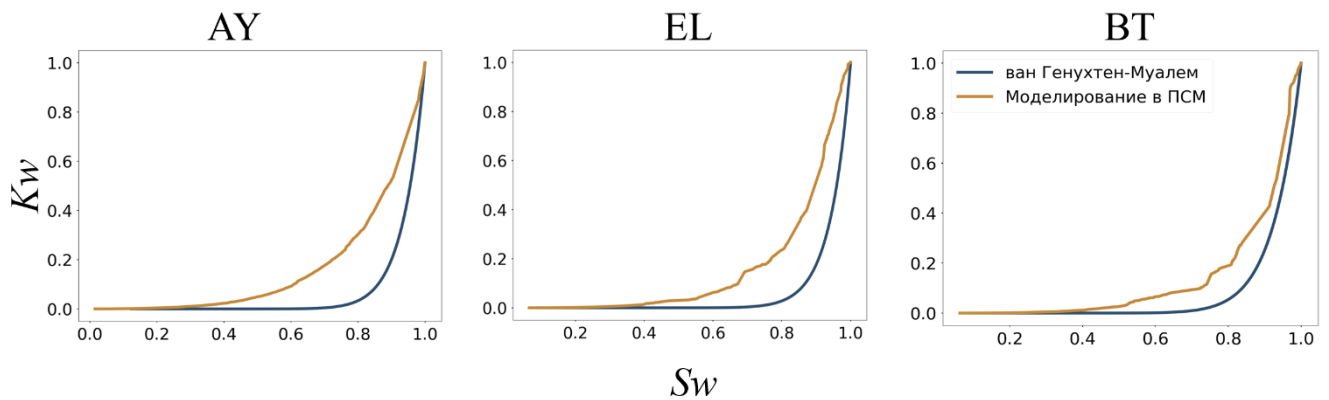


Рисунок 3.3-6. Относительные ненасыщенные гидравлические проводимости, рассчитанные по уравнению ван Генухтена-Муалема и полученные моделированием двухфазной проницаемости в поросетевой модели для образцов чернозема. По оси абсцисс отложена относительная влагонасыщенность (S_w), по оси ординат относительная ненасыщенная проводимость (функция влагопроводности, K_w)

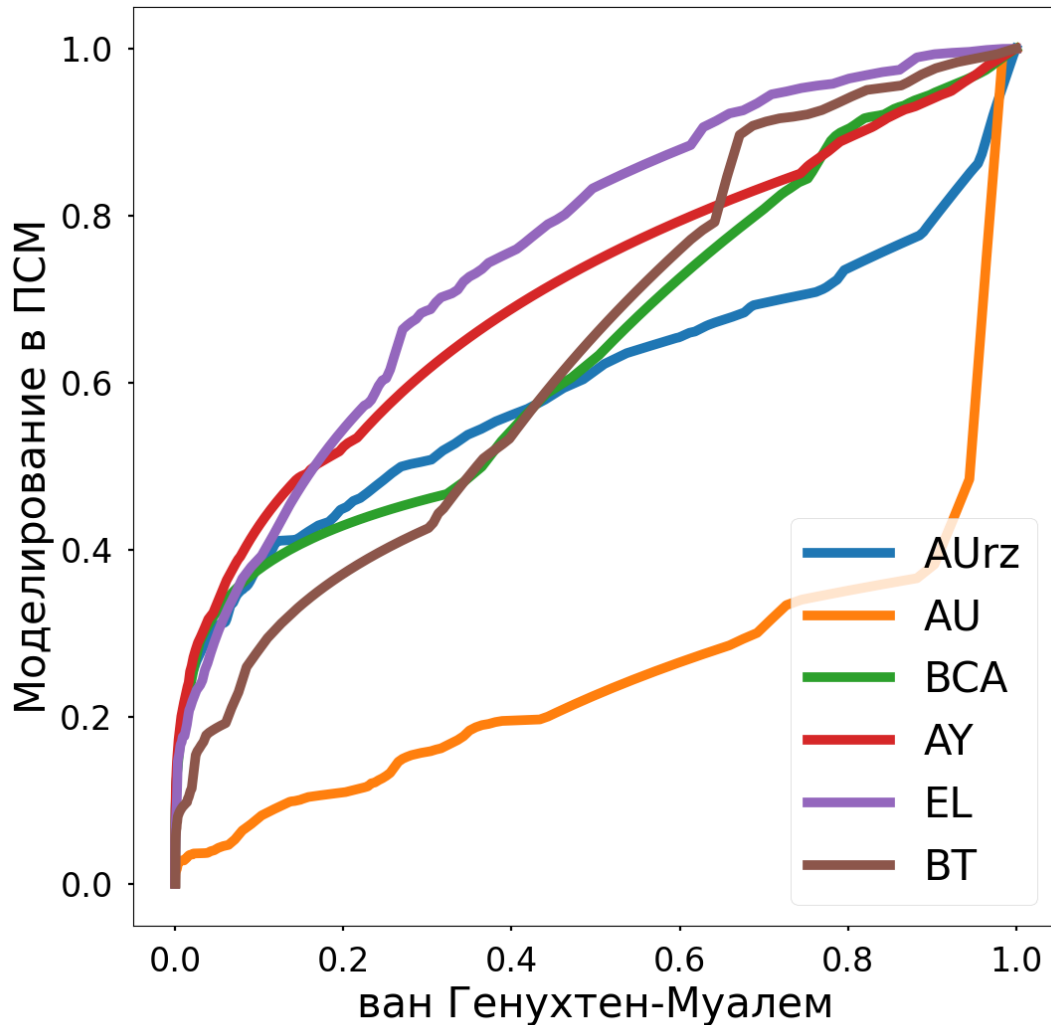


Рисунок 3.3-7. График вида «modelled-predicted» для метода поросетевых моделей и расчета по уравнению ван Генухтена-Муалема.

Кривые относительной гидравлической проводимости, полученные по уравнению ван Генухтена–Муалема и моделированием в поросетевой модели, в целом совпадают, особенно в горизонте AU. В горизонтах AU_{rz} и BCA 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. На рисунке 3.3-7 приведен график вида «modelled-predicted», на котором демонстрируется сопоставление двух методов получения функции влагопроводности. Полученные результаты, вообще говоря, сходятся с выводами, полученными в разделе 3.1: наибольшее расхождение наблюдается в бедном углеродом и пылеватыми частицами элювиальном горизонте дерново-подзолистой

почвы, в то время как в темно-гумусовом горизонте чернозема сходнение наилучшее. Тем не менее, этот результат нельзя трактовать однозначно, поскольку эта сходимость может быть улучшена путем варьирования параметра l в уравнении ван Генухтена-Муалема (Дедюлина и др., 2020).

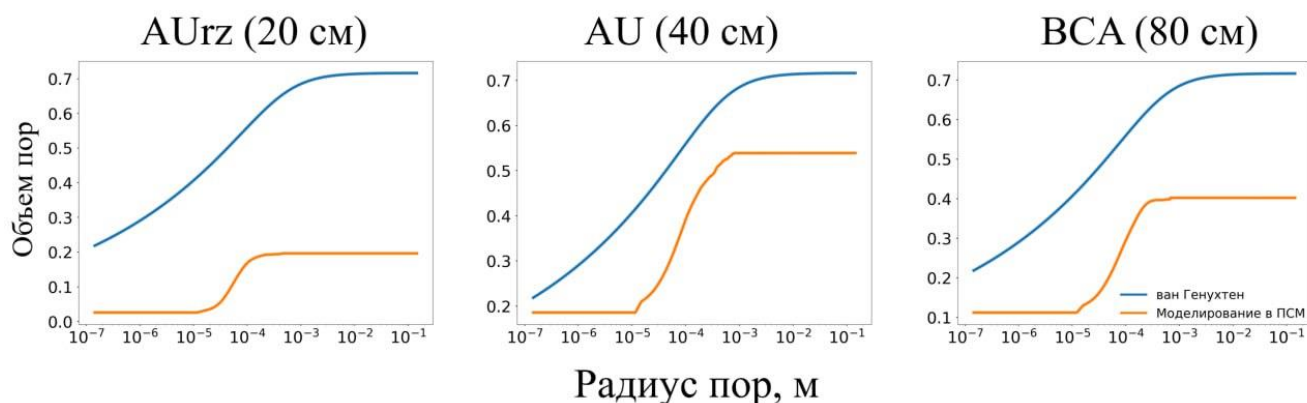


Рисунок 3.3-8 Кумулятивные кривые распределения пор по размерам, полученные из основных гидрофизических характеристик для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в поросетевой модели для образцов чернозема.

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 поросетевой модели (рисунок 3.3-8). Максимальным достижимым значением пористости считается наибольшая объемная влажность, нормированная на пористость образца. На графиках видно, что в областях пор среднего размера (10^{-5} – 10^{-3} 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} м) и макропористости (10^{-3} – 10^{-1} 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).

Аналогичный эффект можно наблюдать и при исследовании дифференциальных кривых распределения пор по размерам (рисунок 3.3-9). При анализе графика хорошо выделяются две зоны дивергенции между кривыми: в областях мелкого (менее 1 мкм) и крупного (более 1000 мкм) радиуса пор.

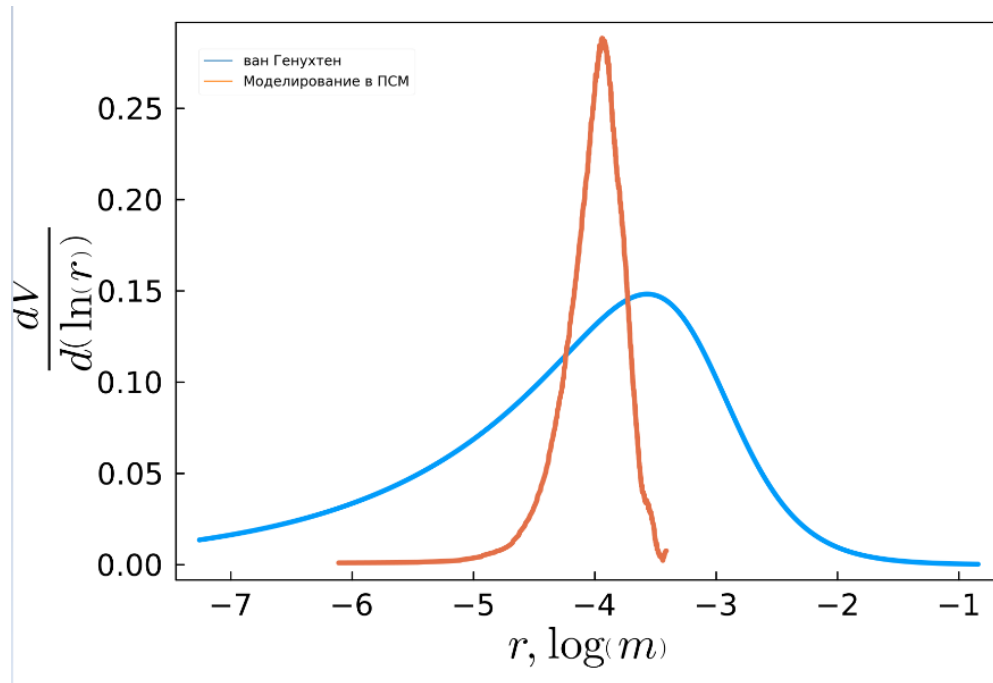


Рисунок 3.3-9 Дифференциальные кривые распределения пор по размерам, полученные из основной гидрофизической характеристики для аппроксимации по уравнению ван Генухтена и из моделирования в поросетевой модели для образца из горизонта AU_{tz}

Появление дивергенции в области мелкого радиуса пор 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.

Дивергенция же в области крупного радиуса пор отображает гораздо более низкие измеренные капиллярные входные давления и значения давления в целом для насыщений между $1.0 > S_w > 0.8$. 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 $S_w = 1$, обычно рассматривается как ненадежная (Jennings, 1987).

Результаты работы позволяют сделать утверждение, основанное на ряде критериев, о том, что моделирование гидродинамических свойств почвы в масштабе пор с применением поросетевых моделей является крайне перспективным подходом и позволяет нам расширить и дополнить как наши экспериментальные возможности, так и общее понимание физики процесса.

Первый критерий – широкие возможности математического моделирования. Моделирование в поросетевых моделях 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. Таким образом, поросетевые модели открывают доступ к более корректной оценке гидрологического режима почв.

Второй критерий – решение проблемы “граничных пор” с помощью моделирования в поросетевых моделях 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. Поросетевые модели 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 поросетевых моделях в дальнейшем может быть использовано для моделирования гидродинамических свойств на уровне почвенного профиля и ландшафта вместо прямых измерений.

Третий 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 поросетевых моделях занимает порядка 4–8 часов на компьютерную томографию образца и порядка 2–4 часов на последующее извлечение поросетевой модели и дальнейшее моделирование в масштабе пор. Прочие подходы к получению экспериментальных данных ОГХ (центрифугирование, капилляриметрия 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).

Поросетевое моделирование предлагает новый концептуальный подход в понимании структуры порового пространства. Парадигма представления порового пространства исключительно в виде капилляров не раз подвергалась критике (Fan, 1956; Dullien, 2012; Hunt et 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 поросетевых моделей, 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 изображений компьютерной томографии, включая *super-resolution* (Bai et al., 2023) и *multi-scale image pore*

structure fusion (Gerke et al., 2017; Karsanina et al., 2018; Wu et al., 2019; Li et al., 2020) 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 поросетевой модели 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 поросетевых моделей – регулирование растворения воздуха в воде и учет ненасыщенной пневматической проводимости (Толстыгин и др., 2025).

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 зажатием 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 и гранулометрического состава почвы, а использование поросетевых моделей и корреляционных функций позволяет производить его количественную оценку.

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. Андрианов П. И. О прочности почвенного комка и методах ее определения // Почвоведение. — 1947. — Т. 2.
3. Березин П. Н., Воронин А. Д., Шеин Е. В. Структура почвы: энергетический подход к количественной оценке // Почвоведение. — 1983. — № 10. — С. 63–69.
4. Березин П., Воронин А., Шеин Е. В. Основные параметры и методы количественной оценки почвенной структуры // Почвоведение. — 1985. — № 10. — С. 58–68.
5. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы определения физических свойств почв и грунтов. — М.: Высшая школа, 1961.
6. Виленский Д. Г. К методике исследования прочности почв при изучении почвенной эрозии // Почвоведение. — 1935. — Т. 115, № 5–6. — С. 789.
7. Вильямс В. Р. Лекции по почвоведению. — М.: Типография общества распространения полезных книг, 1897.
8. Воронин А. Д. Основы физики почв. — М., 1986.
9. Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. — 204 с.
10. 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. 781–789.
11. 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.
12. Докучаев В. В. Наши степи прежде и теперь. — СПб., 1892 // Избр. соч. — 1949. — С. 224.

13. Иванов А. Л., Шеин Е. В., Скворцова Е. Б. Томография порового пространства почв: от морфологической характеристики к структурно-функциональным оценкам // Почвоведение. — 2019. — № 1. — С. 61–69.
14. Калнин Т. Г. Томографические показатели в современных агрофизических исследованиях почв : дис. ... канд. биол. наук : 4.1.5. — М., 2024.
15. Качинский Н. А. Замерзание, размерзание и влажность почвы в зимний сезон в лесу и на полевых участках. — М. : Изд-во МГУ, 1927.
16. Качинский Н. А. Физика почвы. — М., 1965.
17. Марк Порций Катон. Земледелие / пер. и комм. М. Е. Сергеенко при участии С. И. Протасовой. — М., 1950. — 220 с.
18. Милановский Е. Ю., Шеин Е. В. Структура почв // Природа. — 2003. — № 3. — С. 28–32.
19. Мировая реферативная база почвенных ресурсов. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт : пер. с англ. — 4-е изд. — М. : МАКС Пресс, 2024. — 248 с. — DOI: 10.29003/m4174.978-5-317-07235-3.
20. Орловский Н. В. Алексей Григорьевич Дояренко, 1874–1958. — М. : Наука, 1980.
21. Полевой определитель почв. — М. : Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. — 182 с.
22. Прокофьева Т. В., Малышева Т. И., Алексеев Ю. Е. Учебная зональная практика по почвоведению и геоботанике. — М. : МАКС Пресс, 2008.
23. Ревут И. Б. Физика почвы. — М., 1972.
24. Ревут И. Б., Роде А. А. Методическое руководство по изучению почвенной структуры. — М., 1969.
25. Саввинов Н. И. Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках. — М. : Сельколхозгиз, 1931. — С. 3–21.
26. Скворцова Е. Б. и др. Изменение порового пространства в гумусовых агрегатах дерново-подзолистой почвы при многократном замораживании и оттаивании // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. — 2018.

— № 91. — С. 6–20.

27. Скворцова Е. Б. Строение порового пространства естественных и антропогенно измененных почв: дис. ... — М., 1999.
28. Скворцова Е. Б., Сапожников П. М. Трансформация порового пространства уплотненных почв в ходе сезонного промерзания и оттаивания // Почвоведение. — 1998. — № 11. — С. 1371–1381.
29. Смагин А. В., Садовникова Н. Б., Али М. М. Б. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. — 1998. — № 11. — С. 1362–1370.
30. Терлеев В. В., Лазарев В. А., Богданов В. Л., Моисеев К. Г., Дунаева Е. А. Недостатки эмпирической функции Ван Генухтена и ее сравнение с физически обоснованными аналогами на примере данных о гистерезисе: часть 1 // Таврический вестник аграрной науки. — 2024. — № 1 (37). — С. 158.
31. Тимофеева М. В., Абросимов К. Н., Юдина А. В., Фомин Д. С., Ключева В. В. Зимография: особенности постановки метода визуализации активности ферментов в почвах // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. — 2022. — № 113. — С. 58–89.
32. Толстыгин К. Д., Герке К. М. О современном подходе в исследовании структуры порового пространства и гидродинамических свойств почвы // Почвы — опора России : тезисы докладов IX съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева. — М.: МАКС Пресс, 2024. — С. 85–86.
33. Толстыгин К. Д., Романенко К. А., Герке К. М. Современные методы исследования влагопроводности мерзлотных почв // Мерзлотные почвы в антропоцене. — 2023. — С. 131.
34. 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. — № 123. — С. 30–64. — DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-30-64.
35. Усов С. М. Курс земледелия с приложением к полеводству. — СПб.: Изд.

Императорского Вольного экономического общества, 1837.

36. Хитров Н. Б., Герасимова М. И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. — 2022. — № 1. — С. 3–14.
37. Шеин Е. В. и др. Функциональное значение и томографическое строение порового пространства суглинистых почв // Тенденции развития агрофизики: материалы II Междунар. науч. конф. — М., 2019. — С. 55.
38. Шеин Е. В. Курс физики почв: учебник. — М.: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 2005. — 432 с. — ISBN 5-211-05021-5.
39. Шеин Е. В., Рыжова И. М. Математическое моделирование в почвоведении: учебник. — М., 2016.
40. Юдина А. В., Фомин Д. С. Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. — 2023. — № 115. — С. 87–106.
41. Abramyan A., Ezhelev Z., Umarova A., Suslenkova M., Romanenko K., Ivanova A. Effects of freezing-thawing cycles on porosity and geometric configuration of artificial soils in laboratory modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 862. — Art. 012037.
42. Achieng K. O. Modelling of soil moisture retention curve using machine learning techniques: artificial and deep neural networks vs support vector regression models // Computers & Geosciences. — 2019. — Vol. 133. — Art. 104320.
43. Ahrenholz B. et al. 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, № 9. — P. 1151–1173.
44. Alaoui A., Lipiec J., Gerke H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective // Soil and Tillage Research. — 2011. — Vol. 115. — P. 1–15.

45. Bai H. et al. Soil CT image quality enhancement via an improved super-resolution reconstruction method based on GAN // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2023. — Vol. 213. — Art. 108177.
46. Ball B. C. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation // *European Journal of Soil Science*. — 2013. — Vol. 64, № 3. — P. 357–373.
47. Bentz J. et al. How heterogeneous pore scale distributions of wettability affect infiltration into porous media // *Water*. — 2022. — Vol. 14, № 7. — Art. 1110.
48. Bernabé Y., Li M., Mainault A. Permeability and pore connectivity: a new model based on network simulations // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2010. — Vol. 115, № B10.
49. Blanco-Canqui H., Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till // *Soil and Tillage Research*. — 2007. — Vol. 95, № 1–2. — P. 240–250.
50. Bronick C. J., Lal R. Soil structure and management: a review // *Geoderma*. — 2005. — Vol. 124, № 1–2. — P. 3–22.
51. Brooks R. H., Corey A. T. Hydraulic properties of porous media and their relationship to drainage design. — Fort Collins, 1963.
52. Buades A., Coll B., Morel J. M. Non-local means denoising // *Image Processing On Line*. — 2011. — Vol. 1. — P. 208–212.
53. Chen C., Kerber M. Persistent homology computation with a twist // *European Workshop on Computational Geometry*. — 2011. — Vol. 11. — P. 197–200.
54. Chen P. E. et al. Hierarchical n-point polytope functions for quantitative representation of complex heterogeneous materials and microstructural evolution // *Acta Materialia*. — 2019. — Vol. 179. — P. 317–327.
55. Chen S., Li H., Jiao Y. Dynamic reconstruction of heterogeneous materials and microstructure evolution // *Physical Review E*. — 2015. — Vol. 92, № 2. — Art. 023301.
56. Cheng Q. et al. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles // *Journal of Hydrology*. — 2021. — Vol. 593. — Art. 125640.

57. Dexter A. R. Physical properties of tilled soils // *Soil and Tillage Research*. — 1997. — Vol. 43, № 1–2. — P. 41–63.
58. Diel J., Vogel H. J., Schlüter S. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics // *Geoderma*. — 2019. — Vol. 345. — P. 63–71.
59. Dong H., Blunt M. J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images // *Physical Review E*. — 2009. — Vol. 80, № 3. — Art. 036307.
60. Dullien F. A. L. Porous media: fluid transport and pore structure. — London: Academic Press, 2012.
61. Estabragh A. R., Moghadas M., Moradi M., Javadi A. A. Consolidation behavior of an unsaturated silty soil during drying and wetting // *Soils and Foundations*. — 2017. — Vol. 57, № 2. — P. 277–288.
62. Fatt I. The network model of porous media // *Transactions of the AIME*. — 1956. — Vol. 207, № 1. — P. 144–181.
63. Fomin D. S. et al. Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle // *Geoderma*. — 2023. — Vol. 432. — Art. 116401.
64. Fu Q. et al. The critical depth of freeze-thaw soil under different types of snow cover // *Water*. — 2017. — Vol. 9, № 6. — Art. 370.
65. Furat O. et al. Description of ore particles from XMT images, supported by SEM-based image analysis // *arXiv*. — 2018. — Art. arXiv:1806.03239.
66. Gerke K. M. et al. Going submicron in the precise analysis of soil structure: a FIB-SEM imaging study at nanoscale // *Geoderma*. — 2021. — Vol. 383. — Art. 114739.
67. Gerke K. M. et al. Improving pattern reconstruction using directional correlation functions // *Europhysics Letters*. — 2014. — Vol. 106, № 6. — Art. 66002.
68. Gerke K. M. et al. 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. — Paper D023S014R002.
69. Gerke K. M. et al. 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. — Vol. 255. — Art. 106790.
70. Gerke K. M. et al. Universal stochastic multiscale image fusion: an example application for shale rock // *Scientific Reports*. — 2015. — Vol. 5, № 1. — Art. 15880.
71. Gerke K. M., Karsanina M. V. Improving stochastic reconstructions by weighting correlation functions in an objective function // *Europhysics Letters*. — 2015. — Vol. 111, № 5. — Art. 56002.
72. Gerke K. M., Karsanina M. V., Skvortsova E. B. Description and reconstruction of the soil pore space using correlation functions // *Eurasian Soil Science*. — 2012. — Vol. 45. — P. 861–872.
73. Ghanbarian-Alavijeh B. et al. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data // *Pedosphere*. — 2010. — Vol. 20, № 4. — P. 456–465.
74. Gijssman A. J., Jagtap S. S., Jones J. W. Wading through a swamp of complete confusion: how to choose a method for estimating soil water retention parameters for crop models // *European Journal of Agronomy*. — 2002. — Vol. 18, № 1–2. — P. 77–106.
75. Hashemi M. A. et al. A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing // *Acta Geotechnica*. — 2014. — Vol. 9. — P. 831–846.
76. Haverkamp R. et al. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration // *Soil Science Society of America Journal*. — 1977. — Vol. 41. — P. 285–294. — DOI: 10.2136/sssaj1977.03615995004100020024x.
77. 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.
78. Ivonin D. et al. Experimental data showing the effect of wetting on soil structure transformations: 3D images // *Data in Brief*. — 2022. — Vol. 41. — Art. 107928.
79. Ivonin D. et al. Quantitative analysis of pore space structure in dry and wet soil by

- integral geometry methods // *Geosciences*. — 2020. — Vol. 10, № 9. — Art. 365.
80. Jennings J. B. Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology // *AAPG Bulletin*. — 1987. — Vol. 71, № 10. — P. 1196–1209.
81. Jensen J. L. et al. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability // *Geoderma*. — 2019. — Vol. 337. — P. 834–843. Torrance J. et al. X-ray computed tomography of frozen soil // *Cold Regions Science and Technology*. — 2008. — Vol. 53, № 1. — P. 75–82.
82. Jiang F., Tsuji T., Shirai T. Pore geometry characterization by persistent homology theory // *Water Resources Research*. — 2018. — Vol. 54, № 6. — P. 4150–4163.
83. Jiao Y., Stillinger F. H., Torquato S. A superior descriptor of random textures and its predictive capacity // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2009. — Vol. 106, № 42. — P. 17634–17639.
84. Johannes A., Matter A., Schulin R., Weiskopf P., Baveye P. C., Boivin P. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils: does clay content matter? // *Geoderma*. — 2017. — Vol. 302. — P. 14–21.
85. Karsanina M. V. et al. Compressing soil structural information into parameterized correlation functions // *European Journal of Soil Science*. — 2021. — Vol. 72, № 2. — P. 561–577.
86. Karsanina M. V. et al. Enhancing image resolution of soils by stochastic multiscale image fusion // *Geoderma*. — 2018. — Vol. 314. — P. 138–145.
87. Karsanina M. V. et al. Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure // *PLoS ONE*. — 2015. — Vol. 10, № 5. — Art. e0126515.
88. Kay B. D. Soil structure and organic carbon: a review // *Soil Processes and the Carbon Cycle*. — 2018. — P. 169–197.
89. Khirevich S. et al. Impact of conduit geometry and bed porosity on flow and dispersion in noncylindrical sphere packings // *Analytical Chemistry*. — 2007. — Vol. 79, № 24. — P. 9340–9349.
90. Khirevich S., Yutkin M., Patzek T. W. Correct estimation of permeability using

- experiment and simulation // *Physics of Fluids*. — 2022. — Vol. 34, № 12.
91. Koekkoek E. J. W., Booltink H. Neural network models to predict soil water retention // *European Journal of Soil Science*. — 1999. — Vol. 50, № 3. — P. 489–495.
92. Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties // *Water Resources Research*. — 1996. — Vol. 32. — P. 2697–2703. — DOI: 10.1029/96WR01776.
93. Kosugi K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention // *Water Resources Research*. — 1994. — Vol. 30. — P. 891–901. — DOI: 10.1029/93WR02931.
94. 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.
95. Leuther F., Schlüter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties // *SOIL Discussions*. — 2021.
96. Li X. et al. Three-dimensional multiscale fusion for porous media on microtomography images of different resolutions // *Physical Review E*. — 2020. — Vol. 101, № 5. — Art. 053308.
97. Liu B. et al. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography // *Soil and Tillage Research*. — 2021. — Vol. 206. — Art. 104810.
98. Ma R. et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography // *Soil and Tillage Research*. — 2015. — Vol. 149. — P. 1–11.
99. Ma S., Mason G., Morrow N. R. Effect of contact angle on drainage and imbibition in regular polygonal tubes // *Colloids and Surfaces A*. — 1996. — Vol. 117, № 3. — P. 273–291.
100. Mahabadi N. et al. The water retention curve and relative permeability for gas production from hydrate-bearing sediments: pore-network model simulation // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2016. — Vol. 17, № 8. — P. 3099–

- 3110.
101. Mooney S. J. et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil // *Plant and Soil*. — 2012. — Vol. 352, № 1–2. — P. 1–22.
102. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // *Water Resources Research*. — 1976. — Vol. 12, № 3. — P. 513–522.
103. Øren P. E., Bakke S., Arntzen O. J. Extending predictive capabilities to network models // *SPE Journal*. — 1998. — Vol. 3, № 4. — P. 324–336.
104. Oztas T., Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability // *Catena*. — 2003. — Vol. 52, № 1. — P. 1–8.
105. Pachepsky Y. A., Rawls W. J., Lin H. S. Hydropedology and pedotransfer functions // *Geoderma*. — 2006. — Vol. 131, № 3–4. — P. 308–316.
106. Pachepsky Y. A., Timlin D., Varallyay G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data // *Soil Science Society of America Journal*. — 1996. — Vol. 60, № 3. — P. 727–733. Pachepsky Y., Rawls W. J. (eds.). *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. — Amsterdam: Elsevier, 2004. — Vol. 30.
107. 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, № 2. — P. 305–317.
108. Pires L. F., Auler A. C., Roque W. L., Mooney S. J. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles // *Geoderma*. — 2020. — Vol. 362. — Art. 114103.
109. Pires L. F., Bacchi O. O., Reichardt K. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis // *Soil and Tillage Research*. — 2007. — Vol. 94, № 2. — P. 537–545.
110. Pires L. F., Bacchi O. O., Reichardt K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. — 2005. — Vol. 229, № 3–4. — P. 443–

- 456.
111. Postnicov V. et al. Evaluation of classical correlation functions from 2/3D images on CPU and GPU architectures: introducing CorrelationFunctions.jl // *Computer Physics Communications*. — 2024. — Vol. 299. — Art. 109134.
112. Postnicov V. et al. The 2- and 3-point surface correlation functions calculations: from novel exact continuous approach to improving methodology for discrete images // *Physica A*. — 2023. — Vol. 628. — Art. 129137.
113. Rabot E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review // *Geoderma*. — 2018. — Vol. 314. — P. 122–137.
114. Radcliffe D. E., Šimůnek J. *Soil physics with HYDRUS: modeling and applications*. — Boca Raton : CRC Press, 2018.
115. Rangel D. P. et al.. Rapid prototyping and 3-D printing of experimental equipment in soil science research // *Soil Science Society of America Journal*. — 2013. — Vol. 77, № 1. — P. 54–59.
116. Samarin A. et al. Robust surface-correlation-function evaluation from experimental discrete digital images // *Physical Review E*. — 2023. — Vol. 107, № 6. — Art. 065306.
117. Schaap M. G., Leij F. J., Van Genuchten M. T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*. — 2001. — Vol. 251, № 3–4. — P. 163–176.
118. 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. Sholokhova Y., Kim D., Lindquist W. B. Network flow modeling via lattice-Boltzmann based channel conductance // *Advances in Water Resources*. — 2009. — Vol. 32, № 2. — P. 205–212.
119. Skvortsova E. B. et al. The impact of multiple freeze–thaw cycles on the microstructure of aggregates from a soddy-podzolic soil: a microtomographic analysis // *Eurasian Soil Science*. — 2018. — Vol. 51, № 2. — P. 190–198.
120. Soon Y. K., Abboud S. A comparison of some methods for soil organic carbon determination // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. —

1991. — Vol. 22, № 9–10. — P. 943–954.
121. Taina I. A. et al. Quantification of freeze–thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography // *Canadian Journal of Soil Science*. — 2013. — Vol. 93, № 4. — P. 533–553.
122. Tolstygin K. D. et al. Morphological and topological dynamics of soil pore structure during wetting-drying // *Soil and Tillage Research*. — 2026.
123. Tolstygin K. D. et al. Morphological and topological dynamics of soil pore structure during wetting-drying // *Soil and Tillage Research*. — 2025.
124. Tolstygin K. D. et al. Soil structural transformation under multiple freeze–thaw cycles with comprehensive morphological and topological analysis: the hypothesis of periodicity // *Soil and Tillage Research*. — 2026.
125. Tolstygin K. D. et al. Soil structural transformation under multiple freeze–thaw cycles with comprehensive morphological and topological analysis: the hypothesis of periodicity // *Soil and Tillage Research*. — 2025.
126. Torquato S. *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties*. — New York : Springer, 2002.
127. 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. — Art. W07406.
128. Van Bochove E., Prévost D., Pelletier F. Effects of freeze–thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil // *Soil Science Society of America Journal*. — 2000. — Vol. 64, № 5. — P. 1638–1643.
129. 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, № 5. — P. 892–898.
130. Van Genuchten M. T., Leij F. J., Yates S. R. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. — Ada (OK): Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 1992.
131. Van Vliet-Lanoë B., Fox C. A. Frost action // *Interpretation of*

- micromorphological features of soils and regoliths. — Amsterdam: Elsevier, 2018. — P. 575–603.
132. 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, № 1. — P. 99–105.
133. Vogel H. J. et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions // *European Journal of Soil Science*. — 2022. — Vol. 73, № 1. — Art. e13152.
134. Wang J. et al. Influence of soil wetting and drying cycles on soil detachment // *AgriEngineering*. — 2022. — Vol. 4, № 2. — P. 533–543.
135. Wang L. et al. Structural changes of compacted soil layers in northeast China due to freezing-thawing processes // *Sustainability*. — 2020. — Vol. 12, № 4. — Art. 1587.
136. Wu Y. et al. Multiscale modeling of shale samples based on low- and high-resolution images // *Marine and Petroleum Geology*. — 2019. — Vol. 109. — P. 9–21.
137. 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.
138. 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.
139. Yudina A., Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: the unity of aggregates and pores // *Geoderma*. — 2023. — Vol. 434. — Art. 116478.
140. Zhang Z. L., Cui Z. D. Effects of freezing-thawing and cyclic loading on pore size distribution of silty clay by mercury intrusion porosimetry // *Cold Regions Science and Technology*. — 2018. — Vol. 145. — P. 185–196.
141. Zubov A. S. et al. In search for representative elementary volume (REV) within heterogeneous materials: a survey of scalar and vector metrics using porous media as an example // *Advances in Water Resources*. — 2024. — Vol. 192. —

Art. 104762.

142. 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, № 5. — Art. 055304.