

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи



Калинин Тимофей Геннадьевич

**Томографические показатели в современных
агрофизических исследованиях почв**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор
Шеин Евгений Викторович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Актуальность	3
Защищаемые положения	7
Теоретическая и практическая значимость работы.....	9
Методология исследования.....	9
Личный вклад автора	10
Степень достоверности и апробации работы	10
Публикации.....	11
Благодарности	11
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	12
1.1. Современное состояние проблемы	12
1.2. Рентгеновская компьютерная томография.....	20
1.3. Томографические характеристики	28
1.4. Распределение пор по размерам.....	29
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
2.1. Фаустовская пойма	31
2.2. Владимирское ополье	47
2.3. Насыщение образцов водой и рентгеновская компьютерная микротомография.....	50
2.4. Функционалы Минковского и числа Бетти.....	52
2.4.1. Алгоритмы	55
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ.....	59
3.1. Распределение пор по размерам.....	59
3.1.1. Агросерая почва Владимирского ополья	59
3.1.2. Дерново-аллювиальная глееватая почва	65
3.2. Анализ функционалов Минковского и чисел Бетти для агрофизической оценки структуры порового пространства	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
ВЫВОДЫ.....	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	87
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Пористость почв является трехмерной структурой со сложной геометрией внутренней поверхности. Эта 3D матрица порового пространства и форма границы раздела фаз пора-твердофазный скелет во многом определяют механические и гидрологические характеристики почв. Применение рентгеновской компьютерной томографии дает возможность изучать структуру порового пространства почвы с высокой детализацией, зависящей от разрешающей способности томографа, не нанося вреда и не изменяя образец. Однако, для получения количественных данных о поровой структуре требуется использование разнообразных методик, включающих количественный анализ трехмерных изображений.

Множество примеров демонстрируют анализ двухмерных и трехмерных изображений почв и горных пород, используя статистические, морфологические и другие методы, имеющие свои сильные и слабые стороны, но не все из них обладают физическим обоснованием. (Иванов и др., 2019; Скворцова, Калинина, 2004). В этой работе применяются инструменты, основанные на фундаментальных научных принципах, таких как физические свойства дисперсных систем, статистика, статистическая физика, интегральная геометрия и топология. Один из первоначальных и ключевых параметров, имеющих физическое обоснование для описания порового пространства, — это распределение объемов пор в зависимости от их размеров. Этот параметр активно применяется в физике почв и служит основой для описания свойств удержания и проводимости влаги, газов и веществ в почве, определяя основные гидрофизические характеристики (кривую водоудерживания), функцию влагопроводности и другие агрофизические свойства почв. Кроме того, в настоящее время внедряются

новые методы топологии, в частности функционалы Минковского – четыре основных геометрических и топологических характеристики, которые ставятся в соответствие трехмерному объекту с целью описания его структуры, и с точностью до множителя соответствуют объему пор, площади поверхности пор и интегральной средней кривизне границы раздела фаз поратвердофазный скелет. Также используется характеристика Эйлера-Пуанкаре сложного (выпуклого/вогнутого) порового пространства, которая принимается интегральной характеристикой сложности пористого тела (San José Martínez et al., 2018).

В данной работе методология анализа внутренней геометрии структуры порового пространства применена для образцов различных почв в сухом и близком к насыщению влагой состояниях с целью количественной демонстрации происходящих в почве изменений (Сорочкин, 1991; Шеин, 2005). Были получены томографические изображения нескольких образцов почв в сухом состоянии, после чего образцы были насыщены жидкостью и повторно для тех же образцов были получены томографические изображения. В отличие от работ, в которых исследуется эволюция функционалов Минковского в процессе эрозии и дилатации порового пространства, в данном исследовании предлагается использовать морфологическую операцию «открытия» (morphological opening operation) (Said et al., 2016), которая позволяет построить кумулятивные и некумулятивные распределения функционалов Минковского по размерам пор в привычных метрических единицах. Также предлагается анализировать числа Бетти порового пространства в дополнение к функционалам Минковского, поскольку они имеют весьма наглядную интерпретацию: первое число Бетти соответствует числу отдельных пор, а второе число Бетти – числу туннелей в поровом пространстве образца почвы.

В связи с современным состоянием и развитием почвенных исследований, практических требований в условиях изменяющегося климата

количественная оценка агрофизического состояния, его изменения чрезвычайно актуальны при современных условиях быстро изменяющегося климата, агрогенных воздействий. Традиционные агрофизические показатели, такие как гранулометрический состав, плотность, агрегатный состав, водоустойчивость, пористость и другие свойства дают богатую информацию в отношении определенного направления изменений. Но далеко не всегда эта информация достаточно полная и имеет цифровое обеспечение. С появлением новых средств, в частности, томографии структуры порового пространства, задача количественной оценки структуры порового пространства, как основного определяющего агрофизического состояния свойства, является практически важной и научно актуальной.

Цель работы:

Обосновать количественные томографические показатели для современных агрофизических исследований пахотных почв.

Поставлены следующие задачи:

1. Изучить количественные агрофизические показатели некоторых пахотных суглинистых почв и структуры порового пространства почв на современном этапе развития агрофизических исследований.
2. Сравнить количественные показатели структуры порового пространства некоторых почв в отношении характеристики их агрофизического состояния на основании распределения пор по размерам.
3. Предложить и апробировать количественные показатели распределения пор по размерам для двух стабильно различных равновесных состояний почвы как сравнительно-аналитическую оценку их агрофизического состояния.
4. Обосновать использование некоторых количественных показателей оценки структуры порового пространства в виде оценки порового пространства почв по функционалам Минковского, характеристике Эйлера-Пуанкаре и числам Бетти для современных агрофизических исследований.

Степень разработанности темы исследования

В литературе есть немало работ, посвященных теме изучения порового пространства почв с привлечением различных статистических и морфологических методов (Иванов и др., 2019; Скворцова, Калинина, 2004). Кроме того, можно проследить эволюцию работ, посвященных применению методов интегральной геометрии и морфологического анализа: начиная с ранних работ, где исследуются искусственно сгенерированные среды и двумерные объекты (Arns et al., 2004; Mecke, Wagner, 1991; Arns et al., 2005), заканчивая более поздними, где исследуются трехмерные объекты с помощью томографов (Feng et al., 2019; Said et al., 2016; San José Martínez et al., 2015). В отдельности, в работе (San José Martínez et al., 2015) анализируется внутренняя геометрия образцов почвы в различных состояниях сжатия-расширения. Работы (Wang et al., 2012; San José Martínez et al., 2013) показывают, насколько широк потенциал применения функционалов Минковского и методов интегральной геометрии к объектам различного масштаба и сложности внутренней структуры.

Кроме всего вышеперечисленного, хотелось бы отметить работы, показывающие связь функционалов Минковского с различными гидрологическими и физическими свойствами почв и характеристиками других фаз, особенно жидкой (Berg, 2014; Akai et al., 2019; McClure et al., 2018; Vogel et al., 2010; San José Martínez et al., 2018; Ohser et al., 2009; Schäffer, 2008; Vogel, 2002). Функционалы Минковского широко применяются при анализе почв и порового пространства в работах (Dong, 2022; Thakur, 2021; Fedotov et al., 2021; Wildenschild et al., 2013). Особого внимания заслуживает работа К. М. Герке с соавторами (Герке и др., 2012), в которой томографический метод был применен для изучения порового пространства образцов почв и сравнивался общепринятым микроморфологическим методом.

Указанные виды порового пространства, соотношение их объемов, особенности распределений во влажном и сухом состоянии почвы, - все в настоящее время входит в понятие структура порового пространства почв. Этот термин в указанном понимании мы будем использовать в данной работе. До настоящего времени широко использовался термин агрегатная структура почвы, как размеры, формы агрегатов. Однако, в отношении взаимного их расположения и формирования структуры порового пространства известно недостаточно. По предложениям А.Г.Дояренко в настоящее время устоялись понятия агрегатная и общая пористость и, соответственно, межагрегатная пористость. Однако, эти понятия, которые в настоящее время приобрели ответственный за проводимость характер, - соответственно депозитарная или формирующая запасы веществ и микроорганизмов (агрегатная) и транспортная (ответственная за транспорт веществ, межагрегатная). Если такие выделения в пористости и в почвенной структуре сделаны, то важно знать не только объёмы пор (агрегатных и межагрегатных), но и форму этих пор, формирующуюся при взаиморасположении почвенных агрегатов. Таким образом, исследование структуры порового пространства, его изменения в разных гидрологических состояниях почв составляют научная актуальность данной работы.

Защищаемые положения

1. Распределение объемов пор по размерам – одна из основных агрофизических характеристик, с помощью которой можно исследовать и анализировать поровое пространство, его изменение в различных состояниях почвы. Эта характеристика дает количественную информацию об агрофизических особенностях структуры порового пространства почв при томографическом анализе ненарушенных почвенных образцов во влажном

(близком к наименьшей влагоемкости, НВ) и сухом (близком к гигроскопической влажности) состояниях.

2. Основной диапазон набухания приходится на микро- мезо- поры, диаметрами от 0.01 до 0.07 мм. Количество таких пор, отвечающих за запасы доступной для растений влаги, увеличивается при набухании в несколько раз. Количество макропор всех диаметров уменьшается при насыщении почвы водой. Но в некоторых горизонтах, благоприятных по агрофизическим свойствам, при общем снижении макропористости, обнаружены поры определённой топологической конфигурации, количество которых увеличивается.

3. Использование функционалов Минковского и чисел Бетти для томографических распределений объемов пор во влажном и сухом состояниях позволяют количественно характеризовать структуру порового пространства почв, как одного из современных количественных показателей агрофизического состояния почв.

Научная новизна

Впервые в ненарушенных образцах горизонтов агросерой и дерново-аллювиальной глееватой суглинистых почвах исследованы томографическим методом распределения объемов пор по размерам. Показано, что в качестве агрофизической качественной оценки необходимо исследовать и проводить сравнительно-аналитическую характеристику структуры порового пространства в виде распределения объемов пор по их размерам в сухой и увлажненной почвах. Различия распределений обусловлены пространственными изменениями порового пространства, которые указывают на подвижность и возможность трансформации структуры порового пространства почвы, в частности, при распространении корневой системы растений, микробиоты (Сорочкин, 1982; Сорочкин, 1991; Березин, 1995). Предложен подход к агрофизической характеристике почв, основанный на изучении распределений пор по размерам (в томографическом диапазоне

диаметров пор) в воздушно-сухом и близком к НВ состояниях. Обоснованы топологические характеристики порового пространства почв в виде чисел Бетти, характеристики Эйлера-Паункаре. Численно продемонстрированы изменения в структуре порового пространства при насыщении почвы водой и значений чисел Бетти, которые могут быть использованы для количественного анализа изменений порового пространства при агрофизических исследованиях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Описана и математически обоснована методика топологического изучения порового пространства почв по томографическим данным. Обоснованы томографические характеристики порового пространства при агрофизических исследованиях, показана их связь с классическими почвенно-физическими свойствами. Полученные данные могут быть использованы при оценке эволюции поровой структуры, движении растворов и газов, а также при оценке агрофизического состояния почвы. Возможно создание базы данных томографических свойств, которая может быть основой для контроля и прогноза физической деградации почв.

Методология исследования

Исследование структуры почвы основано на использовании принципов и идей системного подхода, теоретические основы которого были заложены в работах А.Г. Дояренко (1924), Н.А. Качинского (1965), И.Б. Ревута (1969), А.Д. Воронина (1984), Е.В. Шеина (1988, 2005), А.Б. Умаровой (2011), Dexter A. R. (1988), Lal R. (1991) и др. В работе использовались как классические методы физики почв, так и современные подходы к исследованию структуры порового пространства с использованием компьютерной томографии с соответствующими методами анализа. Описана новая методология

топологической оценки порового пространства почв на основании томографических данных, полученных в насыщенных (при влажности, близкой к НВ) и не насыщенных водой (воздушно-сухих) почвах при различном разрешении.

Структура и объем работы

Диссертационная работа содержит 114 страниц, состоит из оглавления, введения, 3 основных глав: 1 глава - обзор научной литературы, 2 глава - разбор исследуемых объектов и методов, 3 глава - полученные результаты и их обсуждение, заключения, выводов, списка литературы из 125 источников, из которых 45 отечественных и 80 зарубежных, содержит 11 таблиц, 38 рисунков и приложения.

Личный вклад автора

Заключается в анализе научных работ по теме исследования, проведении полевых и лабораторных исследований, обработке полученных экспериментальных данных, обобщении полученных данных, представлении результатов исследования на научных конференциях, подготовке публикаций в журналах и сборниках.

Степень достоверности и апробации работы

Исследование проводилось с использованием современного оборудования и классических методов физики почв, которые при высокой точности и большом количестве повторностей доказали свою эффективность. Результаты работы опубликованы в сборниках научных конференций и рецензируемых журналах, входящих в SCOPUS и WOS.

Публикации

По материалам научной работы опубликовано 4 работы: из них 3 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных WoS, Scopus и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова. В статьях, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору Евгению Викторовичу Шеину, за оказанную поддержку, мудрые советы и помощь на протяжении всего обучения; кафедре физике и мелиорации почв факультета почвоведения, особенно с.н.с. А.В. Дембовецкому за помощь в проведении экспериментальной части работы, а также обсуждения и советы по работе. Благодарю аспирантов физического и механико-математического факультетов МГУ: Д.А. Ивонина и Д.Г. Калнину соответственно за вовлечённость и обсуждение математической составляющей работы. Отдельная благодарность Почвенному институту и его сотрудникам, в частности К.Н. Абросимову за помощь в проведении экспериментов.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-05112 мк) – 50% и по теме госзадания: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления” – 50%.

Исследование выполнено с привлечением оборудования Центра коллективного пользования оборудованием «Функции и свойства почв и

почвенного покрова» ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (рег. номер 441994, <https://ckp-rf.ru/ckp/441994/>).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Современное состояние проблемы

До сих пор основные гидрологические характеристики почв, а именно коэффициент фильтрации, гидрологические константы, а также способность почвы удерживать воду (в качестве основной гидрофизической характеристики), определялись на основе экспериментов. Однако из-за необходимости в большом количестве гидрологических данных, высокой практической потребности, дороговизны и сложности определения этих свойств, специалисты в области почвоведения, мелиорации, физики почв и агрофизики начали искать соответствия между традиционными физическими свойствами почв, характеристиками твердой фазы и гидрологическими свойствами. Таким образом, в начале 19 века был открыт закон движения жидкости в капилляре Ж.Л.Пуазейлем, который описывает движение вязкой несжимаемой жидкости сквозь цилиндрическую трубу круглого сечения секундный объёмный расход (Q) прямо пропорционален перепаду давления (ΔP) на единицу длины трубы (l) и четвертой степени диаметра (d) и обратно пропорционален динамической вязкости (η) (Кершенбаум и др., 2016) при установившемся ламинарном потоке.

Уравнение Пуазейля, представленное как $Q = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \Delta P$, внушало уверенность в том, что в дисперсных пористых материалах будет наблюдаться степенная зависимость фильтрации от диаметра капилляров. Однако вскоре стало очевидно, что в почве не существует капилляров с одинаковым диаметром, а имеется распределение капилляров по размерам, что значительно усложняет использование данного физически обоснованного уравнения. Тем не менее, в середине прошлого столетия И. И. Судницын предложил степенную, статистически обоснованную зависимость

коэффициента фильтрации от пористости почв, преимущественно лессовидных. Но в некоторых случаях даже эта зависимость давала заметные отклонения, что объяснялось тем, что капилляры в почве не имеют строго цилиндрической формы, а скорее извилистые и с переменным диаметром (Зайдельман, Никифорова, 1996). Добавление поправочного коэффициента, представляющего собой параметр извилистости, определяемый как отношение общей длины капилляра к его реальной длине по вертикальной оси, не приводило к значительному улучшению результатов. Это привело к отказу от широкого использования статистической степенной зависимости. Между тем, практика, прежде всего мелиоративная, требовала расчетных зависимостей гидрологических свойств, прежде всего коэффициента фильтрации (Кф), от традиционно определяемых, в виде, например, гранулометрического состава. Так, был обоснован метод расчета междренних расстояний на основе данных по гранулометрическому составу почв (Зайдельман, 1975; Зайдельман, Банников, 1996). Наконец, в конце 20 века сформирован подход, названный педотрансферными функциями, связывающий традиционно определяемые физические свойства почв с трудноопределимыми и затратными в исследованиях почвенными свойствами и характеристиками (Boima, 1989).

Структура почвы играет ключевую роль, так как она служит основой для формирования пористости и влияет на другие свойства почвы, включая тепловые, водные и воздушные режимы, а также устойчивость к эрозии и сельскохозяйственной нагрузке. Поры почвы функционируют как хранилища для почвенной влаги, воздуха, питательных веществ для растений, микроорганизмов и почвенной фауны. Они также служат миграционными путями для переноса влаги и растворенных загрязнителей в грунтовые воды, выполняя функцию экологического связующего звена. Кроме того, почвенные поры должны функционировать как поры переменного диаметра, так как при распространении корней, жизни почвенной биоты особенно важны такие

агрофизические свойства, как изменение диаметра пор при увлажнении-иссушении, неравномерность их диаметра, служащая как для сохранения различных веществ, как вместилища живой, жидкой и газообразной фаз. На это свойство, необходимое для функционирования почв, обращали внимание отечественные агрофизики (Сорочкин, 1982; Сорочкин, 1991; Березин, 1995 и др.). Почвоведы единогласно признают важность структуры почвы и необходимость ее изучения для понимания почвенных процессов. Деграция структуры почвы признается общепринятой формой физической деграции почвы (Chan, 2003; Asaoka et al., 2000). Изменение соотношения агрегатов разного размера, влияние агрегатного состава на изменение продуктивности почвы может быть многократным и было подробно описано в опытах (Медведев, 1988; Ахромейко, 1930).

Почвенная структура, определялась некоторыми исследователями как морфологическое понятие. С этой точки зрения, по мнению (Brewer, Sleeman, 1960) и (Захарова, 2017) почв с «хорошей» или «плохой» структурой не существует. Они считают, что любая почва имеет определенную структуру, даже если она не выражена четко. Другие авторы рассматривали вопрос с агрофизической точки зрения, по мнению Н.А. Качинского (Качинский, 1947), П.В. Вершинина (Вершинин и др., 1959) и других, наиболее агрономически ценная почвенная структура состоит из агрегатов размером 0,25–10 мм. При этом традиционно считается, что почва имеет определённую структуру, которая определяется размером, формой, происхождением и взаимодействием элементарных почвенных частиц (ЭПЧ). Следовательно, важно учесть микроагрегатный состав почвы, который включает наиболее устойчивые ЭПЧ размером менее 0,25 мм. К.К. Гедройц классифицировал такие частицы как микроагрегаты (Шеин, 2005). Учитывая это, также важно описать функциональные характеристики структуры почвы, включая количественное соотношение почвенных пор и агрегатов различных размеров. Функции структуры почвы, такие как конфигурация порового пространства (геометрия

и распределение пор по размерам), прочность и устойчивость к нагрузкам, являются неотъемлемой частью самого понятия структуры почвы (Воронин, 1984).

Структура почвы так же определяется некоторыми авторами как взаимодействие твердых частиц и пустот с точки зрения их размера, формы и расположения, а также наличие взаимосвязанных пор, которые удерживают и обеспечивают движение жидкостей и веществ, как органических, так и неорганических. Кроме того, структура почвы влияет на способность к росту и развитию корней (Lal, 1991) не только как влагоудерживающая система, но и как динамичная, пространственно подвижная система, изменяющая свойства при различной влажности. В этом особо важное современное качество структуры порового пространства, на которое особо обращено внимание в данной работе.

И в настоящее время понятие почвенной структуры стало более комплексным и включает в себя не только агрегатный состав, но и поровое пространство, занятое твердой фазой, водой и воздухом, а также их взаимодействие. Эта структура оказывает влияние на физические свойства почвы, такие как водопроницаемость, пористость и такие механические свойства как водопрочность и механическая прочность (Качинский, 1965; Александрова, Гречин, 1969; Воронин, 1986). Такой подход к пониманию почвенной структуры позволяет лучше понять ее значение для плодородия почвы.

Можно встретить термины «структура» и «архитектура» почвы (Nunan, 2003; Van Veen et al., 1990; Baldock, 2000). Это связано с тем, что существует связь между ориентацией пор и частиц твердой фазы почвы и результирующими функциями. Взаимосвязь проявляется в способности к транспортировке воды, воздуха, питательных веществ в почве. Понимание архитектуры порового пространства было развито в отношении макропор, которые представляют собой важные пути движения влаги (Умарова, 2011)

или характеристику путей воздушной и водной транспортировки (Helliwell et al., 2013; Schnoor, 1996; Campbell, 1985).

Современные ученые рассматривают комбинацию порового пространства и твердых частиц как трехмерную структурную сеть, с чередованием пора – твёрдая фаза. Эта трехмерная структура формируется благодаря процессам, происходящим параллельно с ростом корней, активностью педобионтов и изменения температурных условий в почве. Считается, что эти процессы происходят в рамках первичного порового пространства, которое разделяет почвенные агрегаты, связанные как органическим материалом, так и физико-химическими взаимодействиями (Schlüter et al., 2022). Разные процессы приводят к формированию определенной структуры почвы в той или иной точке, оказывая на это большее или меньшее влияние. Почва, формирующаяся под воздействием определенных условий и представляющая собой комбинацию пор и твердых частиц, служит ареалом для многих организмов, чья жизнь связана с почвой. Структура почвы является неотъемлемым условием для перемещения воды, минеральных солей, питательных веществ в различных направлениях, а также для удержания воды. По этой причине некоторые считают структуру почвы сложной гетерогенной биогеохимической границей (Totsche et al., 2010; Kleber et al., 2021; Oades, 1993), формирование которой позволяет реализовать все функции, присущие почве. К таким функциям относятся, например, прорастание семян, увеличение их объема, накопление воды, участие в обороте веществ и энергии, деградация ксенобиотиков и другие.

В настоящее время агрофизически важные функции почвы, такие как основная гидрофизическая характеристика и гидравлическая проводимость, в основном рассчитываются с использованием педотрансферных функций (ПТФ). ПТФ были представлены ученым Johan Bouma с соавторами в 1989 (Bouma, 1989; Lanen et al., 1989) как метод прогнозирования сложных и экономически затратных свойств почвы на основе более простых, найденных в базах данных. Они преобразуют традиционно измеряемые свойства почвы в

гидрологические свойства, экономя время и ресурсы. ПТФ используются для оценки коэффициента фильтрации и других агрофизических характеристик путем преобразования данных о текстуре почвы, содержании органического углерода, эффективной пористости и плотности в целях прогнозирования.

Большая часть педотрансферных функций имеет основу на измеренном процентном содержании песка, пыли, глины, органических веществ и плотности почвы, что позволяет обеспечить изменение гидравлических свойств в соответствии с текстурным треугольником (Wösten et al., 1995). Встречаются в настоящее время ПТФ, созданные на основе регрессионной статистической модели (Wösten et al., 1999; Hajnos et al., 2006) или разработанные на основе математических моделей с использованием метода линейной или нелинейной регрессии, или с использованием метода нейронной сети, как в одной из популярных программ RETC (Schaap et al., 2001).

Важно отметить, что практически все предложенные ПТФ в своей структуре используют статистические методы для связи гидрологических свойств с гранулометрическим составом, содержанием органического вещества и плотностью почвы.

Нередко авторы определяли ПТФ как статистические зависимости, не задумываясь над смысловым значением, над физической основой взаимосвязи искомого свойства и свойств предикторов. Более того, среди свойств-предикторов гидрологических свойств почв (Кф, ОГХ, гидрологические константы) утвердилось мнение, что достаточно основных фракций гранулометрического состава, плотности почвы и содержания органического вещества для успешного предсказания; необходимо лишь большое количество соответствующих дат (т.е. достоверные базы данных).

Но классическая физика и гидрология почв указывает, что пористость агрегатов, их устойчивость, наличие межагрегатной и межпедной пористости, структуры порового пространства определяют гидрологическое поведение почв. В связи с этим широко бытующим мнением о достаточности всего 3-5

классических легко определяемых свойств при их большой повторности и использованием надежного математического аппарата практически все используемые ПТФ имеют ряд недостатков, – (1) они достаточно хорошо предсказывают величины гидрологических свойств в рамках тех массивов почвенных данных, на которых эти ПТФ и были получены, (2) использование статистически обоснованных ПТФ для иных почвенно-климатических регионов оказывается весьма сомнительным и (3) несоответствие методов определения свойств-предикторов в расчетном для обоснования ПТФ и анализируемом массивах нередко приводят к существенным систематическим ошибкам (например, смена седиментометрического метода на лазерно-дифракционный приводит к неизбежности вносить поправки в обоснованные ранее, при седиментометрическом методе ПТФ). Поэтому при общем благоприятном обзоре литературы использования ПТФ, указывающем на их повсеместное использование, проверку, высокую статистическую значимость и достоверности анализов и пр., все же почвенное многообразие порового пространства почв проявляется как в пределах профиля почвы, так и в почвенном покрове, нередко возникали случаи, когда метод ПТФ давал значительные ошибки. Несмотря на эти отдельные случаи, физики почв полны оптимизма и повсеместно используют ПТФ для расчетов гидрологических процессов в почвах, создавая все более объемные базы данных и используя все более изощренные математические аппараты (методы нелинейной регрессии, искусственных нейронных сетей, методы поддержания решений и прочее) для обнаружения устойчивых взаимосвязей гидрологических свойств и физических параметров.

В настоящее время появилась еще одна возможность рассчитывать (восстанавливать) важнейшие гидрологические свойства почв, используя современные методы и подходы. Прежде всего, на основе использования томографических данных.

Исследование связи гидрологических параметров, например коэффициента фильтрации, не только с пористостью, но и с определенными томографическими параметрами - характеристиками порового пространства, представляет собой интересную и чрезвычайно важную задачу. В этом направлении основные сложности представляют: насколько физически обоснованы заданные томографические параметры, рассчитанные на основе геометрических характеристик томографических изображений, как и каким образом томографически полученные характеристики влияют на общее значение коэффициента фильтрации. Естественно, томографически определенные значения не являются строго постоянными, а также, вероятно, представляют собой некоторые распределения в зависимости от объема образца, разрешающей способности томографа, метода реконструкции, бинаризации и избавления от шумов. Как получить эти распределения и как их использовать (в частности, вопрос - какой параметр распределения использовать?). Проблема репрезентативности томографических изображений – это данные о поровом пространстве лишь некоторого ограниченного почвенного монолита, который только в определенной степени представляет собой гидрологически важные пустотные пространства, поскольку любой монолит «срезает» часть горизонтальных пор, что особенно актуально для микротомографии. Но внутрипочвенные потоки происходят не только вертикально, но и в разной степени в горизонтальном направлении. Об этом же говорят морфологические данные о различных типах границ между горизонтами или слоями (язычная, карманная, размытая, затечная, пилообразная и т.д.), связанные с преимущественными потоками миграции как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

Для решения подобных вопросов остро стоит вопрос о необходимости проводить эксперименты по совместному, взаимосвязанному определению классических агрофизических и томографических характеристик порового пространства на одних и тех же образцах, параллельно. Только с помощью

таких тщательных экспериментов мы потенциально можем обнаружить или исключить какие-либо корреляции, например, между коэффициентом фильтрации и томографическими параметрами (Иванов и др., 2019).

1.2. Рентгеновская компьютерная томография

Рентгеновская компьютерная томография (рентгеновская КТ) — неинвазивный метод, использующий рентгеновские лучи для визуализации и анализа внутренней структуры объектов. Первые математические алгоритмы компьютерной томографии были созданы в 1917 И. Радоном, австрийским математиком. В основе метода лежит экспоненциальный закон затухания излучения, который точно применим к поглощающим материалам в рентгеновском диапазоне. Следовательно, первоначальные математические алгоритмы в основном использовались именно для рентгеновской компьютерной томографии. Значительный вклад в развитие метода внесли Алан Кормак, американский физик, и Годфри Хаунсфилд, английский инженер-физик. Кормак решил проблему реконструкции томографических изображений в 1963 году, а Хаунсфилд разработал первый компьютерный рентгеновский томограф в 1973 году. Их вклад был признан в 1979 году, когда они совместно получили Нобелевскую премию по физиологии и медицине.

Вначале томография в основном использовалась в медицине. Однако с появлением микротомографии, обеспечивающей более высокое разрешение, рентгеновская компьютерная томография стала применяться для решения задач различных научных областей, в том числе связанных с почвоведением. Пористость почвы является важнейшей характеристикой, обусловленной различными факторами: движением воды с растворенными веществами, наличием воздуха, микроорганизмов и почвенной биоты, а также проникновением корней растений и корневых волосков через почвенные поры. Важно отметить, что помимо диаметра и объема поры почвы обладают и другими свойствами, такими как извилистость, сложная форма, сцепление и т. д., которые влияют на способность почвы проводить воду и газы.

Метод рентгеновской томографии в настоящее время становится стандартом исследования строения почв, в частности их порового пространства. Предложен даже термин для обозначения пористости почвы, полученной с помощью томографа с учетом пор разной разного размера, формы других геометрических характеристик, - «структура порового пространства» (Скворцова и др., 2013).

Основным преимуществом этого метода является его способность точно и быстро анализировать трехмерную структуру порового пространства объекта, при этом время сканирования варьируется от нескольких секунд до десятка часов в зависимости от устройства и желаемого разрешения. Также томографический метод не требует разрушения образца и позволяет проводить его анализ в нативном состоянии. Кроме того, (что важно для почвоведения) полученные томограммы не зависят от влажности объекта, так как рентгеновский томограф не «видит» воду в почве. С одной стороны, это явное преимущество, позволяющее сравнительно анализировать поровое пространство почвы при различных влажностях. С другой стороны, следует учитывать, что вода в почве существенно изменяет взаиморасположение твердофазных частиц за счет набухания и усадки. К сожалению, на это аспект применения томографии мало обращают внимания. В связи с этим одной из задач данной работы было изучение структуры порового пространства в различных состояниях почвы, в частности, при насыщении почвы влагой до состояния, близкого к равновесному водонасыщенному состоянию, например, наименьшей или предельно полевой влагоемкости (НВ), и в воздушно-сухом состоянии.

Микротомография, являясь компьютерным численным методом, дает представление о пространственном строении твердофазной составляющей объекта и позволяет изучать как пустотное пространство, так и матрицу образца. Следует отметить, что, в отличие от анализа тонких срезов и сканирующей электронной микроскопии, томография не требует сушки

образцов и может проводиться при любом содержании влаги. Это не просто делает предварительную обработку сушкой ненужной, но открывает широкую область применения этой техники при различной влажности почв.

Однако в то же время этот метод имеет свои недостатки. Во-первых, можно отметить дороговизну томографии и сложность необходимого оборудования. Во-вторых, данный метод имеет ограничения по размеру образца и лимит разрешений. Также этот метод нуждается в ресурсоемких высокопроизводительных вычислениях.

Главной же проблемой при томографическом исследовании таких разнофазных объектов как почва является бинаризация и сегментация полученных изображений, т.к. в компьютерной томографии существует сложность при разделении отдельных компонентов пород, непросто различить твердую фазу, воду, органическое вещество и выделить границу между твердой фазой и порами.

Сегментация предполагает отделение определенных объектов, таких как поры, от фона для анализа и моделирования (2-D и 3-D). Было создано множество алгоритмов сегментации изображений (Coleman et al., 1979; Yanowitz et al., 1989; Pappas et al., 1989), но ни один из них не является универсальным (Muthukrishnan, Radha, 2011).

Существуют различные классификационные схемы для методов сегментации изображения, предложенные в литературе (Haralick, Shapiro, 1985; Spirkovska, 1993; Pal, Pal, 1993; Sezgin Sankur, 2004; Wirjadi, 2007). Поскольку информация о формах и размерах пор, а также о структуре твердой фазы обычно недоступна до бинаризации, методы на основе текстуры или формы по своей сути неприменимы для сегментации порового пространства и распределения фаз в геоматериалах. Наиболее широко применяемым подходом является определение глобального порога (Global thresholding) по шкале серого (Рис.1) (Iassonov et al., 2009). Этот порог определяет, что

является поровым пространством, а что твёрдую – минеральной, органической фазой.

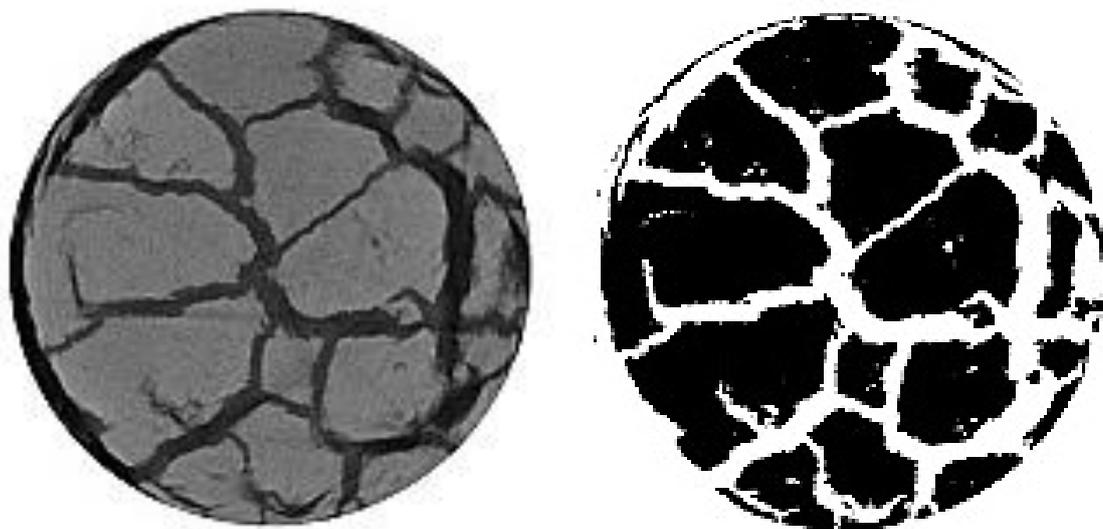


Рисунок 1. Наглядная иллюстрация бинаризации

Сегментация остается трудной и трудоемкой задачей, потому что качественное определение границ объектов в полутоновых изображениях зависит от многих факторов, влияющих на результаты. Помимо этого, при использовании алгоритмов для выполнения сегментации и бинаризации, только методы CL-Otsu (Otsu, 1979) и CL-Ridler (Ridler, Calvard, 1978) показали согласованную производительность для большинства исследуемых образцов, с пористостью изображения, близкой к физически измеренным значениям или значениям, оцененным с помощью ручной сегментации (Iassonov et al., 2009).

Микротомограф состоит из нескольких основных частей: источника излучения (рентгеновского, нейтронного или гамма-излучения), вращающегося столика для образцов и ПЗС-матрицы в качестве приемника излучения (Рис.2).

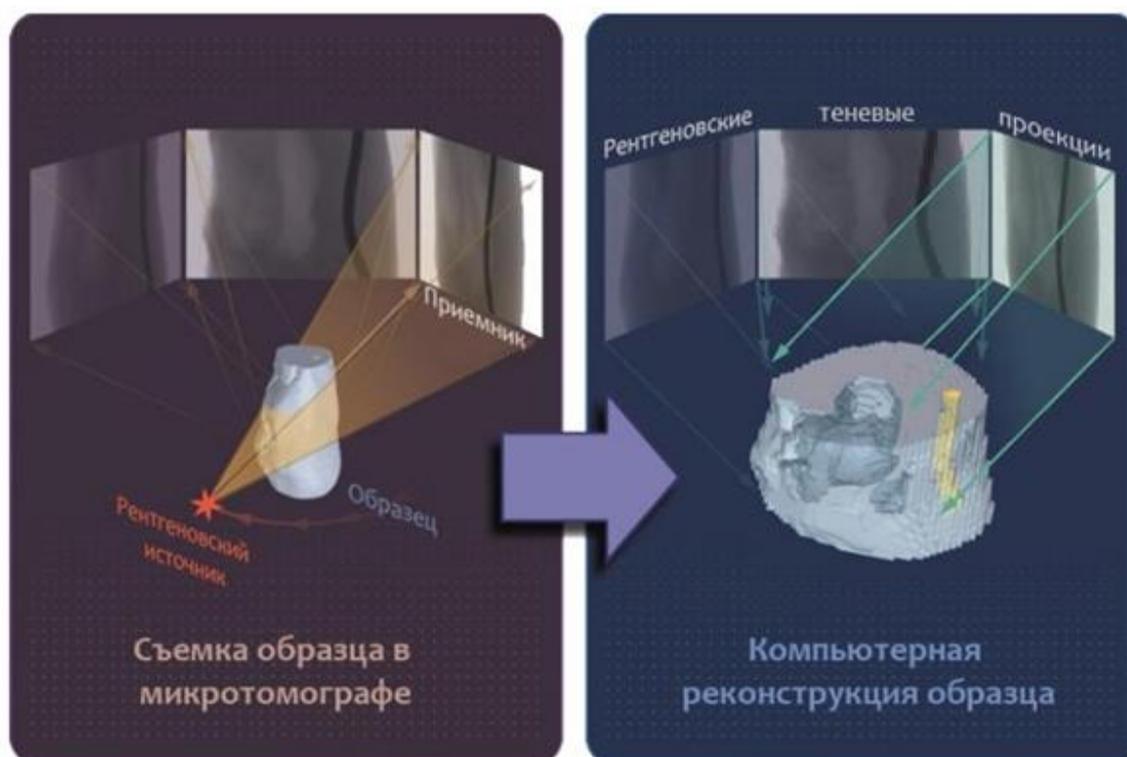


Рисунок 2. Строение микротомографа (SkyScan, 2014)

Излучение устройства исходит от рентгеновской трубки, которая представляет собой электровакуумное устройство, содержащее источник электронного излучения (катод) и мишень, где они замедляются (анод). Схематические рентгеновская трубка изображена на рисунке 4. Катод нагревается высоким напряжением, подаваемым по отрицательному высоковольтному кабелю от накального трансформатора, расположенного в генераторном устройстве.

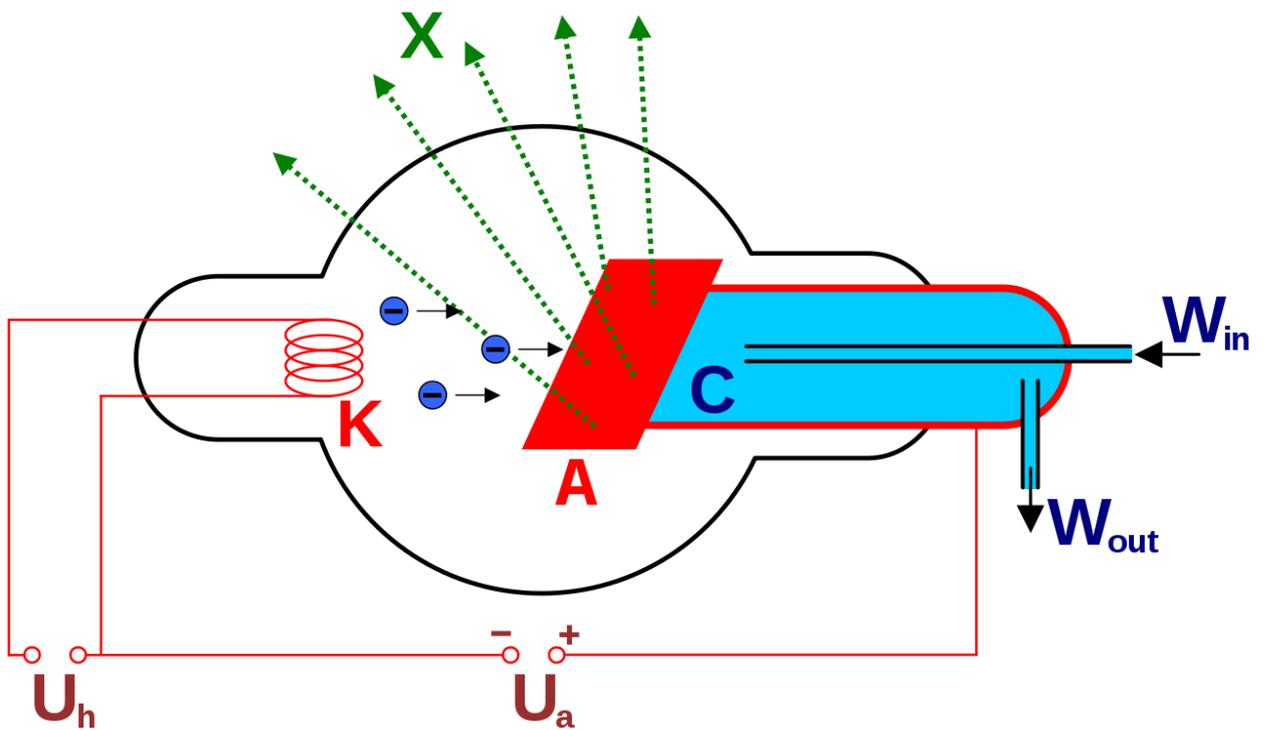


Рисунок 3. Схематическое изображение рентгеновской трубки (Hmilch, 2008)

Для оценки плотности структур, видимых с помощью компьютерной томографии, используется шкала, которая отображается на мониторе в виде черно-белого изображения спектра. В двумерных изображениях наименьшая единица известна как пиксель, а в трехмерных изображениях она называется вокселем и представляет собой минимальный объемный элемент изображения (Герке и др., 2012).

Теневая проекция — это изображение, полученное путем поворота образца на определенный угол. Яркость этого изображения зависит от того, сколько излучения рассеивается или поглощается материалами объекта.

Закон Бугера-Ламберта-Бера описывает поглощение, которое определяется плотностью и атомным числом материала:

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l},$$

где I — интенсивность света, прошедшего слой вещества толщиной l , I_0 — интенсивность света на входе в вещество, k_λ — показатель поглощения.

Индекс поглощения вещества определяется его свойствами и обычно зависит от длины волны λ поглощаемого света, известной как спектр поглощения вещества.

Коэффициент поглощения можно выразить как коэффициент массового поглощения, который нормирует его на плотность материала. Поглощение не зависит от физического состояния вещества (твердое, жидкое, пар). Сила сигнала, получаемого от почв, может зависеть от состава минералов, оксидов, органических веществ и воды в вокселе.

Интенсивность цвета измеряется единицами Hounsfield (Rogasik et al., 2003) и отражает коэффициент поглощения определенного объема почвы. Метод расчета и нормализации этого значения для каждого вокселя определяет интенсивность цвета после реконструкции. Таким образом, материалы с низким поглощением, такие как воздух, выглядят темнее, а материалы с высоким поглощением, такие как кутана с высоким содержанием железа, выглядят светлее. Используя различные коэффициенты поглощения различных материалов, можно разделить их на отдельные фракции. Это обычно достигается путем создания калибровочной кривой с использованием однородных образцов воды, кварца, пирита и других материалов, которые сканируются с определенной энергией излучения в томографе (Корост и др., 2010).

Серия теневых проекций используется для выполнения реконструкции, создавая набор двумерных изображений анализируемого окружения. Данные представляют собой двумерные срезы среды, в совокупности раскрывая трехмерное расположение объекта. Современные томографы часто обладают возможностью сканировать структуру образца с разрешением среза, что позволяет преобразовывать стопки изображений между различными плоскостями. Однако старые модели томографов часто не имели этой возможности, что приводило к значительному расстоянию между срезами, превышающему разрешение изображения.

Разрешение процесса сканирования зависит как от положения образца в конусе пучка излучения, так и от размеров матрицы детектора. Размер изучаемого объекта определяет разрешение: медицинские томографы достигают разрешения 100 микрон для объектов размером в несколько сантиметров. Микротомографы уменьшают размеры объектов до сантиметров и миллиметров, а нанотомографы измеряют объекты в миллиметрах. Макротомографы позволяют исследовать цилиндрические монолиты большего радиуса, вплоть до 5 см и высотой до метра с разрешением 100 микрон на пиксель. Микротомограф Bruker SkyScan 1172 позволяет исследовать образцы диаметром от 5 см до 1-2 мм с увеличением детализации анализа по мере уменьшения размера образца. Самые маленькие образцы могут достигать максимального разрешения 0,6 мкм/пиксель. Для получения комплексной информации о поровом пространстве почвы необходимо проводить исследования от макро- до микроуровня (макроуровень – профильный, микроуровень – агрегатный) (Шеин и др., 2017).

Метод рентгеновской томографии широко распространен и используется в научных исследованиях. Он предлагает преимущество сканирования образцов при различных уровнях влажности почвы, что позволяет изучать набухание и сжатие почвенной массы. Например, в конкретном эксперименте микромонолиты из различных слоев дерново-подзолистой почвы сканировались с помощью микротомографа SkyScan 1172 при полевой влажности, капиллярном насыщении почвы и в воздушно-сухом состоянии (Karsanina et al., 2015).

Микротомографическими исследованиями изучены процессы замерзания и оттаивания почв (Романенко и др. 2016; Давлетшина и др., 2014). Установлено, что при фронтальном промерзании ледяные трещины образуются преимущественно в верхней части почвы. Экспериментальные испытания с различными типами грунтов и повторным замораживанием показали, что толщина от 1000 до 2000 мкм образует активную зону

трещинообразования в цилиндрических образцах диаметром 8 мм и высотой 10 мм. Кроме того, многократное промораживание приводит к разрушению микроагрегатов почвы (Шеин и др., 2017).

Кроме того, томографический метод позволяет отслеживать различные криогенные процессы в течение определенного периода времени. С помощью томографии становится возможным различать лед, воздух и твердую матрицу и отслеживать изменения в их расположении в ходе различных процессов. Это и промерзание почвы и грунта, и образование ледяных шпирен, и взаимодействие льда со структурными компонентами твердой матрицы (Романенко и др., 2016).

1.3. Томографические характеристики

Томография, как известно, дает количественные данные по структуре порового пространства, представляя 3-х мерные изображения порового пространства почв, включая строение пор, их связность, извилистость и другие характеристики. Так, что современным томографическим изображениям ряд программ обработки дает следующие характеристики:

- общая пористость
- открытую пористость,
- закрытую пористость;
- связность пор;
- разветвленность пор;
- поверхности пересечения и некоторые другие геометрические

Общая пористость характеризует объём всего порового пространства в образце ограниченного формата после сегментации томографического изображения. Динамика общей пористости может использоваться как диагностический показатель (Belik et al., 2020). Для функциональной оценки

почв и их качественного состояния используется показатель связности порового пространства. Модели фильтрационного движения воды и воздуха требуют построенного распределения пор по размерам в объемной структуре образца. Все это можно делается на основе программного обеспечения (ImageJ, ParaView, Avizo и др.), но требует учитывать органическое вещество в почве, без чего эти модели нежизнеспособны (Абросимов и др., 2021). Открытая пористость является объёмом пор, имеющим выход за пределы образца, обычно крайне небольшого и ограниченного по размеру. Закрытая пористость, наоборот, представляет обособленные поры, не имеющие выходов за пределы томографически исследованного образца. Открытая и закрытая пористость широко используется для характеристики и оценки качества порового пространства (Скворцова и др., 2020, Fomin et al., 2023, Lavrukhin et al., 2021, Abramyan et al., 2021).

1.4. Распределение пор по размерам

Почва, как гетерогенная многофазная полидисперсная среда, имеет сложную структуру порового пространства. Поры, как внутриагрегатные, так и межагрегатные, являются важной составляющей, в них концентрируется почвенная влага и воздух, определенное соотношение которых играет ключевую роль для микроорганизмов и формирует режим аэрации и гидрологический режим (San José Martínez et al., 2018). Геометрия порового пространства тесно связана с физическими свойствами почвы такими, как: плотность почвы, плотность твердой фазы, удельная поверхность почвы и твердость. Стоит заметить, что от характера границ фаз «пора-твердофазный скелет-почвенный раствор» зависят гранулометрический состав почвы, водно-физический режим и отчасти кислотность.

Распределение пор по размерам дает емкую характеристику состояния почвы, ее гидрологических свойств; также, с помощью распределения объемов пор по их радиусам возможно точно оценить процессы набухания и

усадки почв, более детально посмотреть на изменения в структуре почвы в результате агротехнических мероприятий, проследить динамику во времени (Дембовецкий и др., 2020). Общеизвестная классификация размеров пор по функциям, которую используют отечественные и зарубежные физики почв представлена в Таблице 1 (цит. по Шеин, 2005).

Таблица 1.

Классификация пор по размерам и функциям (по Бревверу, 1964)

Класс пор	Подкласс	Диаметр, мм	Функции соответствующего класса пор
Макропоры	Грубые	>5	Быстрое стекание влаги, дренирование почвы;
	Средние	2–5	Аэрация
	Тонкие	1–2	Рост корней (для большинства пропашных культур)
	Очень тонкие	0.075–1	
Мезопоры		0.03–0.075	Сохранение доступных для растений запасов влаги и веществ
Микропоры		0.005–0.03	Запасы труднодоступных воды и веществ; жизненное пространство микроорганизмов
Ультрамикропоры		0.0001–0.005	Недоступные запасы воды
Криптопоры		<0.0001	

Поры, определенные по томографических данным, относятся к микро-мезопорам, тонким и очень тонким макропорам, которые несут важнейшие почвенные функции сохранения запасов влаги и питательных веществ).

Поровое пространство можно охарактеризовать количественно с помощью распределения объемов пор по диаметрам их выходных отверстий (Шеин и др., 2016). Уравнение Жюрена используется для расчета зависимости между давлением капиллярной влаги и диаметром отверстий пор. Данный подход предполагает измерение капиллярного сорбционного давления с помощью мембранных прессов и капилляриметрических установок, а определяемая величина при этом - объем воды, выделившейся из образца

почвы. Затем, на основании ОГХ, с помощью значений капиллярно-сорбционного давления рассчитываются значения радиусов пор по уравнению Жюрена, которые требуется соотнести с выделившимися объемами воды (Вадюнина, Корчагина, 1986.; Schlüter et al., 2010). К сожалению, данный метод не учитывает форму и ориентацию пор в пространстве и использует в расчёте только эффективный диаметр пор, который не может в полной мере её охарактеризовать из-за сложности и разнородности строения порового пространства почвы.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Фаустовская пойма

Объектом данной работы послужила почва поймы Москвы реки, в районе Фаустовского расширения, нарушенная в результате неправильного землепользования. Пойменные почвы – являются самыми плодородными почвами Московского региона, поэтому анализ и борьба с деградацией этих почв особенно важны.

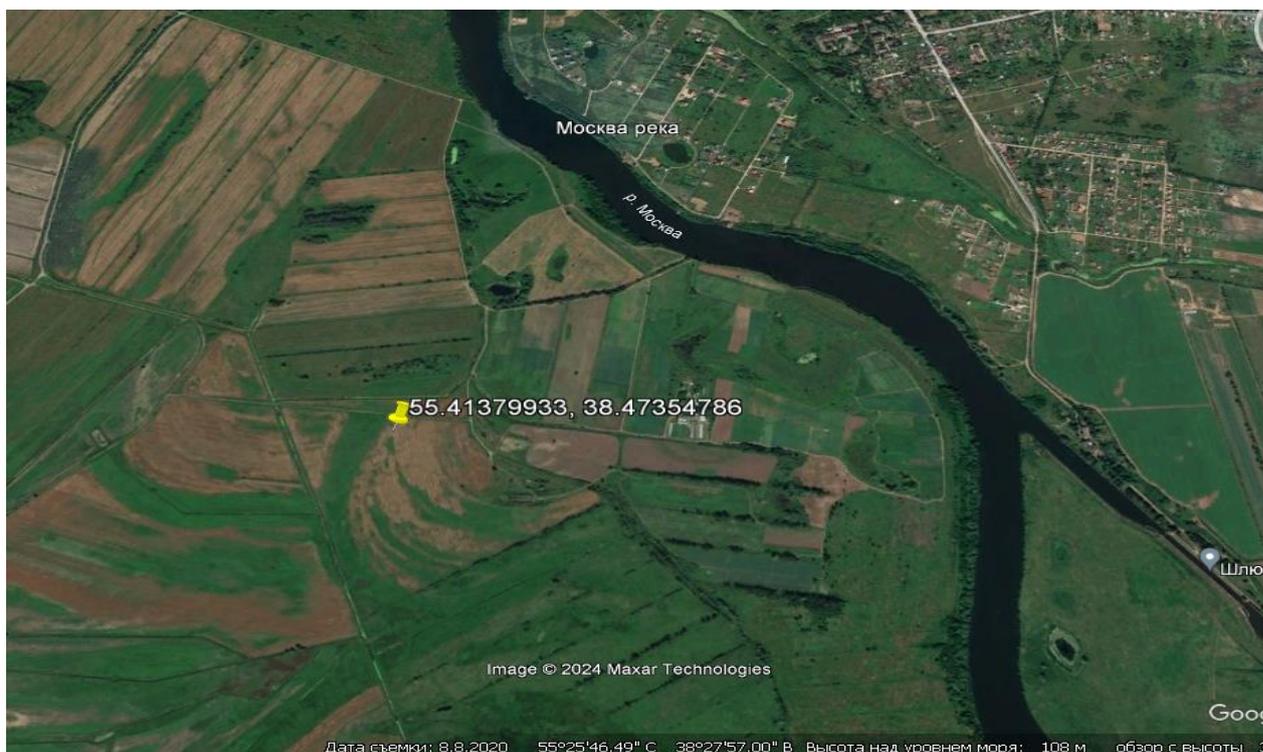


Рисунок 4. Общий план расположения Фаустовской почвы в излучине реки Москвы и местоположения разрезов.

Поле, на котором был выполнен почвенный разрез, определены основные физические свойства и взяты образцы на томографический анализ, в данный момент используется в земледелии, но подвержено локальному вымоканию посевов ячменя, в блюдцеобразных микропонижениях. Пойменные почвы исходно обладают хорошей структурой, однако при постоянной сельскохозяйственной обработке, на глубине 20-30 см формируется подплужная подошва, которая приводит к застою воды в верхнем пахотном слое и как следствие разрушению в нем агрегатов с последующим перераспределением тонких гранулометрических фракций в подпахотный горизонт. Все это приводит к еще большему застою почвенной влаги, которая вытесняет почвенный воздух из пор и нарушает условия для произрастания растений. В результате поле покрывается пятнами, заметными невооруженным глазом, с резко сниженной продуктивностью растений.

Возникновение подобного горизонта вызвано сменой режима использования данной почвы в середине 20 века. Традиционное использование пойменной почвы в качестве заливных лугов и пастбищ сменилось на использование овощных севооборотов. Для регулировки водно-воздушного режима были созданы осушительные системы, которые, на момент обследования в 2020 году, находятся в нерабочем состоянии. В данный момент почва используется под посевы ячменя.

Исследуемые почвы (рисунок 5) находится в центральной части поймы (рисунок 4), выезд и отбор образцов проводился в августе 2020 года. Координаты точки отбора образцов: 55.41379933, 38.47354786.



Рисунок 5. Дерново-аллювиальная глееватая почва с характерным подпахотным уплотненным горизонтом

На момент проведения описания была зафиксирована высокая атмосферная влажность, в открытых осушительных каналах видна вода.

А пах (0-21) – влажный, рыхлый горизонт темно-серого, почти черного цвета, плохо выраженные агрегаты, преимущественно 3-5 мм, переход заметный по плотности.

А подпахотный (21-30) – влажный, заметно уплотнен, даже при влажном состоянии четкая граница по уплотнению, гомогенный, агрегаты не выражены. Переход по оттенкам цвета, появляются холодные цвета, ответственные за глеевые процессы.

В1g (30-46) - частично оглеен, появляются сизые тона в нижней части горизонта, наблюдаются пятна оглеения.

В2G (46-70 см) – сырой, глеевый горизонт, тяжелый суглинок.

Название данной почвы по классификации 1977 году - «Аллювиальная дерновая освоенная глееватая легкосуглинистая». Почва уплотнена механическим воздействием с ярко выраженной подпахотной плужной подошвой. Характеристики почвы данного землепользования, полученные на основе кадастровых данных (таблица 2).

Таблица 2.

Некоторые характеристики почвы поля под кадастровым номером 50:29:0030401 (данные - Росагрохимслужба)

Кадастровый номер	Мощность гумусового горизонта (см)	Гумус, %	P2O5, мг/кг	K2O, мг/кг	pH
50:29:0030401	18	3,9	155	162	5,1

При оценке состояния почвы данного региона было важно провести историческую характеристику землепользования и состояния почв Фаустовского расширения. Данные, используемые для анализа, базируются на монографии «Почвы Московской области и улучшение их плодородия» 1974 года под редакцией Н. Боченкова.

Фаустовское расширение простирается по обе стороны реки и имеет площадь 120 кв.км и аналогично Дединовской пойме реки Оки является своего рода «отстойником», куда поступают наносы с огромных территорий. Гранулометрический состав почв массива варьирует от легкосуглинистого,

для участков, примыкающих к руслу реки, до тяжелосуглинистого и глинистого, для участков, расположенных в центральной и притеррасной частях поймы.

По отечественной классификации 1977г. описываемую в этой работе почву можно отнести к Пойменным луговым тяжелосуглинистым почвам, находящаяся в центральной части поймы. По историческим данным грунтовые воды находятся на уровне 1,5-2 м и характерны почвам центральной поймы, которым свойственен двусторонний тип водного питания: атмосферные осадки и грунтовые воды.

Высокое естественное плодородие формируется под пышной злаково-травянистой растительностью в условиях интенсивного аллювиального процесса. В Московской области, в Фаустовской пойме пойменные дерново-луговые почвы формируются преимущественно на двучленных наносах. Суглинистая толща (от 30 до 100-130см) подстилается песчаными отложениями. В прошлом на территории пойм нижнего течения Москвы реки, в том числе и Фаустовского расширения, произрастали пышные заливные луга высокой производительности. Однако с давних времен значительные площади центральной поймы реки Москвы вовлечены в распашку и активно используются для выращивания пропашных культур. В том числе и почвы исследуемого землепользования.

Далее приведено описание разреза, приведенное в монографии «Почвы Московской области и повышение их плодородия» 1974 года (Кораблева, Симакова, 1974) для пойменной луговой тяжелосуглинистой почвы, находящейся на территории средней поймы Фаустовского расширения Москвы реки.

Левобережная центральная пойма реки Москвы Фаустовского расширения. Сеяные травы. От русла реки 600-700 м. (Пойменная луговая тяжелосуглинистая почва на оглеенном глинистом аллювии)

0-27 см – темно-серый, пылевато-иловатый тяжелый суглинок, рыхлый, мелкокомковатой зернистой структуры; много органических остатков, густо пронизан корнями растений

27-46 см – темно-серый, среднепылеватый суглинок комковато-зернистой структуры, заметны опесчаненные белесоватые прослойки, пронизан корнями растений; по всему горизонту разбросаны ржавые пятна, более влажный, переход заметен по окраске.

46-69 см – темно-серый с буроватым оттенком, уплотненный тяжелый суглинок комковато-зернистой прочной структуры, много ржавых пятен, влажный переход заметен по окраске

69-110 см – темно-серый с сизовато-бурый оттенок тяжелый суглинок, значительно больше ржаво-охристых пятен и примазок, влажный, почти сырой, в нижней части горизонта ясно выраженная сизоватость; на глубине 115-120 см сочится вода.

В механическом составе пойменных дерновых-луговых почв, как правило, преобладает фракция физической глины (таблица 3, рисунок 5). Агрофизические свойства данных почв характеризуются незначительной плотностью (около 1,0 г/см³) пахотного горизонта, величина которой часто увеличивается к нижней части профиля. Под природной луговой растительностью пойменные дерново-луговые почвы обладают хорошей водопроходной структурой, но после распашки структура этих почв значительно ухудшается.

Валовый химический состав почв центральной поймы отличается высоким содержанием полуторных окислов, количество которых обычно возрастает вниз по почвенному профилю. Отмечается высокая аккумуляция фосфора (0,32-0,37% P₂O₅) и окислом щелочноземельных металлов (Табл.4). Далее приведены исторические данные для пойменных луговых тяжелосуглинистых почв поймы реки Москвы (Фаустовского расширения)

Таблица 3.

Гранулометрический состав пойменной луговой тяжелосуглинистой почвы данные из монографии «Почвы Московской области и повышение их плодородия» 1974 (Кораблева, Симакова, 1974)

№ разреза, почва	Глубина, см	Потеря при обработке	Фракции (размер частиц, мм) (%)						
			1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	<0,01
34, Пойменная луговая тяжелосуглинистая пойма р.Москвы (Фаустовское расширение)	0-8	1,8	29	16	16	8	6	23	39
	15-25	2,5	1	6	24	17	27	22	69
	35-45	2,8	2	12	22	6	25	30	64
	55-60	1,6	18	10	22	9	15	25	50
	80-90	1,6	16	15	14	10	6	37	55
	125-135	2,1	35	28	12	3	3	17	25

Таблица 4.

Основные агрохимические характеристики для пойменной луговой тяжелосуглинистой почвы поймы р. Москвы (Фаустовское расширение) из монографии «Почвы Московской области и повышение их плодородия» 1974 (Кораблева, Симакова, 1974)

Пойменная луговая тяжелосуглинистая	Глуб., см	Обменные основания			Гумус %	Азот (N)	Фосфор (P ₂ O ₅)		Калий (K ₂ O)	
		Ca	Mg	Ca+Mg		Общий (%)	Валовой (%)	(мг/100 г)	Валовой (%)	(мг/100 г)
	0-20	28,1	4,5	32,6	4,6	0,24	0,36	16	1,81	8,4
	25-40	24,1	3,4	27,5	3,9	0,2	0,3	16	1,79	8,5
	45-60	20,2	4,8	25	2,9	0,15	0,27	10	1,86	10,6
	65-80	23,5	3,3	26,8	2,2	0,14	0,25	8	1,86	10,6
	80-100	24,1	4,1	28,2	1,8	0,11	0,29	10	1,76	11,3



Рис. 6. Фотография используемых для анализа образцов дерново-аллювиальной глееватой почвы с характерной структурой горизонтов

При исследовании свойств дерново-аллювиальной глееватой почвы, непосредственно в поле были взяты образцы на определение влажности и плотности почвы буриком Качинского. В лабораторных условиях аналитиком О. Чуфаровской были выполнены определения плотности твердой фазы почв пикнометрическим методом для горизонтов 10-20 см и 20-30 см в трехкратной повторности, а также определение гигроскопической влажности для всех горизонтов термостатно-весовым методом в трехкратной повторности, дополнительно была определена полевая влажность агрегатов разного размера для горизонтов 0-10 см и 20-30 см.

Гранулометрический состав определялся методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3000E с оптическими настройками коэффициента преломления равного 1,55 и коэффициента поглощения – 0,1. Разрушение агрегатов при пробоподготовке проводилось механически – резиновым пестиком, после чего просеивалось через одно миллиметровое сито, дальнейшая диспергация проведена с помощью ультразвукового воздействия

при помощи диспергатора Digital Sonifier S-205D (Branson Ultrasonics, США) со стандартным наконечником, энергия воздействия – 450 Дж/мл.

Оценка структурного состояния проводилась аналитиком бакалавром Ольгой Чуфаровской. Методом сухого просеивания по Саввинову на ситах – 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0,5 и 0,25 мм для воздушно-сухой почвы. Определение водопрочности агрегатов проводилось методом мокрого просеивания по Саввинову и методом Андрианова для всех горизонтов. Порозность агрегатов 5-7 и 7-10 мм была измерена методом парафинирования в пятикратной повторности. Определение прочности агрегатов было выполнено с помощью конического пластометра П.А. Ребиндера в десятикратной повторности для агрегатов 3-5 и 7-10 мм всех исследуемых горизонтов. Оценка плотности почв буром Качинского, проведенная непосредственно в поле, показала уплотнение в горизонте 20-30 см. В слоях 0-10 и 10-20 плотность не отличается и близка к оптимальным значениям, по классификации А.Г. Бондарева (0,97 и 0,91 г/см³ соответственно). Наибольшая плотность почвы приурочена к слою 20-30 и составляет 1,32 г/см³, данное значение соответствует верхней границе оптимального значения плотности для глинистых и суглинистых почв (1,3 г/см³) и обусловлено явлением подплужной подошвы и явной деградацией почвенной структуры в этом слое. В контрольной точке переуплотнение подпахотного горизонта не проявлялось, плотности приобретала оптимальные значения по классификации Бондарева (0,93 и 1,1 г/см³ для пахотного и подпахотного горизонтов соответственно).

Определение плотности твердой фазы пикнометрическим методом было проведено только для горизонтов 10-20 см и 20-30 см. Плотность твердой фазы для исследуемых горизонтов достоверно не отличается и составляет 2,54 г/см³ и 2,56 г/см³ соответственно (Табл.5).

Значения плотности твердой фазы (г/см³) и гигроскопической влажности в горизонтах 10-20 и 20-30 см в зоне «вымочки»

Горизонт	Плотность твердой фазы, г/см ³	Гигроскопическая влажность W%
А пахотный см	2,54	3,54
А подпахотный см	2,56	3,36

Результаты оценки гранулометрического состава показали, что с увеличением глубины возрастает количество физической глины (таблица 6). Горизонты 0-10 см, 10-20 см, 20-30 см и 36-42 см относятся к классу легких глин. Нижний горизонт 65-70 см относится к классу средней глины по классификации Н.А. Качинского. По дифференциальному распределению фракций гранулометрического состава для горизонтов можем наблюдать отличие горизонта 20-30 см от вышележащих: фактически исчезает песчаная фракция, а содержание фракции пыли возрастает, по количеству илистых частиц существенных отличий между тремя верхними горизонтами не наблюдается (рисунок 7).

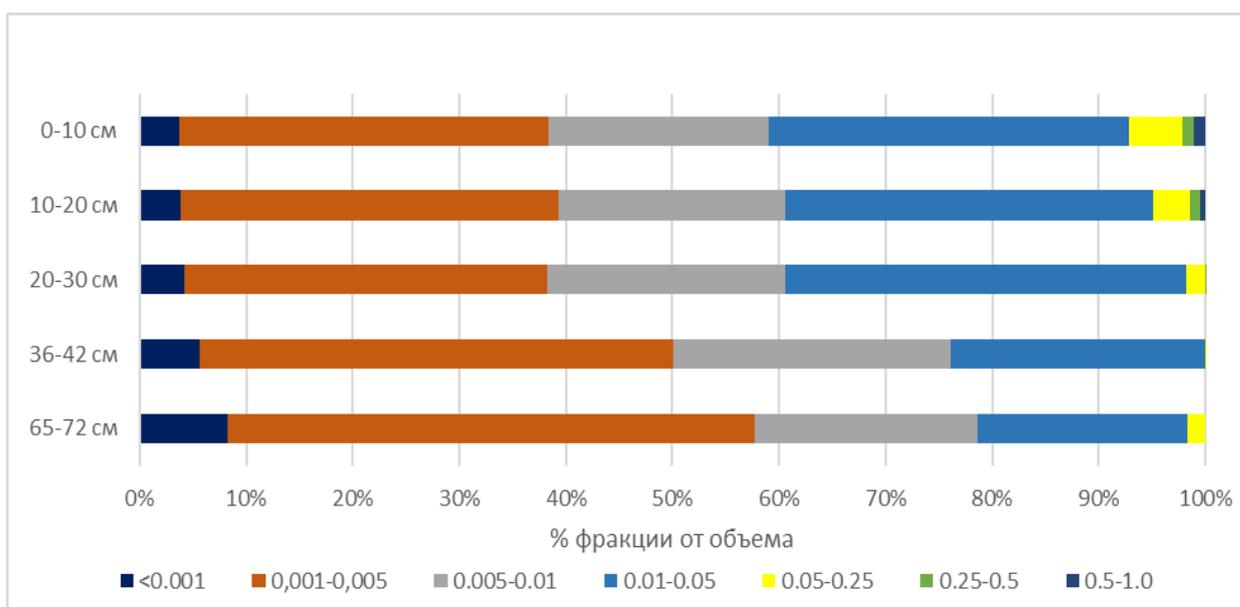


Рисунок 7. Соотношение фракций гранулометрического состава для дерново-аллювиальной глееватой почвы.

Таблица 6.

Некоторые физические свойства дерново-аллювиальной глееватой почвы Фаустовского расширения

Глубина, см	Горизонт	Физ. глина, %	Плотность г/см ³
0-10 см	А пах	58,96	0,94
10-20 см	А пах	60,51	0,91
20-30 см	А подпах	60,53	1,32
36-42 см	В1g	76,12	1,22
65-79 см	В2G	78,65	1,25

При сравнении результатов гранулометрического анализа с данными литературных источников можно наблюдать заметное уменьшение пылевой и песчаной составляющих при увеличении пылевой фракции. Столь выраженная несогласованность данных может также быть следствием

различных методологий определения.

Таким образом, в переуплотненном горизонте 20-30 см наблюдается наименьшее количество агрономически ценных агрегатов, менее 35% (рисунок 8), так же этот горизонт имеет наименьший коэффициент структурности по Н.А. Качинскому (0,53) и наибольшее содержание агрегатов размером >10 мм присуще этому горизонту. Пахотный же горизонт, напротив, характеризуется хорошим коэффициентом структурности – 0,79 и 44 процентным содержанием агрегатов от 0,25 до 10мм. Во всех горизонтах наблюдается преобладание глыбистой фракции, при оценке водопрочности методом просеивания по Саввину наблюдается явное преобладание фракции <25 мм (Рис.10). Преобладающее количество агрегатов диаметром 1-2 мм приходится на горизонт 65-70 см.

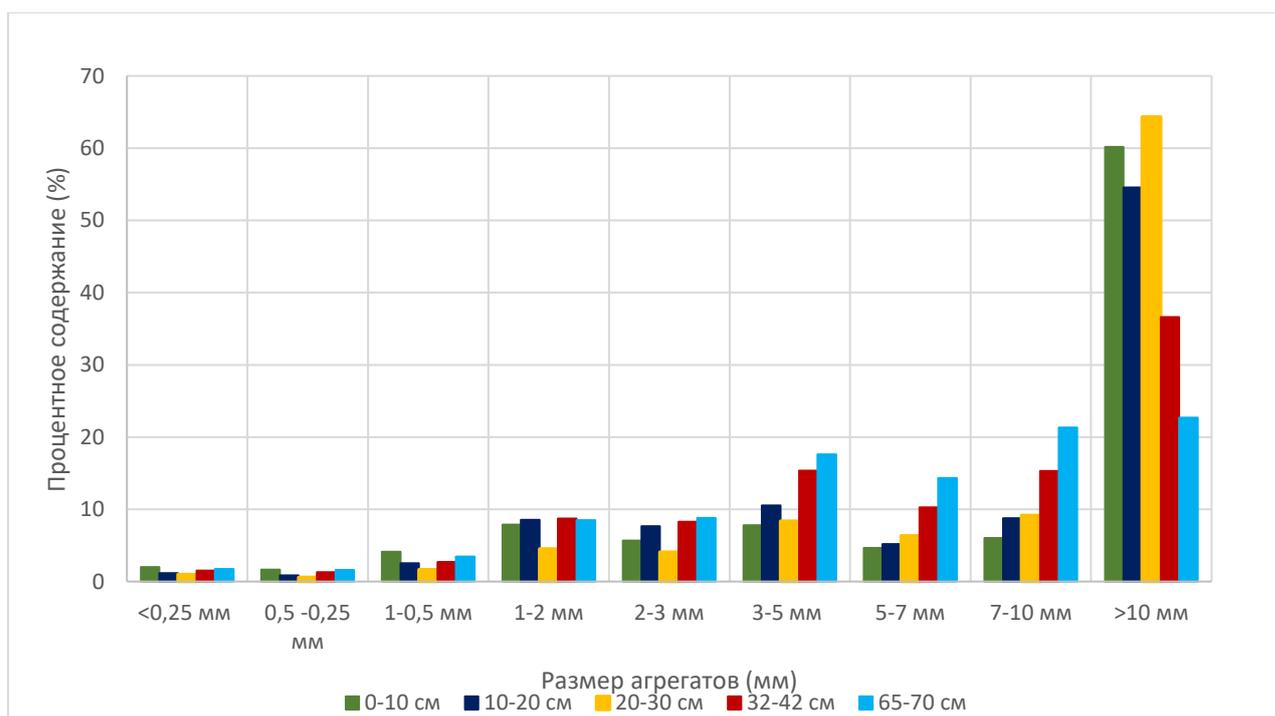


Рисунок 8. Распределение агрегатного состава для различных горизонтов почв методом сухого просеивания по Саввину для дерново-аллювиальной глееватой почвы в зоне «вымочки» *Аналитик О. Чуфаровская

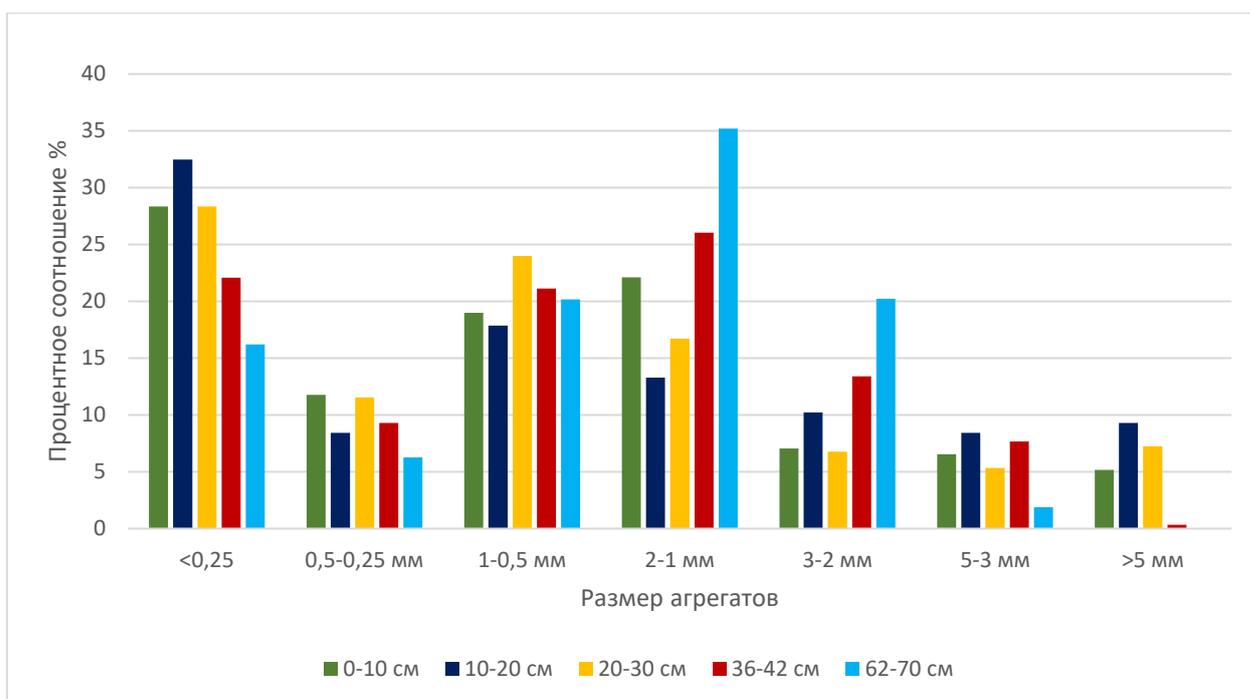


Рисунок 9. Результаты оценки водопрочности агрегатов методом просеивания в стоячей воде по Саввинову почвы в зоне «вымочки» *Аналитик О. Чуфаровская

Просеивание по Саввинову характеризует водопрочность агрегатов. При оценке критерия водопрочности по Кузнецовой, для горизонта 20-30 см наблюдается избыточно высокая водопрочность, тогда как для пахотного горизонта 10-20 см этот показатель отличный. Определение водопрочности агрегатов размером 3-5 мм по Андрианову показало результаты отличные от просеивания по Саввинову. Переуплотненный горизонт 20-30 см показывает резкое ухудшение водопрочности более чем в два раза, по сравнению с вышележащими горизонтами.

Достоверных отличий по пористости для агрегатов 5-7 мм по глубинам не выявлено, для агрегатов размером 7-10 мм наблюдается уменьшение пористости с глубиной, слои 20-30 см и от и 10-20 см достоверно отличаются по пористости; видимой зависимости между пористостью и размером агрегатов не обнаружено (таблица 7).

Таблица 7.

Результаты оценки пористости агрегатов для горизонтов дерново-аллювиальной глееватой почвы

Пористость агрегатов результаты %			Общая пористость *, %	Оценка по Качинском у	Суммарная агрегатная *, %	Межагрегатная * %
Горизонт, см	агрегаты 5-7 мм	агрегаты 7-10 мм				
0-10	45,7	43,5	61,7	Отличная	30,8	30,9
10-20	44,1	44,2	64,1	Отличная	28,4	35,7
20-30	37,5	39,1	50,6	Удовл.	30,7	19,9

*Аналитик бакалавр О. Чуфаровская

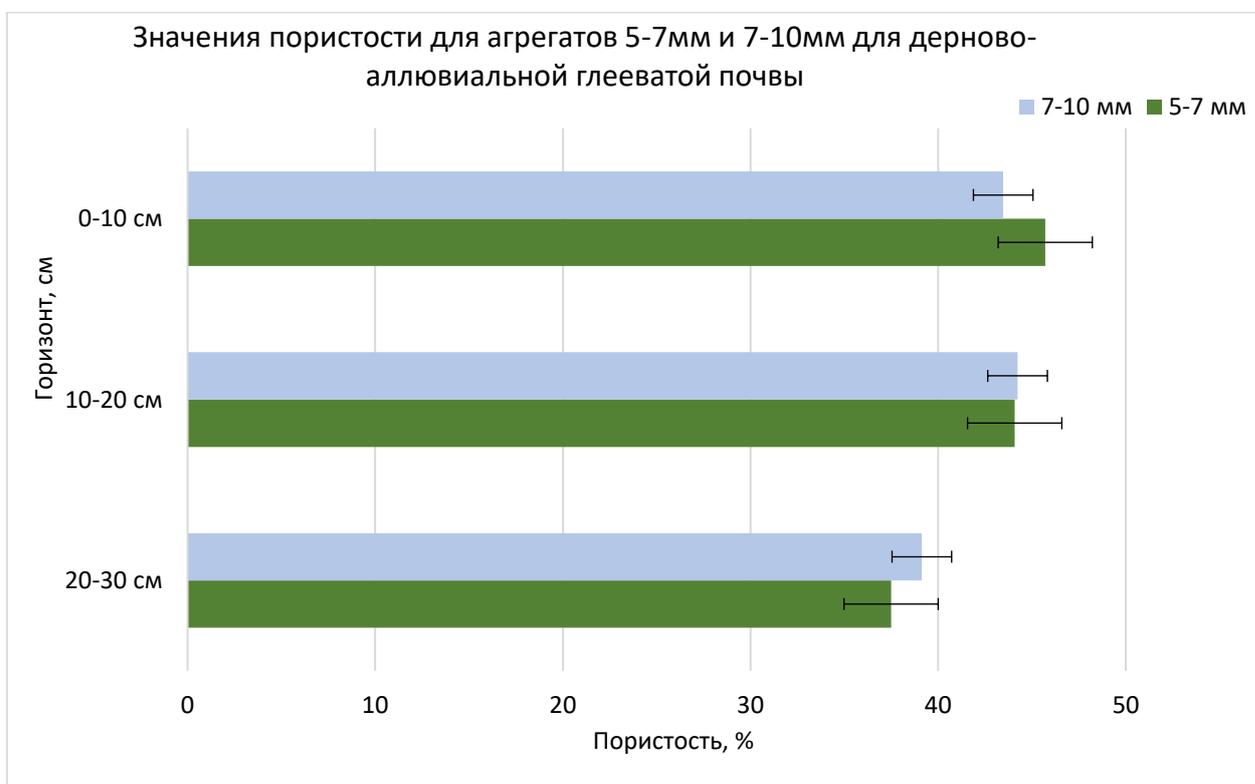


Рисунок 10. График распределения значений пористости агрегатов 5-7 мм и 7-

10 мм для горизонтов 0-10 см, 10-20 см и 20-30 см

Расчет общей пористости почвы и ее оценка по критериям Н.А. Качинского показали удовлетворительные значения для горизонта 20-30 см, так же в данном горизонте наблюдается снижение межагрегатной пористости при относительно постоянных значениях суммарной агрегатной пористости. Пахотные горизонты показали отличные показатели пористости по оценке Н. А. Качинского. Прочность воздушно-сухих агрегатов 3-5 мм в разы превышает прочность агрегатов 7-10 мм, также наблюдается увеличение прочности агрегатов 3-5мм в слое 20-30 см, по сравнению с вышележащими.

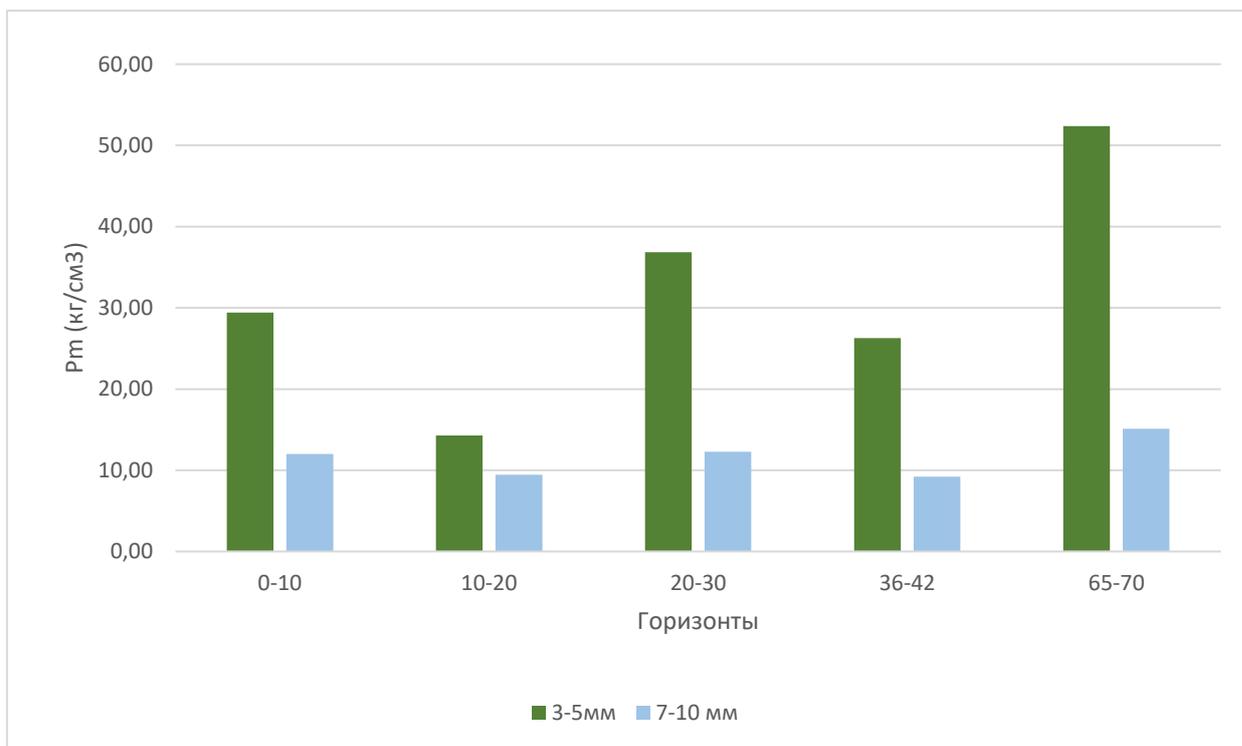


Рисунок 11. Распределение прочности агрегатов 3-5 мм и 7-10 мм по горизонтам при гигроскопической влажности для дерново-аллювиальной глееватой почвы

В сводной таблице 11 представлено сравнение всех характеристик для пахотного и подпахотного горизонтов дерново-аллювиальной глееватой почвы, по которой можно наблюдать значительное ухудшение структуры

почвы горизонта 20-30 см.

Таблица 8.

Характеристика пахотного и подпахотного горизонтов дерново-аллювиальной глееватой почвы Фаустовского расширения по основным физическим свойствам.

Горизонты, см	10-20	20-30 (переуплотненный)
Общая плотность (г/см ³)	0,93	1,32
Текстурный класс по Качинскому	Глина легкая	Глина легка
Содержание агрономически ценных агрегатов* (%)	44,0	34,7
Коэффициент структурности по Качинскому*	Хорошее состояние	Неудовлетворительное состояние
Критерий водопрочности Кузнецовой*	Отличная	Избыточно высокая
Показатель водопрочности по Андрианову *	81,7	32,1
Общая порозность, оценка по Качинскому*	отличная	удовлетворительная
Межагрегатная порозность* (%)	56,6	19,9
Прочность агрегатов 3-5 мм*	14,3	36,9

*Аналитик бакалавр О. Чуфаровская

2.2. Владимирское ополье

Вторым объектом исследования служили агросерые почвы Владимирского ополья (Phaeozem albic, WRB 2014 г., версия 2015 г.). Район Владимирского Ополья расположен к северо-западу от города Владимира, на левом высоком берегу реки Клязьмы, юго-восточнее границы Московского

оледенения. Территория является частью зоны достаточного увлажнения: среднее многолетнее количество осадков составляет 575 мм, а испарение чуть превышает 400 мм в год. С мая по сентябрь количество осадков колеблется в пределах 290-315 мм, что вполне удовлетворяет потребности сельскохозяйственных культур во влаге.

Почвенный покров на этом участке представлен комплексом серых лесных почв, включающим серые лесные, серые лесные остаточные карбонатные, серые лесные со вторым гумусовым горизонтом разной степени оподзоленности. В нашем исследовании основное внимание уделялось агросерым среднесуглинистым лесным почвам, некоторые физические свойства которых приведены в Таблице 11.

Таблица 9.

Некоторые физические и химические свойства агросерой лесной почвы.

Глубина, см	Горизонт (см)	Физ. глина, %	Плотн. г/см ³	НВ*, %	Гигр. влаж.*, %
0-10	А пах (0-21)	44,5	1,11	25,2	2,2
10-20		47,91	1,19	24,7	2,3
20-30	А подпах (21-37)	48,33	1,28	23,5	1,8
30-40		47,68	1,33	23,1	2,2
48-58	AB (37-57)	47,7	1,4	20,4	2,4
80-90	B (57+)	45,71	1,36	23	2,3

**по данным отчетов Агрофизической экспедиции кафедры физики и мелиорации почв МГУ (2003, 2004).*

Отметим (таблица 9), что в данных агропочвах с глубины 20-30 см проявляется явление «плужной подошвы» в виде уплотнения на глубине 20-40 см, в более глубоких слоях переходящее в генетически уплотненные слои. И хотя уплотнение не превышает критических для суглинистых агропочв (до 1.4 г/см³) (Feng et al., 2019), однако по сравнению с пахотными горизонтами, в которых плотность находится на оптимальном уровне, все же следует ожидать

проявление этого явления и на уровне распределения пор по размерам, т.е. на томографическом уровне.

Для определения гранулометрического состава исследуемых объектов применяли метод лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 Comfort (FRITCH, Germany).

Для определения содержания углерода в образцах почвы авторы использовали сухой метод сжигания в потоке воздуха. Для этого использовался экспресс-анализатор АН-7529 (завод-изготовитель ПО "Измеритель", г. Гомель) (Шеин и др., 2017). Плотность почв, наименьшая влагоемкость, коэффициент фильтрации определялись традиционными классическими методами (Теории и методы физики почв /Под ред. Шеина, Карпачевского, 2017).

Для томографических исследований использовались образцы диаметром 1.5 см и высотой 3 см в двух вариантах – воздушно сухие и увлажненные до состояния, близкого к НВ (о специальном методе насыщения образца, - см ниже). Отметим, что томографический метод позволяет проводить исследования на одном и том же образце в различных его состояниях по влажности, при этом количество и состояние влаги в образце без специальных процедур никак не отмечается и не мешает проводить исследования порового пространства образца.

Современные томографические исследования позволяют проводить и количественные определения размера пор. Для вычисления объема пор различного диаметра, т.е. распределения пор по размерам использовались инструменты морфологического анализа изображений (Serra, 1983). К трехмерному изображению пустотного (порового) пространства последовательно применяются операции морфологической эрозии и дилатации со структурным элементом в форме сферы радиуса r , в результате чего с изображения удаляются все поры, поперечный размер которых меньше

2г. Последовательное увеличение радиуса структурного элемента и вычисление объема оставшихся на изображении пор позволяет построить кумулятивное распределение пор по размерам (Vogel et al., 2010).

2.3. Насыщение образцов водой и рентгеновская компьютерная микротомография.

Томографическая съемка проводилась в двух вариантах состояния образцов – воздушно сухие и увлажненные до состояния, близкого к наименьшей влагоемкости. Для этого один и тот же образец после томографической съемки в воздушно сухом состоянии, увлажняли избытком влаги через подложку из нескольких слоев фильтровальной бумаги в течение 7 суток, с постоянным доливом воды до появления водного зеркала на поверхности бумажной подложки, затем дренировали на песчаной подложке до постоянного веса при отсутствии испарения и затем томографировали в течение 2-3 часов. Перед томографической съемкой образец герметизировали полиэтиленовой пленкой, что исключало испарение воды в процессе съемки и деформацию структуры вследствие процессов усадки, вызванных иссушением. Параметры съемки выбраны, исходя из протоколов работы с аналогичными почвенными образцами, томографическое исследование которых осуществлялось ранее (Gorbov et al., 2019; Khaidarova et al., 2018; Romanis et al., 2021; Skvortsova et al., 2016). После проведения томографической съёмки получены изображения образцов в виде трехмерных числовых массивов вокселей размером, которые соответствуют поглощающей способности вещества каждого вокселя исследуемого образца. Размеры вокселей равны $8 \times 8 \times 8$ и $4 \times 4 \times 4$ мкм для агросерой и дерново-аллювиальной глееватой почв соответственно. В процессе реконструкции из исходных данных получают горизонтальные срезы в виде стека данных, на основе которых можно построить срезы любой пространственной ориентации или сегментировать поровое пространство. Из анализа томографических данных хорошо видна разница между сухим и набухшим образцом даже в плоских (вертикальных и горизонтальных) срезах. Набухание деформирует почву и

сокращает объем порового пространства на уровне макропор, что заметно на срезах без применения математической обработки. На рисунке 12 приведены 2D-томографические изображения одного из образцов в воздушно-сухом (в дальнейшем, для краткости «сухом») и близким к состоянию наименьшей влагоемкости (в дальнейшем «влажном») состояниях.

После проведения томографической съёмки мы получаем изображения образцов в виде трехмерных массивов действительных чисел, которые соответствуют поглощающей способности вещества вокселей размером $8 \times 8 \times 8$ и $4 \times 4 \times 4$ микрон для агросерой и дерново-аллювиальной глееватой почв в каждой конкретной точке почвенного образца. В процессе реконструкции из исходных данных получают горизонтальные срезы в виде стека данных (файлы формата TIFF), на основе которых можно построить срезы любой пространственной ориентации или сегментировать поровое пространство.

Из анализа томографических данных хорошо видна разница между сухим и набухшим образцом даже в плоских (вертикальных и горизонтальных) срезах. Набухание деформирует почву и сокращает объем порового пространства на уровне макропор, что заметно на срезах без применения математической обработки. На Рисунке 12 приведены 2D-томографические изображения одного из образцов в сухом и насыщенном водой состояниях.

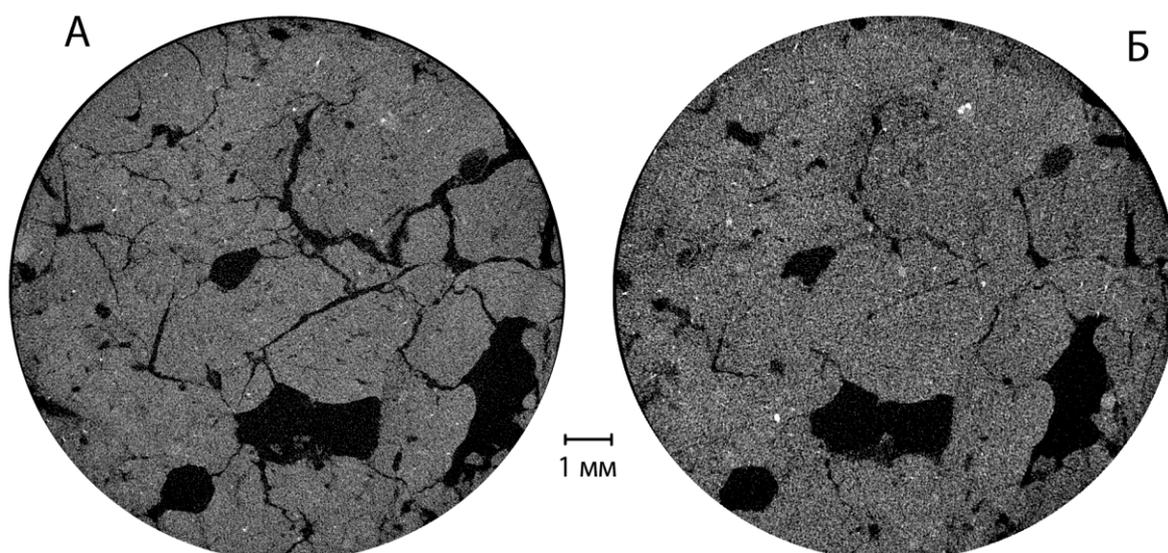


Рисунок 12. 2D горизонтальный срез томографического изображения образца агросерой почвы, глубина 30-40см, Аподпахотный горизонт. А – сухой образце, Б – насыщенный водой до состояния, близкого к НВ

Визуально наблюдается сокращение порового пространства в насыщенном образце (черный цвет) за счет увеличения объема почвы (серый цвет) и изменения цвета на более темный, что указывает на более низкое поглощение рентгеновского излучения при идентичных настройках съемки. Видны изменения в структуре порового пространства на качественном уровне: некоторые плоские трещины закрылись, а поры округлой формы сузились. Но обработка только плоских срезов не даст полной картины изменений в поровом пространстве при набухании, что можно получить при обработке объемных данных с количественным описанием геометрических и топологических свойств.

2.4. Функционалы Минковского и числа Бетти

Рассмотрим некоторые особенности применения функционалов Минковского и чисел Бетти к анализу структуры порового пространства почв:

Пусть X – объект (пора, поровое пространство), ограниченный поверхностью δX в 3-мерном пространстве $E = R^3$. Для описания геометрических и топологических свойств такого тела, интегральная

геометрия позволяет определить 4 топологических инвариантов - функционалов Минковского (Hadwiger, 1957; Michielsen, De Raedt, 2001). Функционалов, не меняющихся при непрерывном преобразовании тела (гомеоморфизме) (рисунок 13).

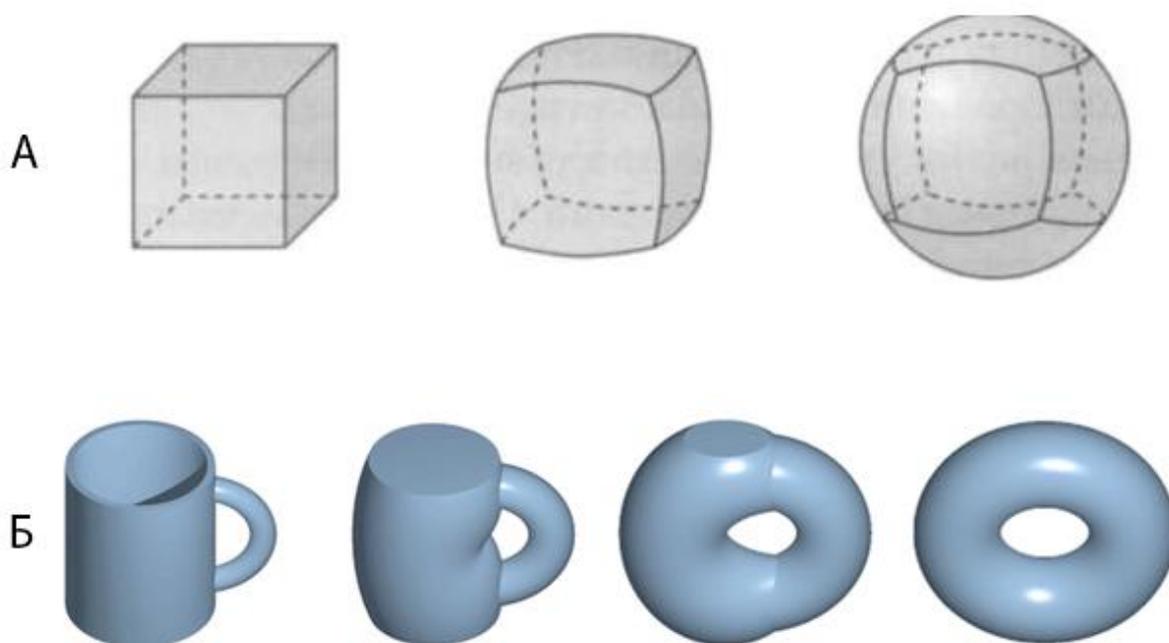


Рисунок 13. Гомеоморфные тела: а) без разрыва (шар); б) с одним разрывом (тор)

В данной работе мы будем рассматривать трехмерные томографические изображения образцов почв. В качестве объекта исследования выбрано пористое пространство, поскольку его структура во многом определяет свойства почв (Милановский и др., 1993; Скворцова и др., 2016; Gorbov et al., 2019). В этом случае функционалы Минковского с точностью до множителя соответствуют объему $\text{por}(M_0)$, площади поверхности $\text{por}(M_1)$ и интегральной средней кривизне границы раздела фаз «пора-твердофазный

скелет» (M_2), а также характеристике Эйлера-Пуанкаре пористого пространства (M_3) (Arns et al., 2005):

$$M_0(X) = V(X),$$

$$M_0(X) = V(X),$$

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

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

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

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

Характеристика Эйлера-Пуанкаре для выпуклого тела X есть интегральная оценка топологической сложности тела и определяется как знакопеременная сумма чисел Бетти:

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

где числа Бетти могут быть интерпретированы следующим образом: b_0 - число отдельных пор (полые пространства, не имеющие выходов за границы образца). Такие поры гомеоморфны шару и всегда являются закрытыми порами, b_1 (туннели) - число, характеризующее количество связей в поровом пространстве. Например, сквозные поры, имеющие больше одного выхода за пределы образца (чем больше выходов, тем больше число b_1). Либо закрытая

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

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

2.4.1. Алгоритмы

Трехмерное изображение порового пространства может быть представлено в виде кубического клеточного комплекса – трехмерной карты, состоящей из вокселей (трехмерных пикселей). Геометрические и топологические свойства кубических комплексов изучает цифровая топология. Существует несколько алгоритмов, позволяющих вычислять значения функционалов Минковского (Legland et al., 2011; Michielsen, De Raedt, 2001; Serra, 1983). В работе (Ohser, Schladitz, 2009) предлагается алгоритм, основанный на подсчете числа различных локальных конфигураций $2 \times 2 \times 2$ вокселя, а в работе (Michielsen, De Raedt, 2001) рассмотрен алгоритм, основанный на подсчете числа вершин, ребер, граней и вокселей в кубическом комплексе:

$$V(X) = n_c,$$

$$S(X) = -6n_c + 2n_f,$$

$$2C(X) = 3n_c - 2n_f + n_e,$$

$$\chi(X) = -n_c + n_f - n_e + n_v,$$

где n_c - число вокселей, n_f - число граней, n_e - число ребер и n_v - число вершин в кубическом клеточном комплексе, соответствующему поровому пространству образца. В этом исследовании использовалось программное обеспечение (Legland et al., 2011) для вычисления функционалов Минковского. Нулевое и второе числа Бетти (числа связанных кластеров порового пространства и твердой матрицы) вычислялись с использованием базовых функций MATLAB и ImageJ (Schladitz et al., 2006). Аддитивность функционалов Минковского позволяет реализовать комбинаторные алгоритмы их вычисления, которые не требуют значительных вычислительных ресурсов и допускают использование параллельных вычислений в случае, если исходное изображение имеет высокое разрешение.

Используемая в настоящей работе операция морфологического открытия относится к классу методов, называемых математической морфологией. Классическая математическая морфология предложена в работе (Serra, 1983), где введены основные морфологические операции: эрозия (сужение) рисунок 14(A) и дилатация (расширение) рисунок 14(B), а также производные от них операции: открытие (рисунок 15) и закрытие. После бинаризации получившееся трехмерное изображение почвы состоит из пустотных вокселей и вокселей твердой фазы. Морфологическая операция дилатация, применяемая к пустотному пространству, переводит твердофазные воксели на границе пора/твердая фаза в пустотные, тем самым «расширяя» поры в данном случае. Операция эрозии, наоборот, переводит пустотные воксели на границе пустотного пространства в воксели твердой фазы, «сужая» поры. Толщина слоя вокселей, меняющихся после этих операций определяется структурным элементом, «скользящим» по границе раздела фаз. Операция открытия – это комбинация выполненных последовательно операций эрозии и дилатации с одинаковым структурным элементом. Математическая морфология неоднократно применялась для анализа томографических

изображений почв (San José Martínez et al., 2015; McClure et al., 2018; San José Martínez et al., 2013).

Подробный обзор методов морфологического анализа и их применимости для исследования двумерных и трехмерных изображений естественных структур приведен в (Ohser, Schladitz, 2009).

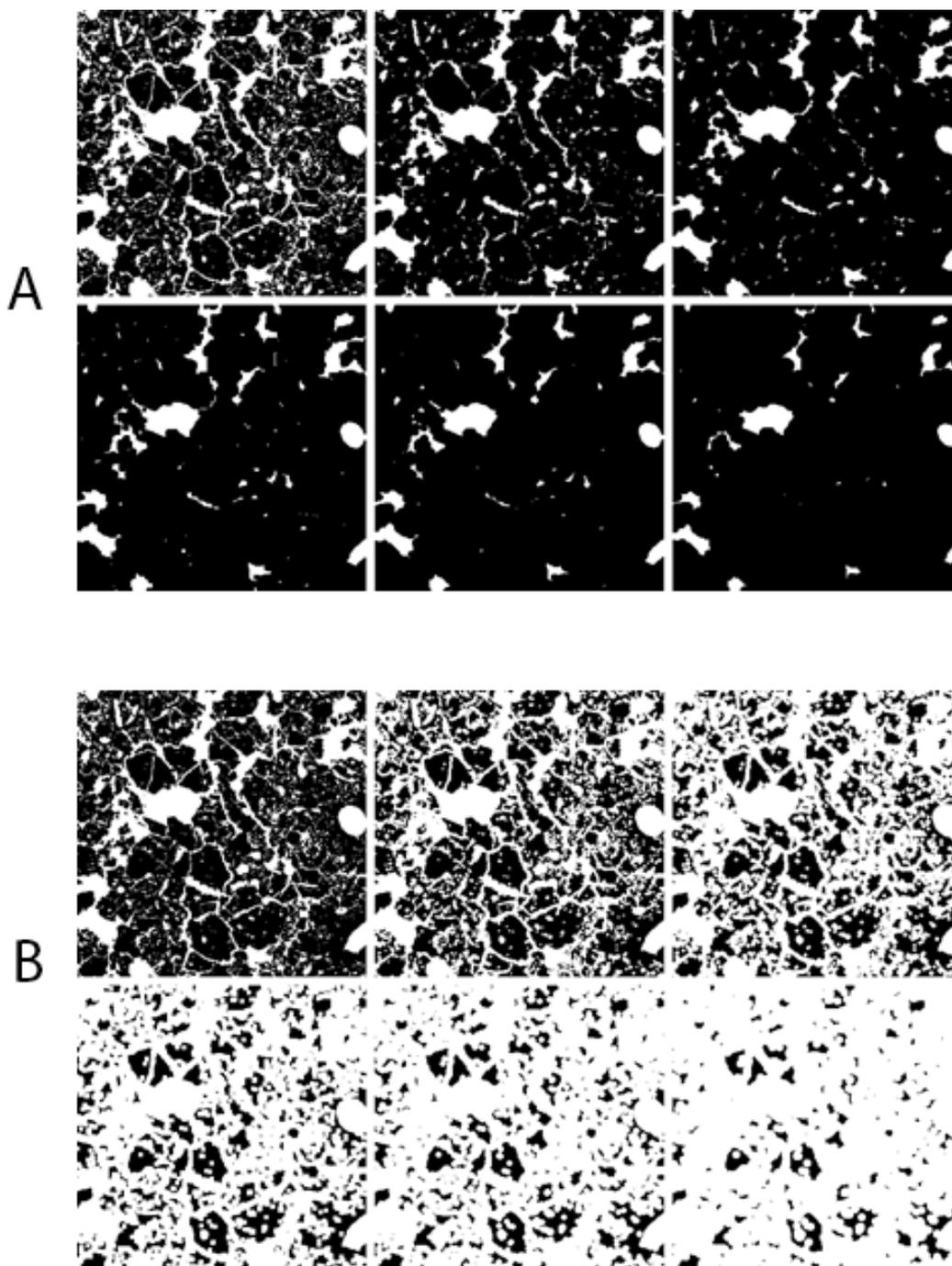


Рисунок 14. Результат применения операции А) эрозии, В) дилатации с различным размером структурного элемента к изображению порового

пространства образца почвы. Пустоты показаны белым цветом, твердая фаза – черным

Рисунок 15 демонстрирует результат применения морфологической операции «открытие» с увеличивающимся структурным элементом в форме диска к изображению порового пространства образца почвы (Legland et al., 2011). Благодаря этим операциям мы можем рассчитать функционалы для пор различного диаметра. Построение подобных распределений функционалов для порового пространства образцов в сухом и влажном состояниях позволит количественным образом описать изменения, происходящие в структуре порового пространства в процессе насыщения почвы влагой.

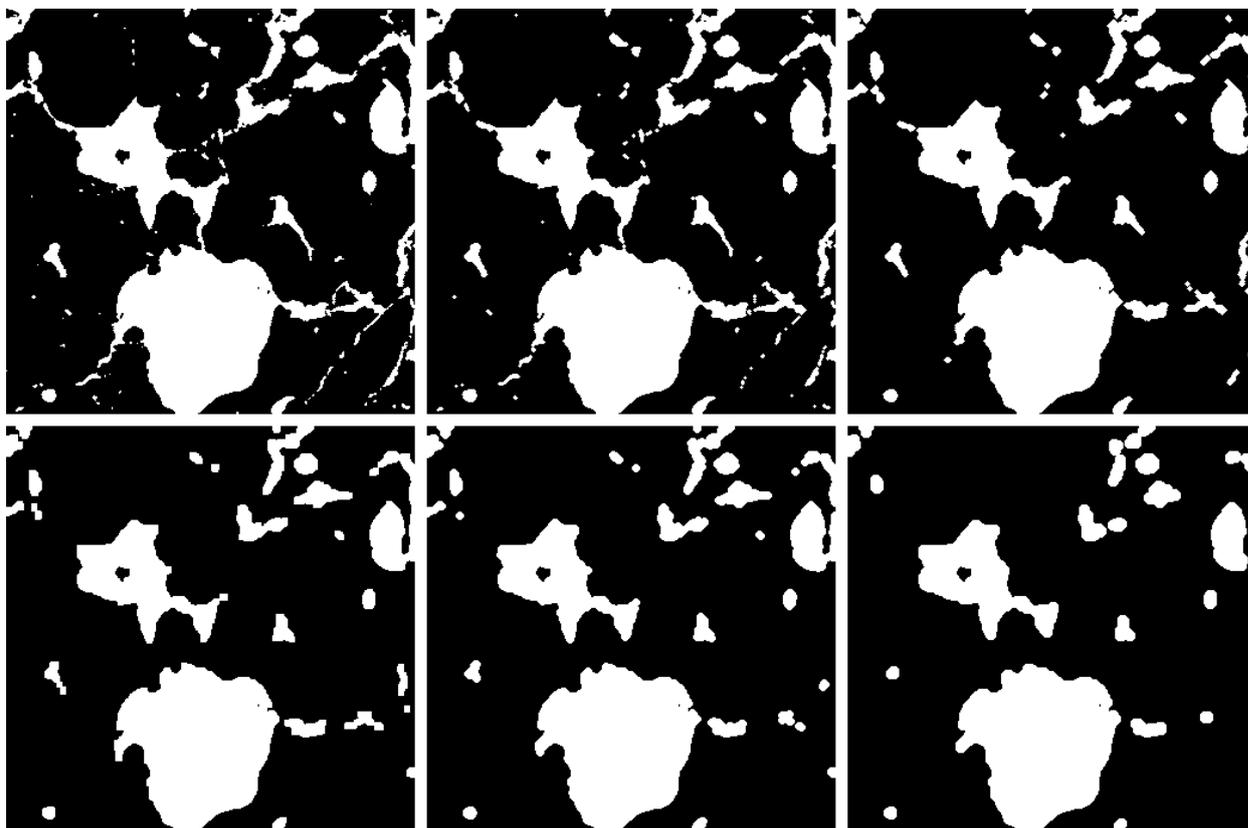


Рисунок 15. Пример применения операции морфологического открытия с различным размером структурного элемента к изображению порового пространства образца почвы. Пустоты показаны белым цветом, твердая фаза – черным. Результатом применения подобной операции является серия

изображений, на которых остаются только поры, размер которых превышает размер структурного элемента

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ¹

3.1. Распределение пор по размерам

3.1.1. Агросерая почва Владимирского ополья

Для всех образцов построены графики распределения пор по объемам. В образцах агросерой почвы, отобранных из горизонтов разной степени антропогенной нагрузки, наблюдается схожее распределение макропор по объемам. Несмотря на существенную разницу в плотности горизонтов (значения 1.15 г/см³ и 1.35 г/см³ для Апах и Аподпахотного соответственно), классическое распределение пор по размерам для сухих и влажных образцов этих горизонтов имеет характерный вид с максимальными значениями объемов пор в области диаметров 0.2-0.25 мм. Дифференциальное распределение показывает, большую часть пористости обеспечивают поры радиусом от 0.15 мм до 0.4 мм (рисунок 16-18).

¹ Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в следующих научных статьях автора в журналах, индексируемых в базах данных WoS, Scopus и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. Ivonin D., Kalnin T., Grachev E., Shein E. Quantitative analysis of pore space structure in dry and wet soil by integral geometry methods // *Geosciences*. – 2020. – V. 10. – №. 9. – P. 365. – DOI: 10.3390/geosciences10090365. (WoS IF 2,66 Q2; SJR IF 0,66 Q2). Вклад автора в печатных листах: (0,81/ 0,4) (здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах).
2. Калнин Т.Г., Ивонин Д.А., Абросимов К.Н., Грачев Е.А., Сорокина Н.В. Анализ томографических изображений структуры порового пространства почв методами интегральной геометрии // *Почвоведение*. – 2021. – Т. 55. – №. 9. – С. 1113-1123. DOI: 10.31857/S0032180X21090033. (РИНЦ IF 2,417). [Kalnin T.G., Ivonin D.A., Abrosimov K.N., Grachev E.A., Sorokina N.V. Analysis of tomographic images of the soil pore space structure by integral geometry methods // *Eurasian Soil Science*. – 2021. – Т. 54. – С. 1400-1409. DOI: 10.1134/s1064229321090039. (WoS IF 1,369; SJR IF 0,431)]. (0,625/0,5).
3. Ivonin D., Kalnin T., Dembovetskiy A., Grachev E., Shein E. Experimental data showing the effect of wetting on soil structure transformations: 3D images // *Data in Brief*. – 2022. – Т. 41. – С. 107928. DOI: 10.1016/j.dib.2022.10792. (SJR IF 0,26 Q2). (0,375/ 0,2)

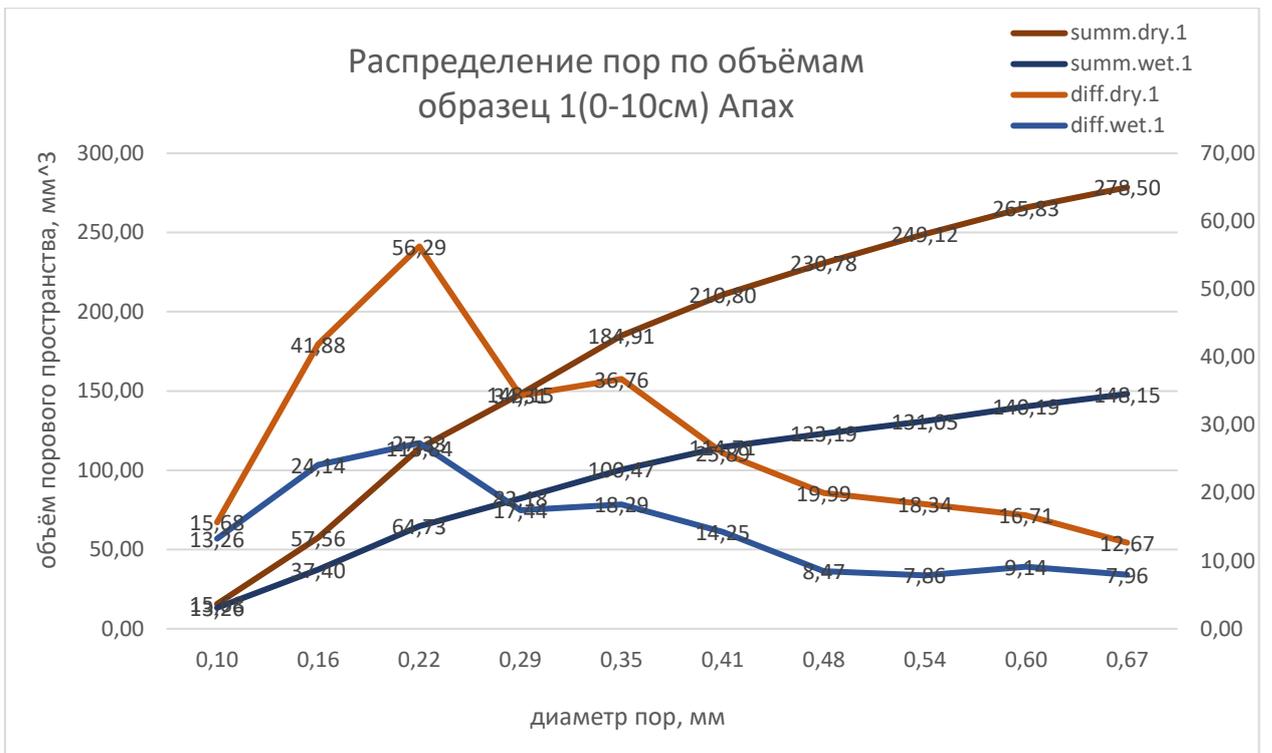


Рисунок 16. Кумулятивный и дифференциальный график распределения пор по объёмам, агросерая, образец 1 (0-10см) Апах

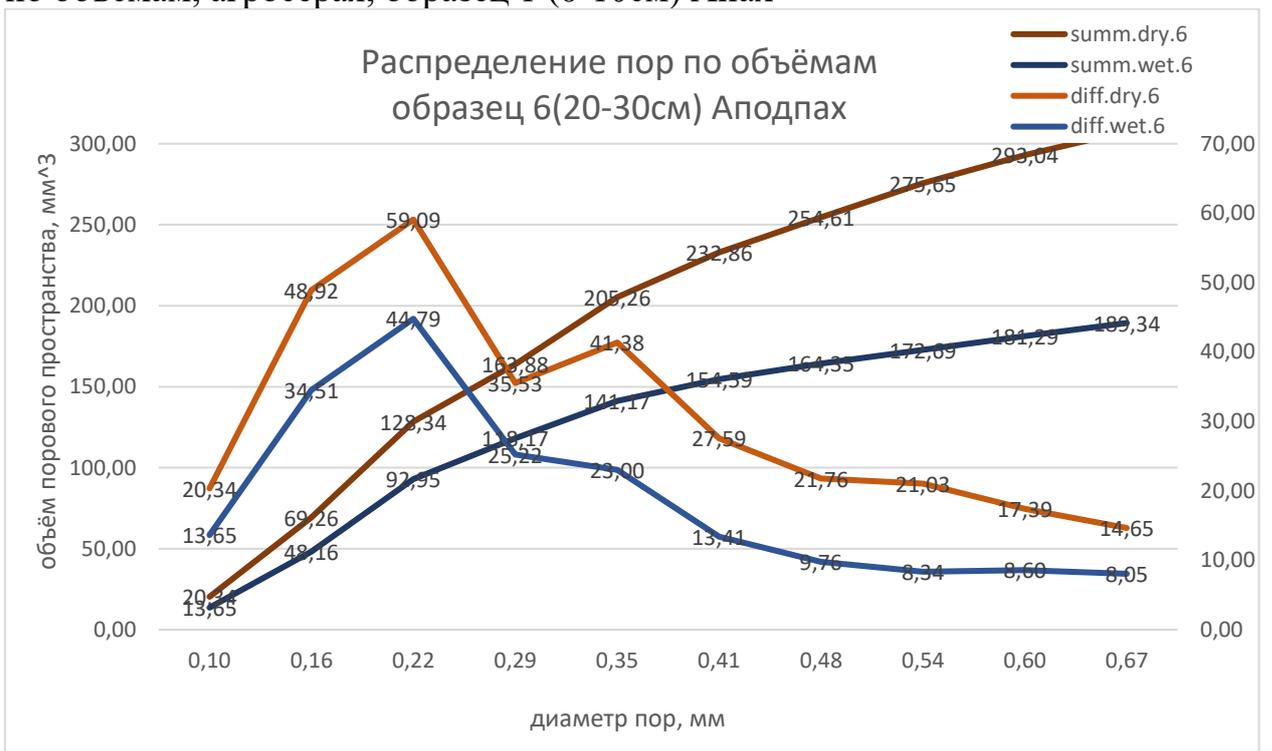


Рисунок 17. Кумулятивный и дифференциальный график распределения пор по объёмам, агросерая, образец 6 (20-30см) Апах

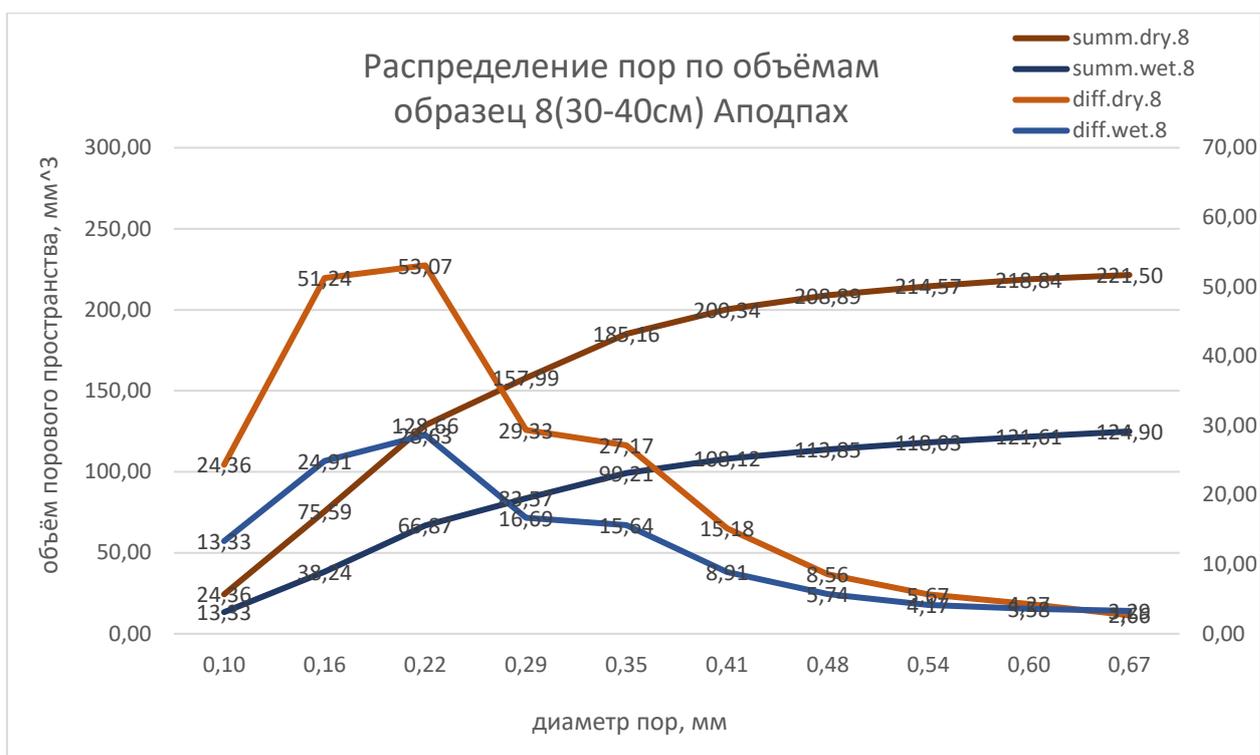


Рисунок 18. Кумулятивный и дифференциальный график распределения пор по объёмам, агросерая, образец 8 (30-40см) Апах

В ненарушенных горизонтах АВ и В (рисунки 19, 20) количество макропор изменяется менее значительно при насыщении. При этом, визуальнo, образцы всех горизонтов в насыщенном состоянии увеличиваются в линейных размерах на 10-20%. Вероятно, набухание происходит за счёт увеличения количества микро или мелких мезопор, размер которых не превышает 70мкм. Предположение строится на том, что твёрдая фаза почвы не может дать такого набухания и оно происходит за счёт изменения порового объёма. Детальный разбор и подтверждение этой гипотезы в следующем разделе, на примере пойменной луговой почвы, отснятой на микротомографе с разрешением 4мкм на пиксель. Такое разрешение позволит «увидеть» микро и мезо поры без опасения ошибки из-за шумов.

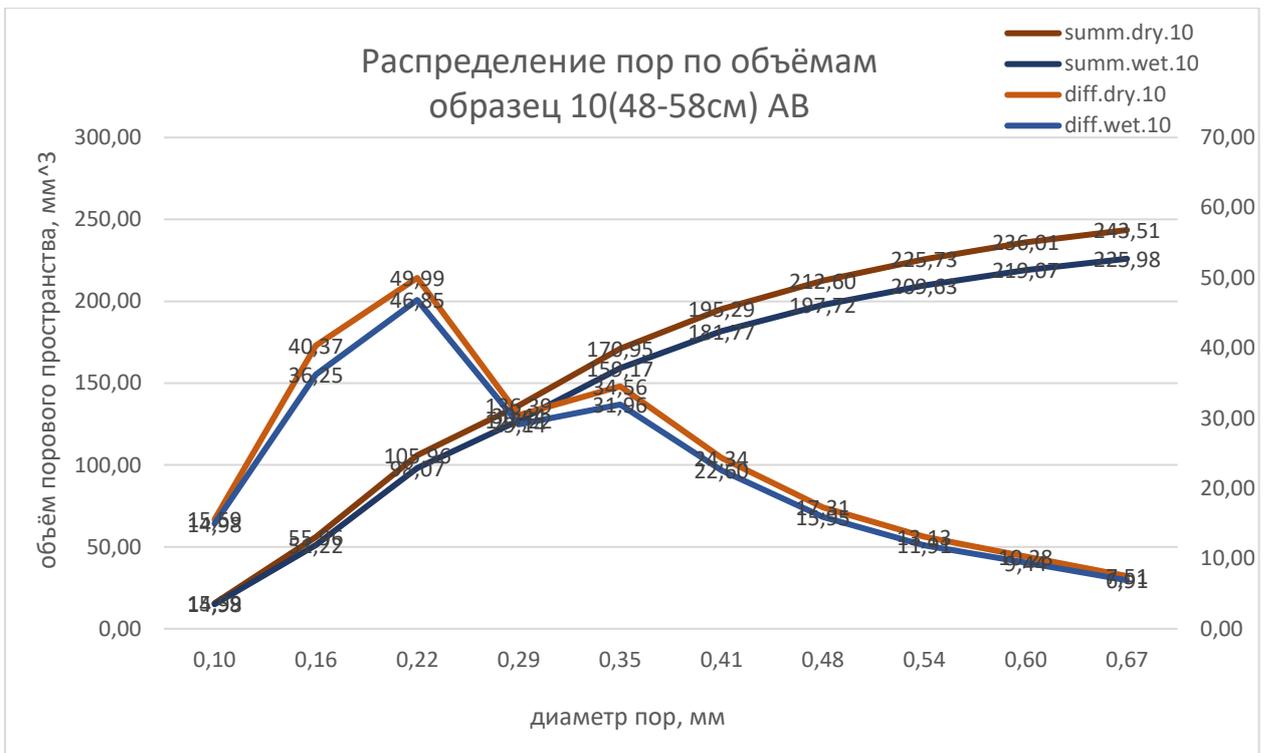


Рисунок 19. Кумулятивный и дифференциальный график распределения пор по объёмам, агросерая, образец 10 (48-58см) Апах

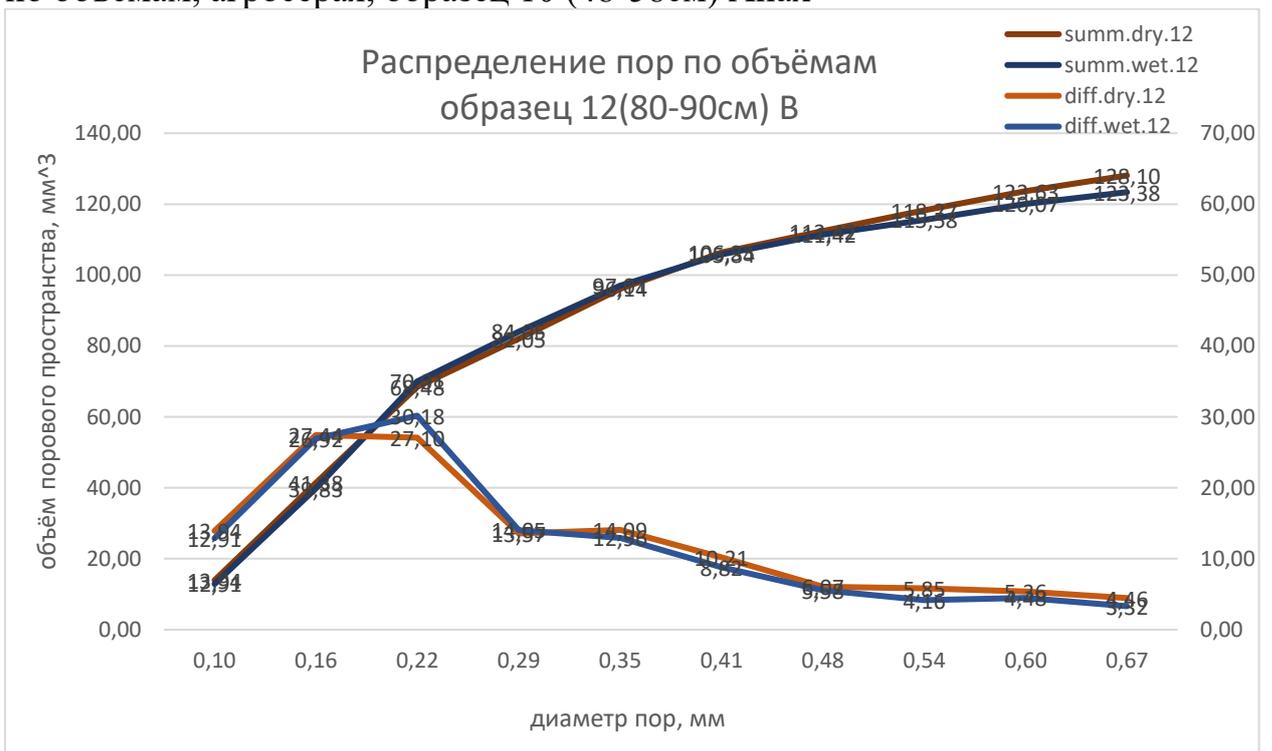


Рисунок 20. Кумулятивный и дифференциальный график распределения пор по объёмам, агросерая, образец 12 (80-90см) Апах

Таким образом, в образцах всех исследуемых горизонтов происходит уменьшение суммарного объёма видимого диапазона пор при увлажнении

образцов. Однако в образцах горизонтов АВ и В количество пор изменяется менее значительно, чем в горизонтах А при насыщении почвы водой (рисунки 21, 22). При этом образцы всех горизонтов в насыщенном состоянии увеличиваются в линейных размерах на 10-20%. Вероятно, набухание происходит за счёт увеличения количества микро и мезопор, диаметр которых не превышает 70 мкм, и которые не фиксируются без ошибки из-за шумов при используемом разрешении для агросерой почвы в 8 мкм на пиксель.

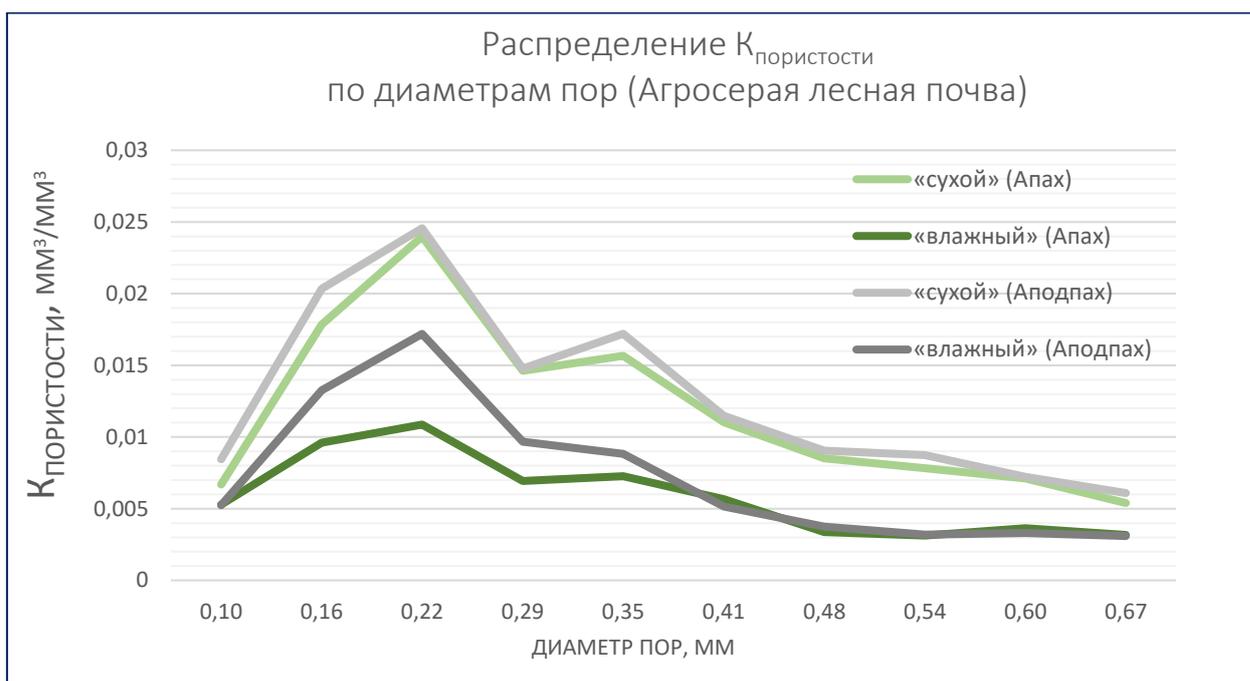


Рисунок 21. Дифференциальное распределение пор по объёмам в агросерой лесной почве, образец пахотного горизонта А (0-10см) и образец подпахотного горизонта А (20-30см). Каждый образец представлен в «сухом» (светлая линия) и «влажном» (тёмная линия)

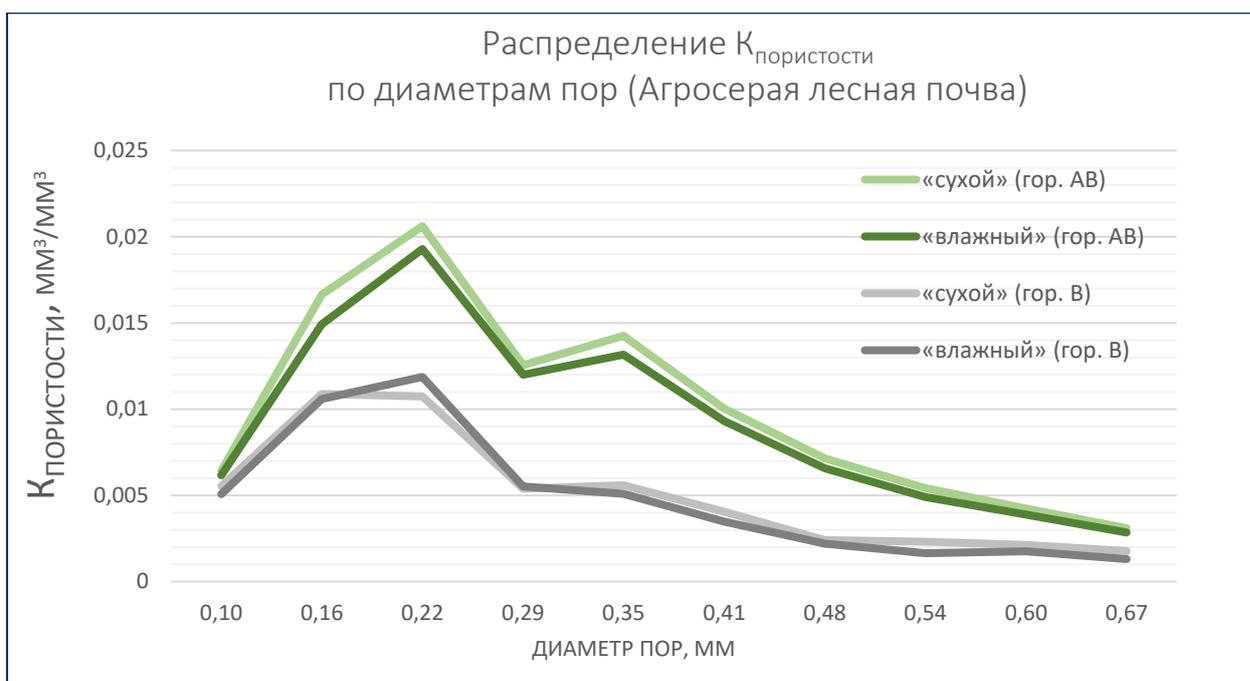


Рисунок 22. Дифференциальное распределение пор по объемам в агросерой лесной почве, для образцов горизонтов АВ (48-58см) и горизонта В (80-90см). Каждый образец представлен в «сухом» (светлая линия) и «влажном» (тёмная линия)

Однако, построения по интенсивным величинам не могут показать целостную картину, так как описывают лишь конкретный образец и не позволяют экстраполировать, воспроизводить и использовать данные на горизонт или почву в целом. На рисунке 23 приведены распределения $K_{\text{пористости}} \cdot K_{\text{пор.}}$ ($\text{мм}^3/\text{мм}^3$), как отношение объема пор к объему всей твердой фазы образца.



Рисунок 23. Общий коэффициент пористости $V_{пор}/V_{тв.фазы}$ сухих и влажных образцов агросерой почвы

Интегральный $K_{пор.}$ показывает, что в образцах, отобранных с горизонта А агросерой почвы относительное количество объёма порового пространства между влажными и сухими состояниями, различается в 1.5-2 раза. При этом для нижележащих горизонтов АВ и В, интегральный $K_{пор.}$ практически не различается между сухими и влажными образцами.

3.1.2. Дерново-аллювиальная глееватая почва

Для образцов дерново-аллювиальной глееватой почвы, были получены томограммы с разрешением 4мкм на пиксель. Построены графики с относительными значениями $K_{пор.}$ к объёму твёрдой фазы для дерново-аллювиальной глееватой почвы (рисунки 24-29). При таком разрешении удалось рассмотреть микро- и мезо- поры, размерами от 0.01 до 0.07 мм. без опасения ошибок из-за шумов. Расхождения влажных и сухих образцов приходится на область от 0.01 до 0.1-0.13 мм, т.е для микро-мезопор., осуществляющих функции сохранения доступных для растений запасов влаги

и веществ. В пахотных горизонтах влажные образцы имеют в 3-5 раз большие объемы мезопор, чем сухие. Это тем более важно для агропочв, чтобы почва не пересыхала и оставались объемы для питательных веществ и воды.

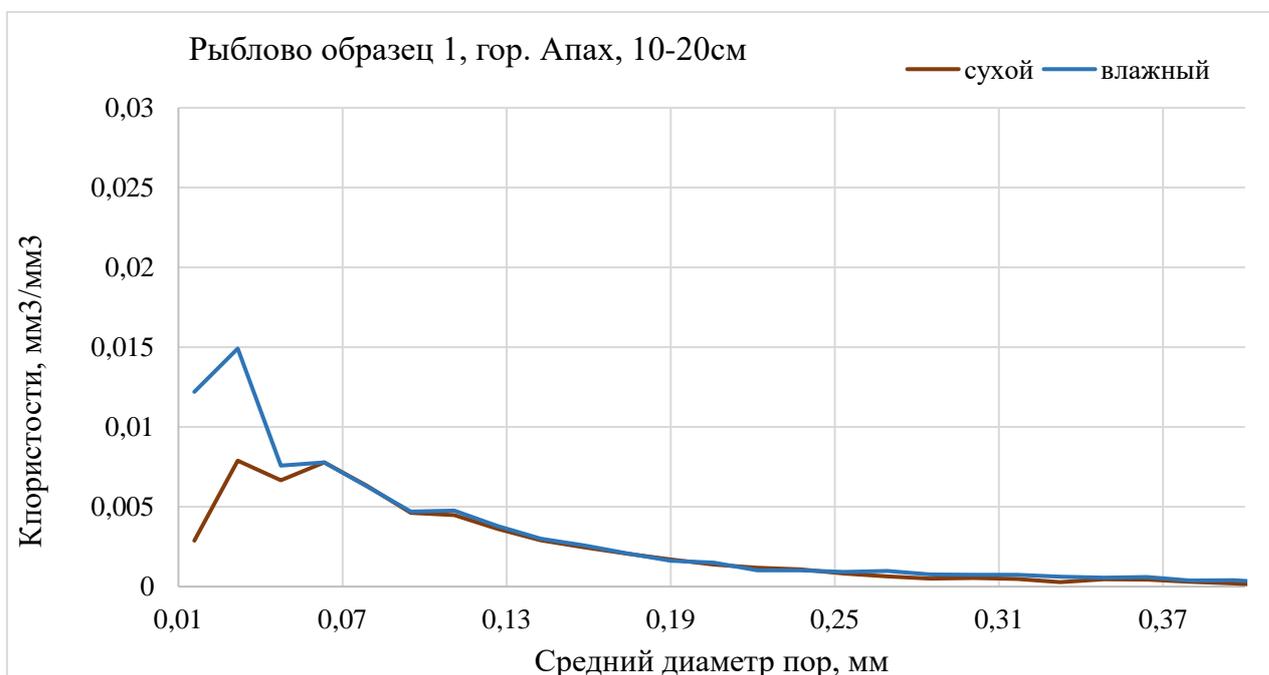


Рисунок 24. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 1, гор. Апах, 10-20см

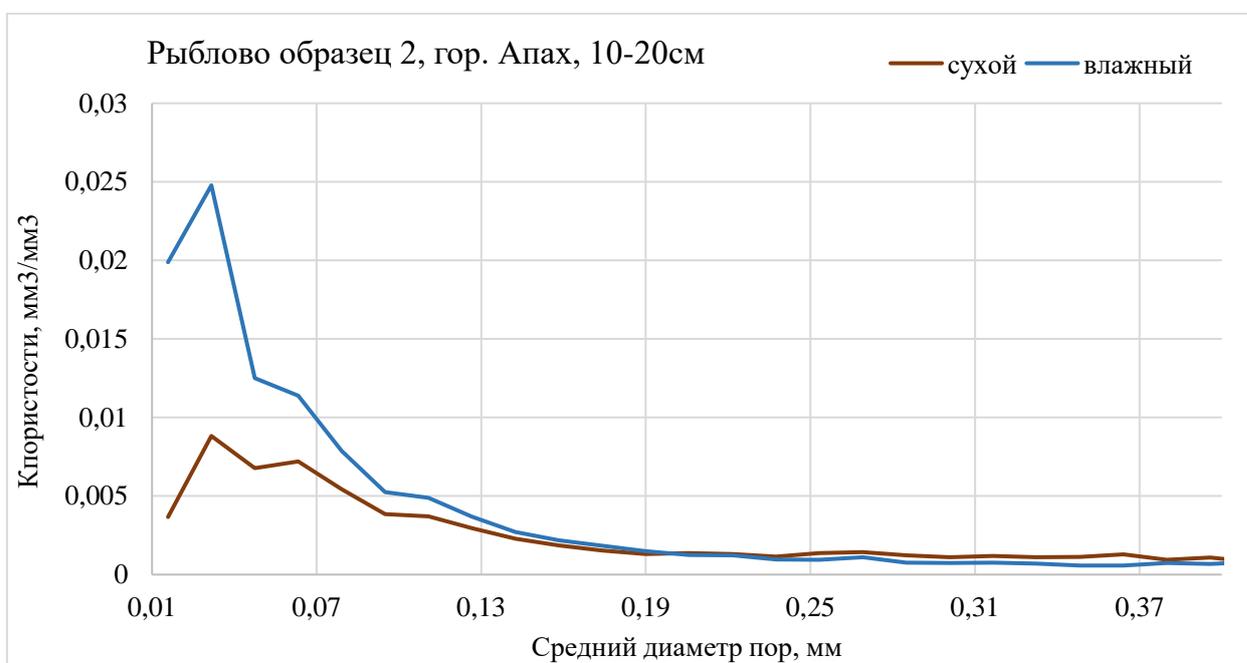


Рисунок 25. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 2, гор. Апах, 10-20см

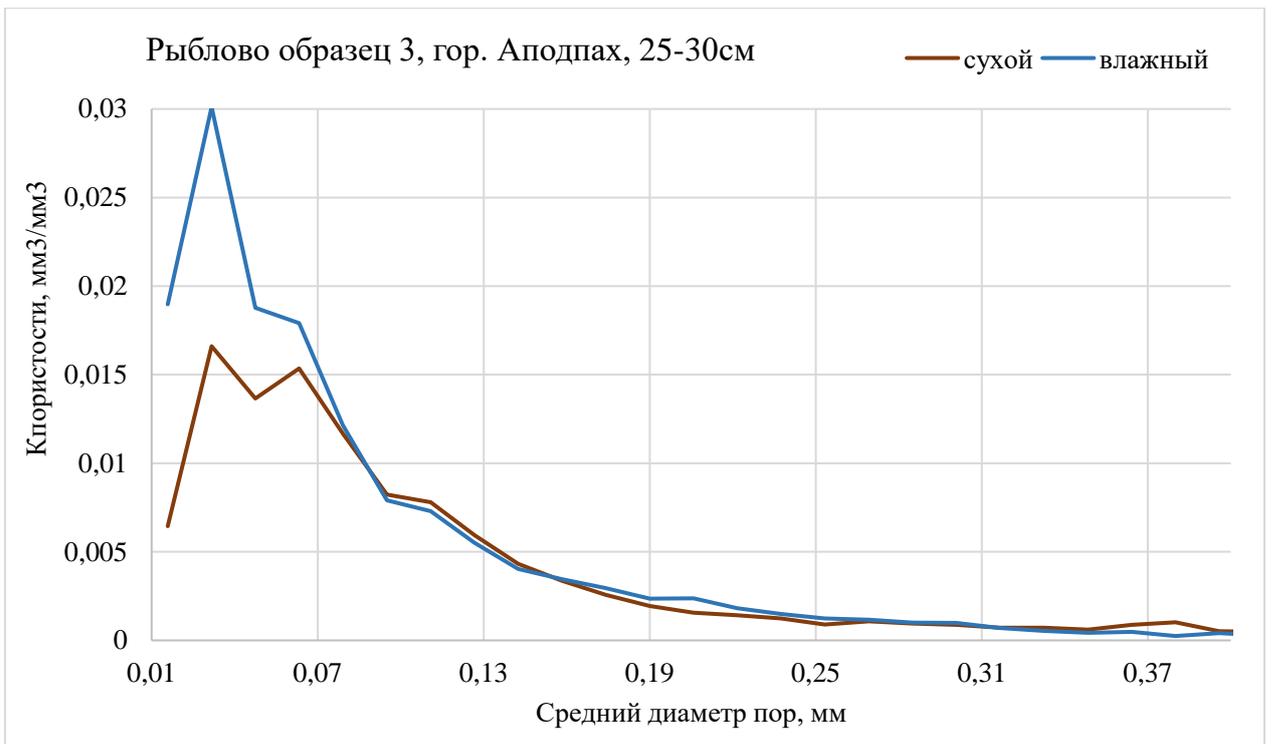


Рисунок 26. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 3, горизонт Аподпах, 25-30см

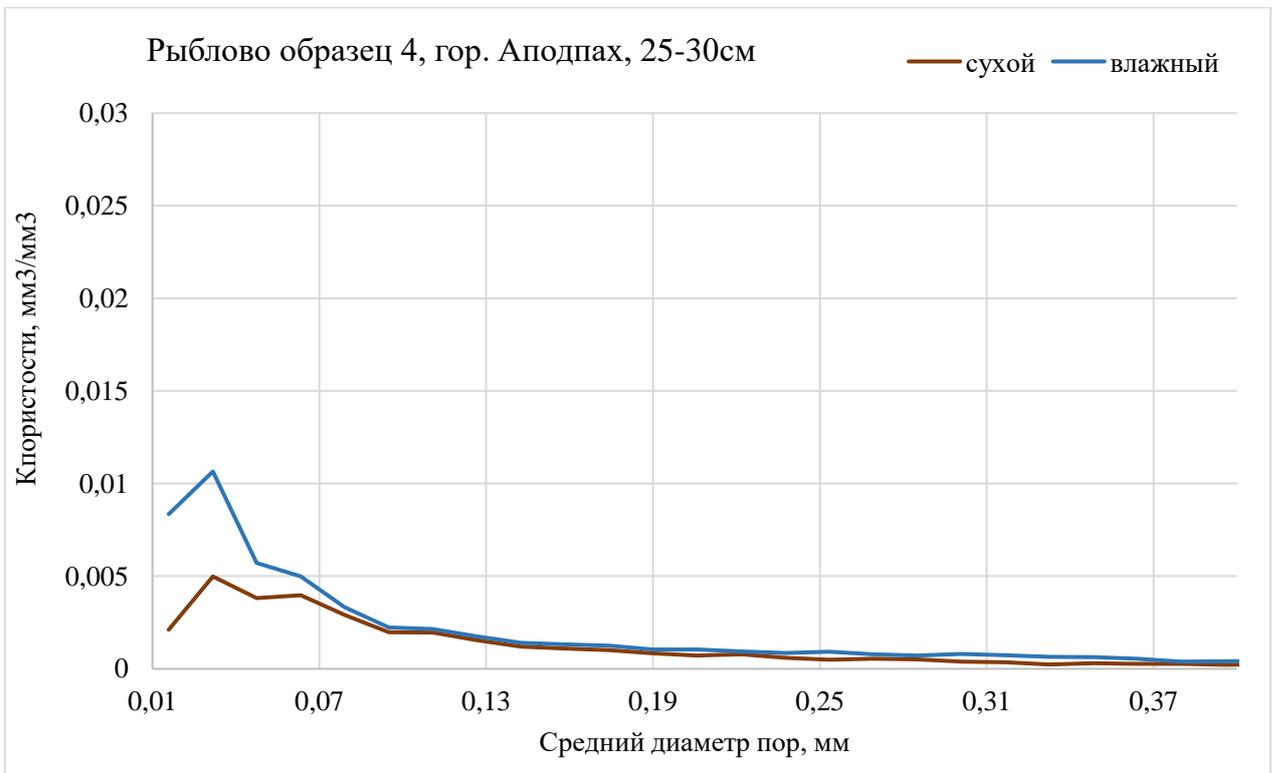


Рисунок 27. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 4, горизонт Аподпах, 25-30см

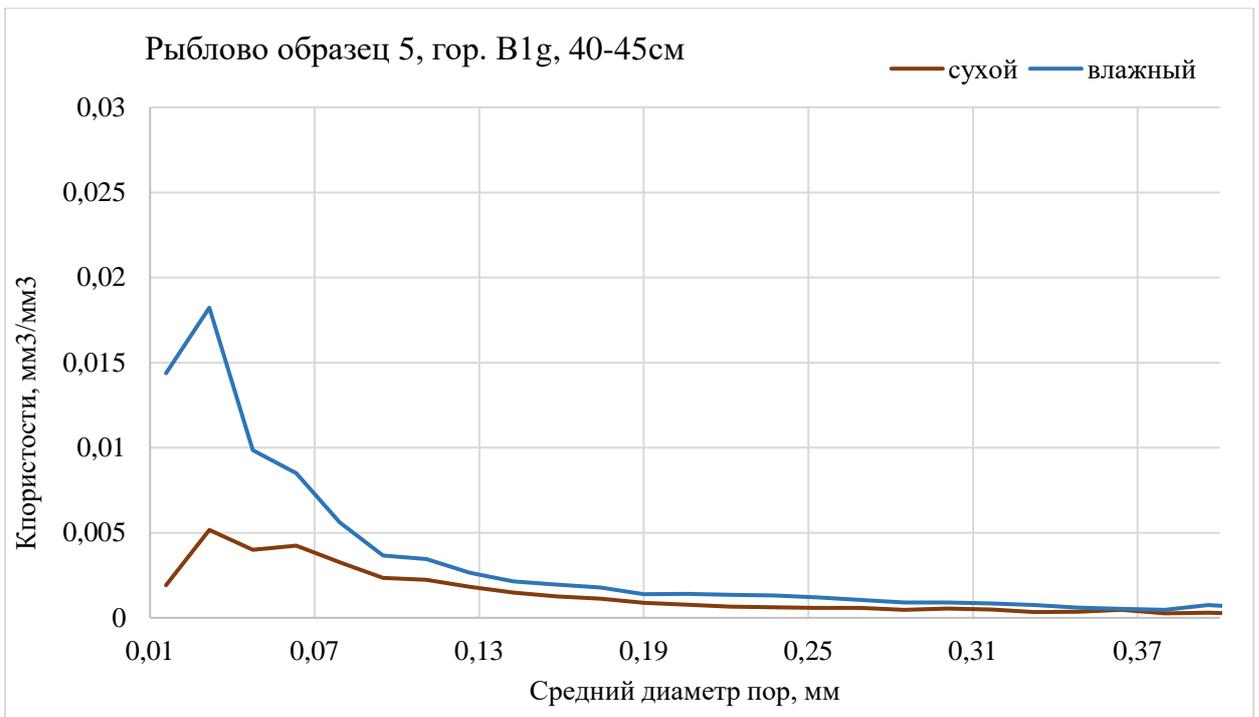


Рисунок 28. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 5, горизонт V1g, 40-45см

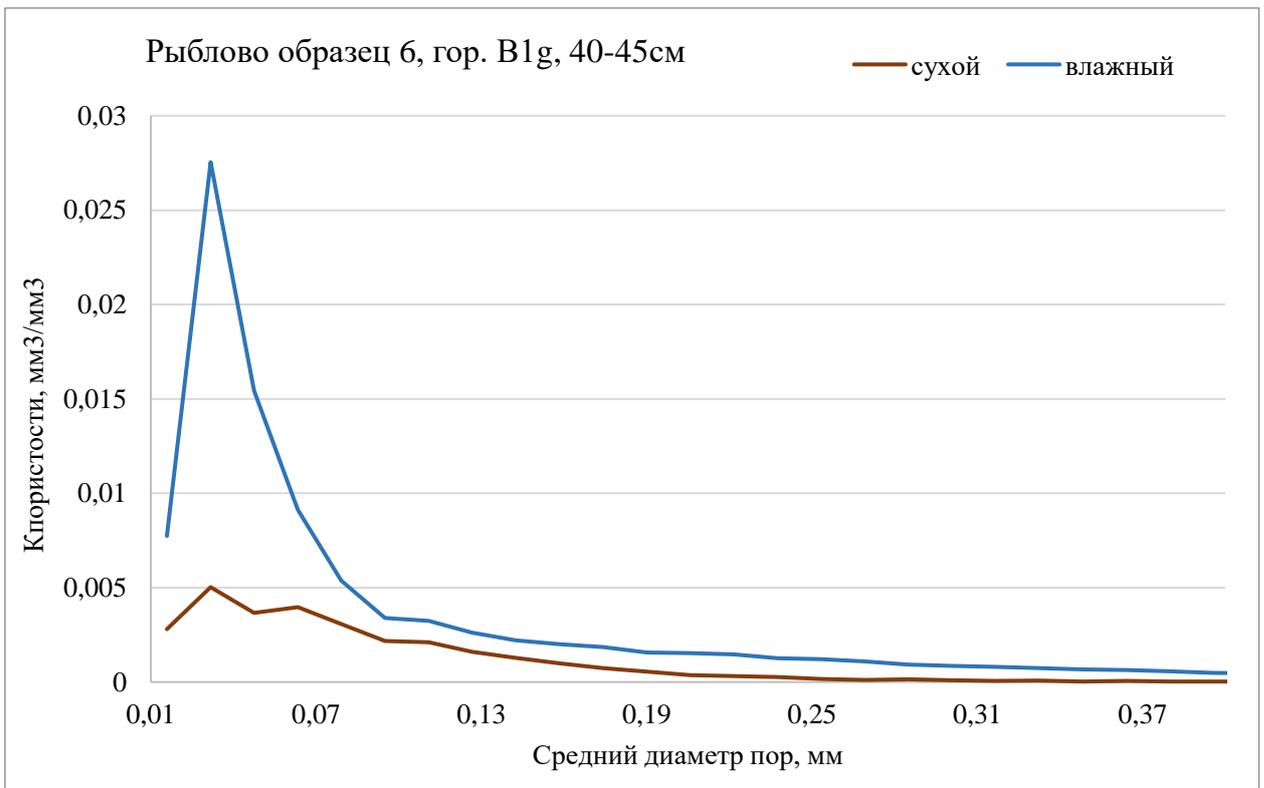


Рисунок 29. Распределение $K_{\text{пор}}$ для пор различного диаметра дерново-аллювиальной глееватой почвы, образец 6, горизонт V1g, 40-45см

На рисунках 24-29 продемонстрировано, что, используя разрешение в 4 мкм были количественно определены поры, диаметром вплоть до 0.01 мм. Особенно важно это, потому что в используемых образцах дерново-аллювиальной глееватой почвы во влажном состоянии такие поры обеспечивают более 50% от всего порового объёма для всех горизонтов. Для образцов агросерой почвы диапазон пор <0.07 мм выпадает, разрешение 8 мкм не позволяет его «увидеть».

Для горизонта В1g на обоих образцах кривые распределения пор влажного и сухого состояния «не сходятся» при рассматриваемом диаметре пор 0.07-0.4 мм, или при давлении 350 см водного столба. Видимо, горизонт обладает такими физико-механическими свойствами, что давление, создаваемое при набухании микро-мезо пор недостаточно, чтобы сомкнуть более крупные поры. Возможно, это связано и с менее подвижной структурой, с большим количеством жёстких связей. Эти связи достаточно жёсткие чтобы не происходило схлопывание макропор при набухании, но недостаточно жёсткие чтобы сдержать появление микро-мезо пор при насыщении почвы влагой (как сдержал бы кирпич, к примеру).

На основании данных по распределению пор по размерам, были выделены области набухания пор при насыщении почвы водой. Этот диапазон пор соответствует давлениям влаги от 375 до 0 см водного столба. Другими словами, от НВ до ПВ, т.е. область капиллярно подвижной влаги. Были рассчитаны площади под этими распределениями в диапазонах матричного давления от 375 до 0 см водного столба (рисунки 30, 31 и раздел «Приложения» рисунки 1-4).

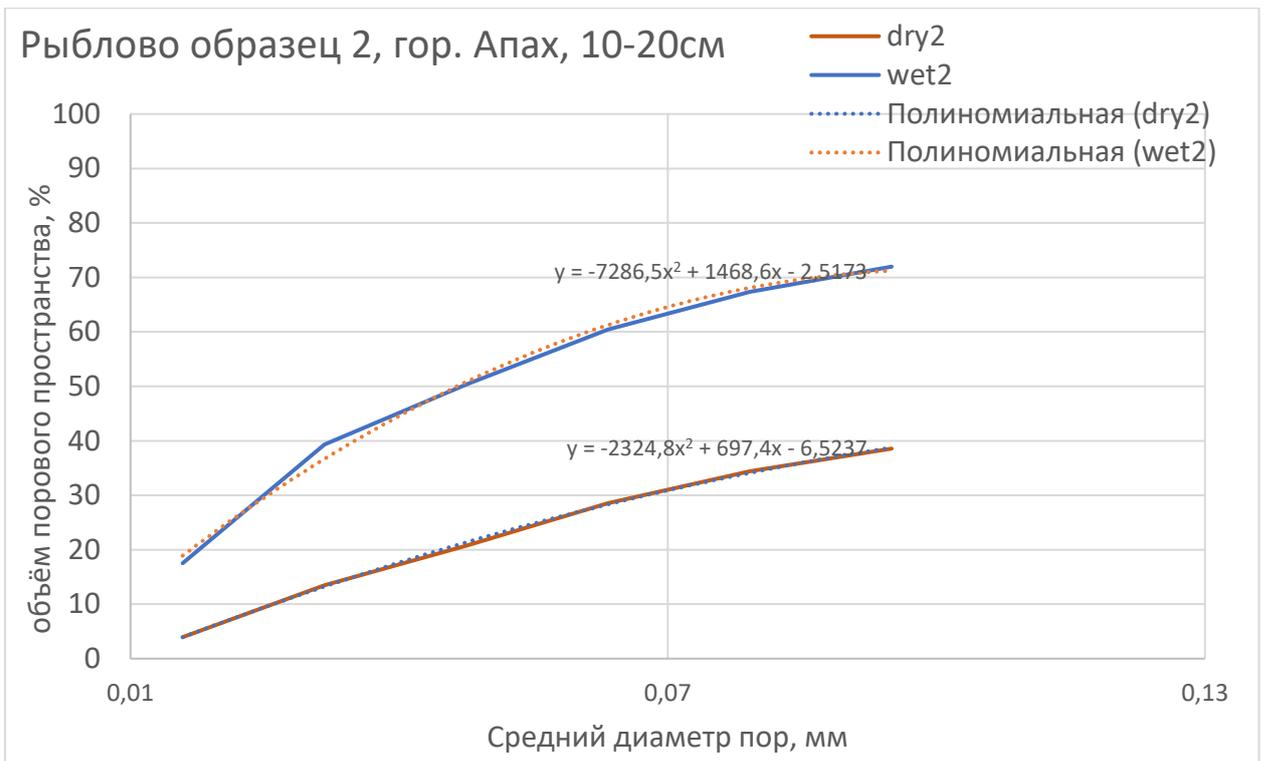


Рисунок 30. Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 2 Апах (10-20см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

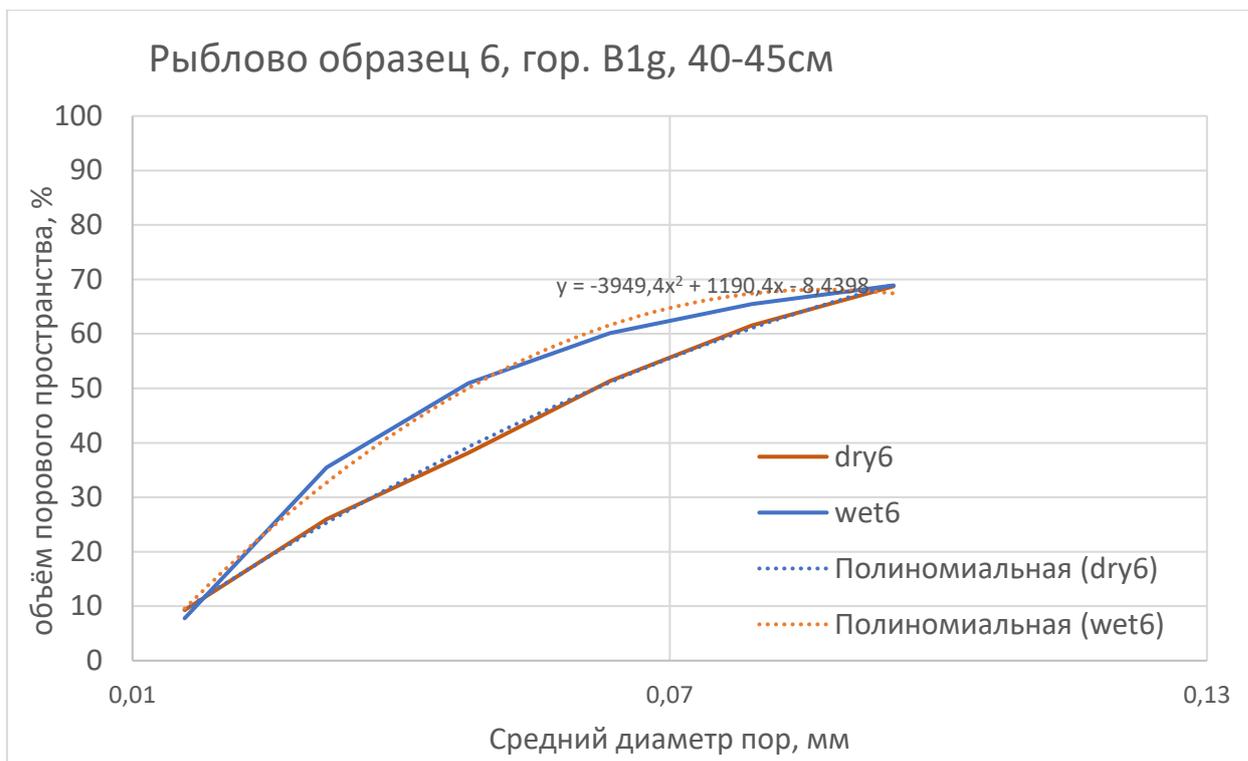


Рисунок 31. Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 6 В1g (40-45см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

Таблица 10.

Интегрально посчитанная площадь, под функциями полиномиально-аппроксимированных графиков распределения пор по размерам в диапазоне давление от 375 до 0 см водного столба для дерново-аллювиальной глееватой почвы

	Ссухих	Свлажных	Свл/Ссух	Свл/сух средний
1(Апах)	3,13	4,15	1,33	2,42
2(Апах)	2,20	4,84	2,20	
3(Аподпах)	3,53	4,50	1,27	1,90
4(Аподпах)	3,16	3,98	1,26	
5(В _{1g})	3,01	4,31	1,43	2,00

$\theta(B_{1g})$	4,02	4,54	1,13
------------------	------	------	------

Интегральным способом расчёта получена площадь S при влажном и сухом состоянии образцов. Физический смысл отношения $S_{вл}/S_{сх}$ заключается в количественном изменении объёма образца за счёт подвижных связей на микро- и мезо- поровом уровне, возможность большего запаса подвижной влаги. Чем больше таких подвижных связей, тем большие пространственные изменения происходят в поровом пространстве почвы при насыщении водой, что может говорить о лучшем физическом состоянии, структурированности почвы (Sorochkin, 1982; Сорочкин, 1991).

Безусловно, одних характеристик томографического порового пространства в виде S_{wet} , S_{dry} недостаточно, чтобы однозначно и определенно судить о направлении изменений агрофизических свойств. Однозначно необходимо использование этих параметров при одновременном, совместном анализе традиционных агрофизических свойств почв в виде плотности, пористости, гранулометрического, микроагрегатного и агрегатного составов. Только такой совместный анализ дает возможно охарактеризовать агрофизические свойства, направление и сущностную основу их изменений.

Из Таблицы 10 видно, что отношение $S_{вл}/S_{сх}$ в подпахотном горизонте минимальное во всём исследуемом профиле и составляет (1.9), при этом незначительно отличается от горизонта B_{1g} (2.0). В то время как Апах горизонт имеет лучший показатель (2.42), что может говорить о деградированном состоянии подпахотного горизонта, что подтверждается пограничными с критическими значениями плотности этого горизонта, застоём влаги в этих участках и, как следствие, потерю урожая.

3.2. Анализ функционалов Минковского и чисел Бетти для агрофизической оценки структуры порового пространства

Детально рассмотрим образец с глубиной отбора 5-10 см из Апах горизонта агросерой почвы, изображение порового пространства которого приведено на рисунке 30, цветами обозначено Евклидово расстояние до твердой фазы, которое можно интерпретировать как радиус поры. Следует отметить, что часть пор и каналов малого размера, присутствующие на изображении сухого образца (рисунок 5а), отсутствуют на изображении влажного образца (рисунок 5б). Крупные полые поры и каналы уменьшились в размере и сохранились на изображении образца во влажном состоянии. Интегральная средняя кривизна порового пространства уменьшается только в диапазоне <0.4 мм, что объясняется закрытием очень тонких макропор (обладающих большой удельной кривизной поверхности). тонкие макропоры, и макропоры больших диаметров и трещины лишь незначительно сужаются.

Интегральная средняя кривизна порового пространства уменьшается только в диапазоне <0.4 мм, что объясняется закрытием мелких макропор (обладающих большой удельной кривизной поверхности). Крупные макропоры и трещины лишь незначительно уменьшаются в размере, принципиально не меняя форму, поэтому их кривизна меняется незначительно.

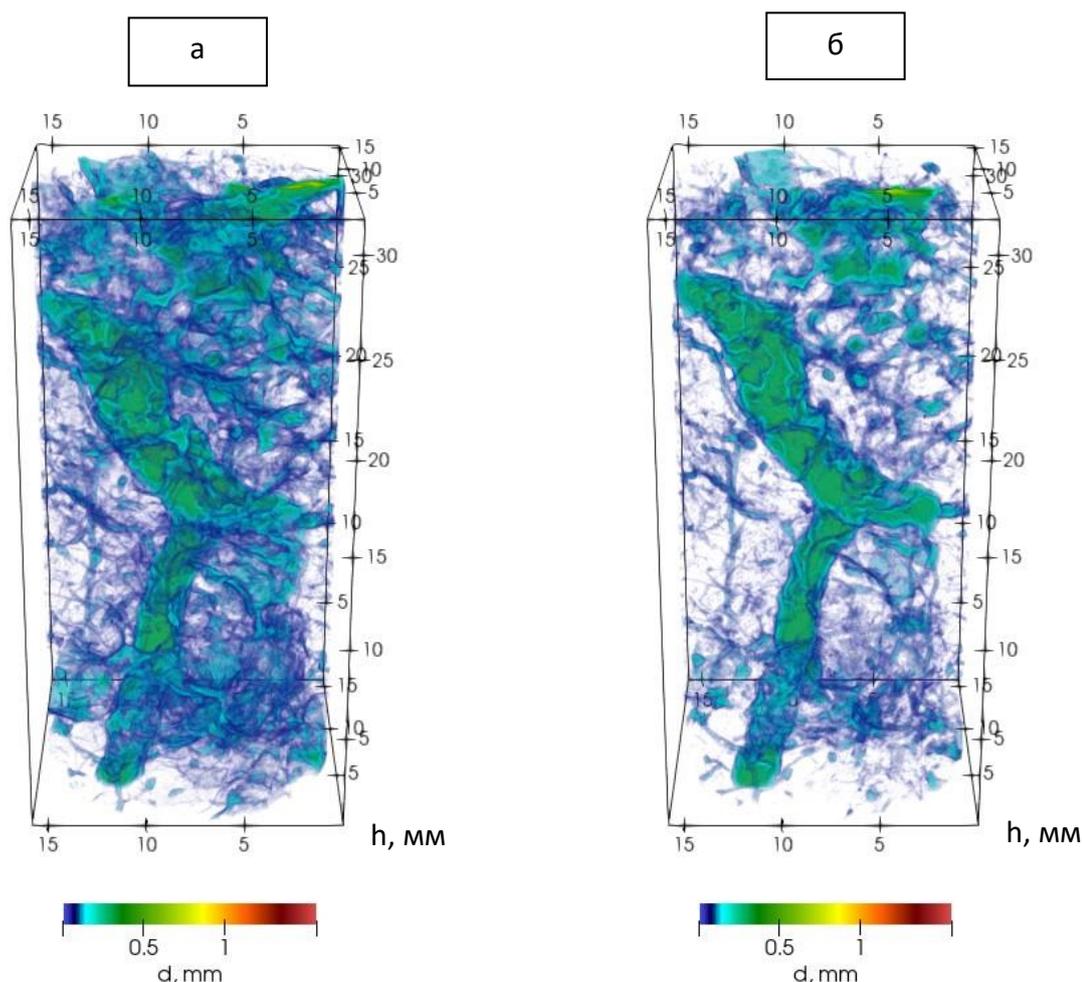


Рисунок 30. Визуализация порового пространства образца №1 агросерой почвы, отобранного на глубине 5-10 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

Изменения в структуре порового пространства в разных состояниях почвы иллюстрируют распределения характеристики Эйлера-Пуанкаре (χ) и чисел Бетти. Значение χ показывает разность b_0 и b_1 топологическую сложность структуры: чем больше ее значение по модулю, тем более один вид пор преобладает над другим. Чем более отрицательна характеристика Эйлера-Пуанкаре χ , тем больше разветвленных, связанных и сообщающихся между собой пор относительно отдельных, топологически простых (шаров) по структуре пор. При больших положительных значениях χ ситуация обратная: топологически простые, отдельные и закрытые поры преобладают над разветвлёнными и связанными между собой.

Для рассматриваемого образца, отобранного с глубины 5-10 см из горизонта А пахотного агросерой почвы в диапазоне макропор характеристика Эйлера-Пуанкаре порового пространства увеличивается в процессе набухания, то есть поровое пространство смещается в сторону топологически менее связного. Это подтверждается анализом чисел Бетти, которые допускают наглядную интерпретацию: нулевое число Бетти соответствует числу отдельных, закрытых кластеров порового пространства, а первое число Бетти – числу разветвлённых, соединённых туннелей внутри твердой фазы. Отдельные поровые пространства (характеризуется b_0) – полые пространства, не имеющие выходов за границы образца, топологически гомеоморфны шару и всегда являющиеся закрытыми порами. Туннели (b_1) – открытые поры, имеющие больше одного выхода за пределы образца (сквозная), либо закрытые поры с формой, топологически гомеоморфной тору.

Изучены топологические инварианты (характеристика Эйлера-Пуанкаре и числа Бетти) всех исследуемых образцов. Для образцов из пахотного горизонта, в процессе увлажнения наблюдается увеличение характеристики Эйлера-Пуанкаре. С другой стороны, для образцов из горизонтов Аподпахотного, АВ и В характеристика Эйлера-Пуанкаре уменьшалась после увлажнения до состояния НВ.

Было отдельно рассмотрено нулевое и первое числа Бетти, т.к., при их взаимном, количественно одинаковым одинаковом изменении чисел b_0 и b_1 характеристика Эйлера-Пуанкаре не изменится, а при одинаковых значениях чисел Бетти она будет равна 0.

Использование Нулевого и Первого чисел Бетти с параллельным анализом распределения пор по размерам показывает различное поведение при увлажнении почвы для двух принципиально разных групп пор, на которые разделены все поры по топологической конфигурации (b_0 и b_1). Числа Бетти подчёркивают различия в изменении структуры порового пространства при

насыщении водой агрофизически благоприятных почвенных слоев и агрофизически деградированных (переуплотненных, с неудовлетворительным коэффициентом фильтрации) горизонтах. Рассмотрим этот процесс подробнее.

Первая группа, туннельные разветвленные связанные между собой поры при увлажнении закрываются и уменьшаются в количестве во всех исследуемых образцах, о чём говорит уменьшение Первого числа Бетти b_1 . Пор, описанных числом b_1 , становится меньше на 38% для образцов пахотного горизонта (0-20см), для образцов более глубоких слоев (20-90см) b_1 в среднем уменьшается на 57%. Т.е. в агрофизически менее благоприятных по свойствам горизонтах количество проводящих, связанных между собой макропор уменьшается на 19% больше, чем в горизонтах, характеризующихся более благоприятными физическими свойствами. Вторая группа, характеризующаяся изменением Нулевого числа Бетти b_0 зависит от агрофизического качества изучаемого горизонта: если в слоях с подплужной подошвой, переуплотнением и неудовлетворительным коэффициентом фильтрации такие макропоры при увлажнении уменьшаются в количестве, то в благоприятных по агрофизическим свойствам горизонтах, количество макропор b_0 увеличивается при увлажнении. Вероятно, это связано с меньшим количеством жёстких межчастичных связей (Сорочкин, 1991). Последнее, в свою очередь, влияет на подвижность и качество структуры порового пространства почвы, её возможным изменениям при действии корней, почвенной биоты, изменения влажности, движении и запаса растворов и газов. Это обеспечивает благоприятные для растений агрофизические условия почвы за счёт большего количества поровых кластеров.

Для рассматриваемого образца агросерой почвы во всем диапазоне размеров пор характеристика Эйлера-Пуанкаре (рисунок 31) порового пространства уменьшается в процессе набухания, то есть поровое пространство смещается в сторону топологически более связанного.

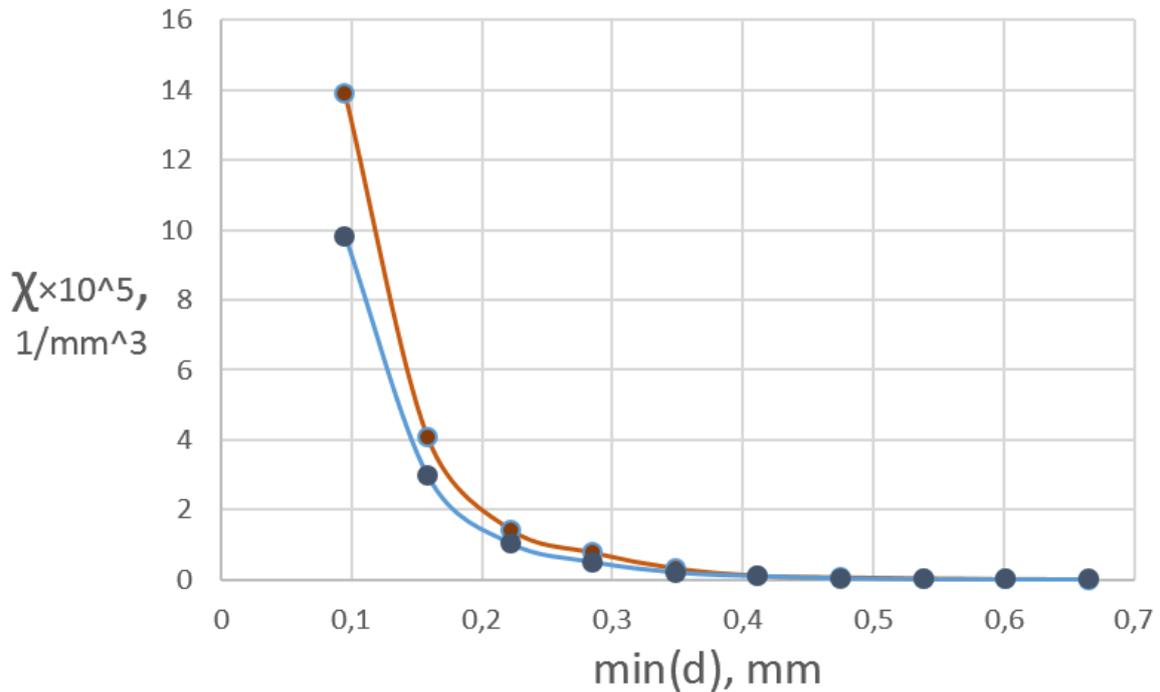


Рисунок 31. Зависимость характеристики Эйлера-Пуанкаре (χ) от минимального диаметра пор для образца №1 агросерой почвы в сухом состоянии (коричневый цвет) и в насыщенном влагой состоянии (синий цвет)

Анализ распределений чисел Бетти для деградированных горизонтов (рисунок 32) показывает, что сухой образец содержит большее число и отдельных пор, и туннелей по сравнению с влажным, причем отличие в основном заключается в диапазоне <0.4 мм. При этом закрытых и топологически простых пор закрывается больше, чем туннелей:

$$b_0^{dry} - b_0^{wet} > b_1^{dry} - b_1^{wet}.$$

Расхождение значений нулевого числа Бетти (рисунок 32 А) при насыщении образца водой охватывает больший диапазон пор, чем расхождение значений первого числа Бетти (рисунок 32 В). Это говорит, что возникающие при набухании силы, оказывают большее влияние на туннельные, разветвленные поры, имеющие диаметром $<0,3$ мм. Количество пор b_0 и b_1 такого диаметра не изменяется при насыщении образцов агросерой

лесной почвы. Вероятно, это связано с размерами микромонолита и общим количеством пор $>0,3\text{мм}$.

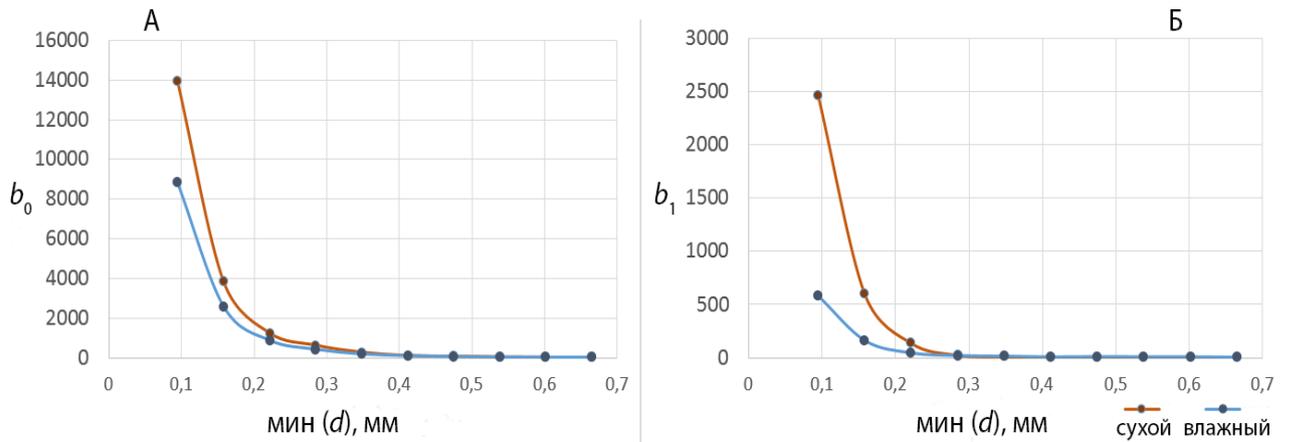


Рисунок 32. Зависимости чисел Бетти: А) нулевое число (b_0); В) первое число (b_1) от размера пор для образца 30-40см горизонта А подпахотного в сухом состоянии (коричневый цвет) и в насыщенном влагой состоянии (синий цвет). Величины b_0 и b_1 представлены зависимостью от минимального диаметра пор

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

Таблица 11.

Сводная таблица эволюции топологических характеристик для образцов агросерой почвы. Три столбца справа представляют взаимосвязь между характеристикой Эйлера-Пуанкаре и числами Бетти порового пространства в сухих и влажных условиях

Sam ple	Depth , cm	Horizon	Topolog y	$\chi^{wet} vs \chi^{dry}$	$b_0^{wet} vs b_0^{dry}$	$b_1^{wet} vs b_1^{dry}$
1	0–10	Апах	Irregular	>	>	<
2	0–10	Апах	Normal	>	<	<
3	0–10	Апах	Irregular	>	>	<

4	10–20	Апах	Irregular	>	>	<
5	10–20	Апах	Irregular	>	>	<
6	20–30	Аподпах	Normal	>	<	<
7	20–30	Аподпах	Normal	<	<	<
8	30–40	Аподпах	Normal	<	<	<
9	30–40	Аподпах	Normal	<	<	<
10	40–50	АВ	Normal	<	<	<
12	80–90	В	Normal	<	<	<
13	80–90	В	Normal	<	<	<

Топологические инварианты (характеристика Эйлера-Пуанкаре и число Бетти) всех исследуемых образцов агросерой почвы представлены в Таблице 14. Для образцов из пахотного горизонта в процессе смачивания наблюдается увеличение характеристики Эйлера-Пуанкаре. С другой стороны, для образцов из горизонтов Аподпахотного, АВ и В характеристика Эйлера-Пуанкаре уменьшалась во время смачивания (за исключением образца № 6). Все образцы можно условно разделить на две группы по механизму топологического изменения порового пространства при насыщении водой:

1. Образцы с “нормальным” изменением топологии (образцы с глубины 20-90 см, горизонты Аподпахотный, АВ и В). Оба числа Бетти (количество соединенных кластеров (b_0) и количество туннелей (b_1)) уменьшились во время набухания. Изменение характеристики Эйлера-Пуанкаре определялось корреляцией между закрытыми порами и закрытыми туннелями: в образцах из вышеупомянутых горизонтов количество закрытых пор было больше, чем количество закрытых туннелей: $b_0^{dry} - b_0^{wet} > b_1^{dry} - b_1^{wet}$, поэтому значение Эйлера-Пуанкаре уменьшилось. Эти образцы были взяты из горизонтов, которые в меньшей степени окультурены или подвергались более пагубному воздействию при использовании в сельском хозяйстве, поэтому была сохранена (или приобретена, для Аподпах) более плотная ($>1,3$ г/см³) и более жёсткая структура. При смачивании некоторые b_1 поры закрываются или, по крайней мере, частично закрываются, что позволяет отнести их к категории

отдельных пор b_0 после насыщения водой. В одном из образцов, взятых с глубины 20-30 см от горизонта Аподпах (образец 6), количество закрытых пор было меньше, чем количество закрытых туннелей, и значение Эйлера-Пуанкаре увеличилось. Корреляция может быть объяснена индивидуальными структурными особенностями образцов, в частности большим количеством небольших туннелей, которые закрывались во время смачивания.

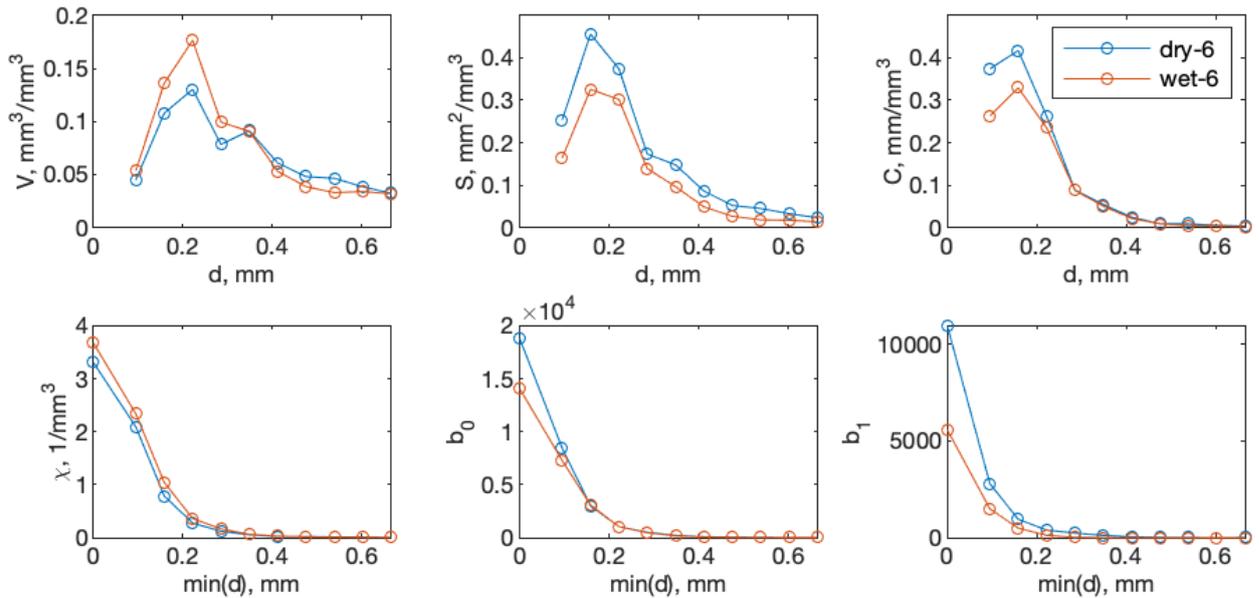


Рисунок 35. Графики зависимости удельных значений функционалов Минковского от размера пор для образца №6 Аподпах агросерой почвы

2. Образцы с “неправильной” изменяющейся топологией (0-20 см, пахотный горизонт). В этих образцах b_1 (количество туннелей) уменьшилось, но b_0 (количество соединенных кластеров) увеличилось во время процесса смачивания. В этом случае наблюдалось увеличение числа мелких пор (это также было доказано увеличением интегральной средней кривизны в этом диапазоне). По-видимому, во время набухания некоторые поры становятся меньше, но недостаточно, чтобы закрыться. Другим объяснением может быть механизм, при котором мелкие поры не закрываются, потому что они заполнены рентгенопрозрачным веществом, например, зажатой маятниковой

водой (San José Martínez et al., 2015). В образцах из пахотного горизонта на глубине 10-20 см ряд туннелей сузился, что можно объяснить наличием корней растений в большинстве туннелей. Для большинства сельскохозяйственных культур в условиях мягкого климата около 50% всех корней растений накапливается на глубине 8-20 см (Ohser, Schladitz, 2009; Jackson et al., 1996). Эти корни могут удерживать туннели открытыми во время увлажнения почвы. Следует отметить, что в одном из образцов из пахотного горизонта на глубине 0-10 см (образец 2) изменение топологии порового пространства произошло в соответствии с “нормальным” изменением.

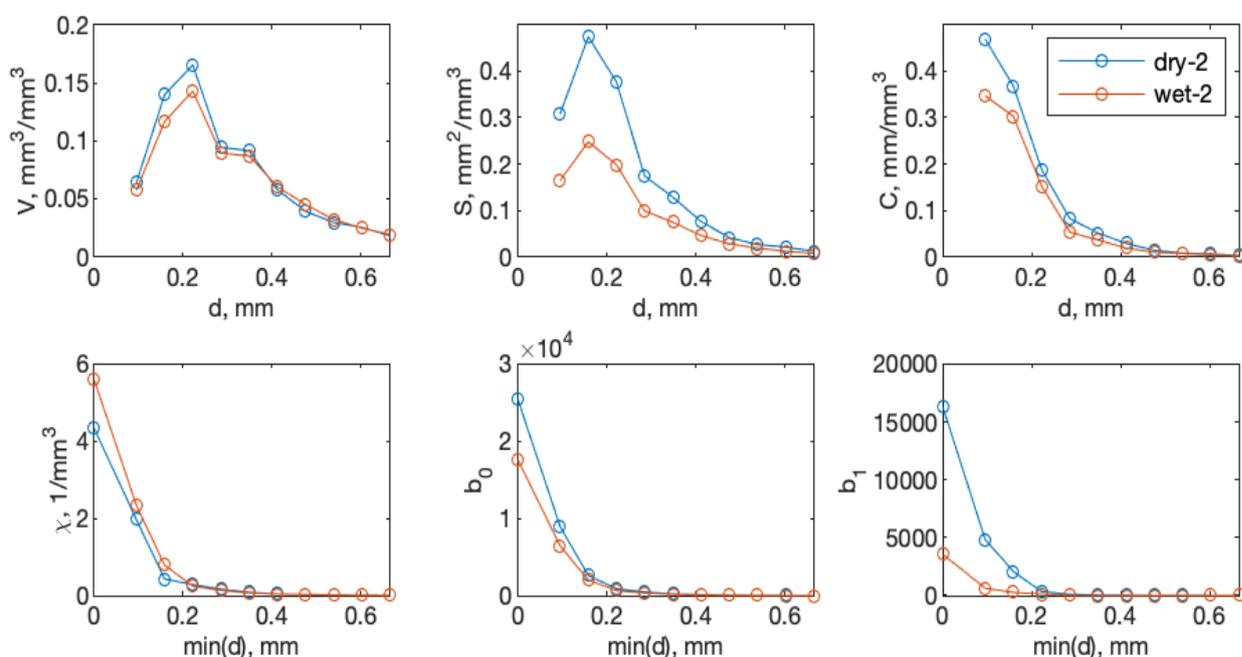


Рисунок 36. Графики зависимости удельных значений функционалов Минковского от размера пор для образца №2 Апах агросерой почвы

Таким образом, соотношение Нулевого числа Бетти во влажных и сухих образцах предлагается новым томографическим показателем в современных агрофизических исследованиях. Соотношение изменений b_0 и значения плотности (рисунок 37) и Кфильтрации (рисунок 38) для образцов агросерой почвы демонстрирует корреляцию основных агрофизических и предлагаемого томографического показателей. Коэффициент корреляции Пирсона $b_0(\text{вл/сух})$

с плотностью составляет $-0,88$ с доверительным интервалом от $-0,61$ до $-0,97$. Между $K_{\text{фильтрации}}$ и $b_0(\text{вл/сух})$ коэффициент корреляции Пирсона имеет значение $0,94$ с доверительным интервалом от $0,79$ до $0,99$.



Рисунок 37. Послойные значения плотности и относительного числа Бетти (для двух влажностных состояний) для образцов агросерой почвы.

Данные отношения нулевых чисел Бетти влажных образцов к сухим могут говорить о применении такой характеристики к диагностике процессов физической деградации, в частности, структуры порового пространства почвы. Для горизонта, в котором диагностировано переуплотнение и наличие подплужной подошвы это отношение меньше $0,8$, что близко к горизонтам с большей глубиной залегания, таким как АВ и В с меньшее благоприятными физическими свойствами. Для пахотного горизонта эти значения варьируют от $1,2$ до $1,3$. Исключением является образец №2 (0-10см). Это может свидетельствовать о наличии структурных деформаций в точке отбора этого образца.

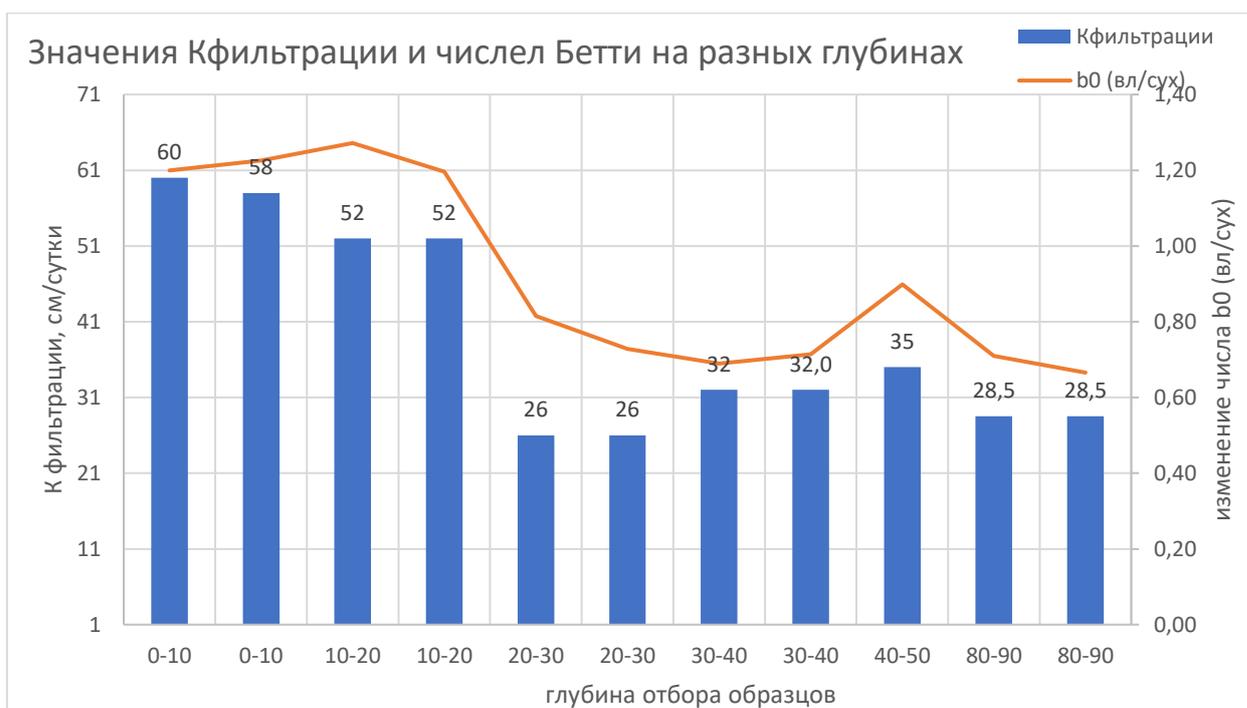


Рисунок 38. Послойные значения Коэффициента фильтрации и относительного числа Бетти (для двух влажностных состояний) для образцов агросерой почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные агрофизические исследования почв направлены на оценку текущего агрофизического состояния и возможных деградационных процессов. Агрофизические исследования занимают в этом направлении важную роль, в особенности при оценке порового пространства, определяющего депозитарные и транспортные характеристики почв. Использование томографического метода исследования структуры порового пространства, как важнейшего количественного инструмента, актуально при такого рода современных агрофизических оценках почв.

В данной работе впервые предложено использовать подход оценки структуры порового пространства в воздушно-сухом состоянии и при величине влажности, близкой к НВ, как характеристик порового пространства в его характерных агрофизически важных состояниях влагосодержания с

целью оценки изменения порового пространства при насыщении, возможностей его трансформации при прорастании семян, распространении корневой системы растений, газопроницаемости и пр. В результате, для характерных почвенных объектов (дерново-аллювиальной глееватой, агросерой) были получены распределения объемов пор по размерам и доказана возможность использования параметров этого распределения для актуальной агрофизической характеристики структуры порового пространства. В работе также впервые были использованы количественные подходы по использованию интегральных методов Минковского и чисел Бетти для оценки форм порового пространства при воздушно-сухом и увлажненном до НВ состояниях, что позволяет сделать цифровые прогностические заключения о происходящих и возможных трансформациях в поровом пространстве почв

Сравнивая отношения пор определённой топологической характеристики (числа Бетти b_0) в сухих и влажных образцах, удалось найти зависимость между этим отношением и некоторыми агрофизическими свойствами (плотность, коэффициент фильтрации) почв.

В работе показана необходимость использования этих параметров при одновременном анализе традиционных агрофизических свойств почв в виде плотности, пористости, гранулометрического, микроагрегатного и агрегатного составов. Только такой совместный анализ дает возможность охарактеризовать агрофизическое состояние и направление его изменений. Безусловно, разработанные в данном исследовании подходы должны быть проверены, опробованы на других почвенных объектах для их правильного методического использования, как в научной интерпретации результатов, так и в практическом направлении.

ВЫВОДЫ

1. Дифференциальное распределение пор в диапазоне диаметров от 0.01 до 0.7 мм в исследованных минеральных тяжелосуглинистых почвах (различные горизонты серых лесных и дерново-аллювиальных глееватых) имеет одновершинный характер с максимум объемов пор от 50 до 300 мм³. При этом кривые распределения пор имеют различия для увлажненных и воздушно-сухих образцов за счет трансформации структуры порового пространства под действием процессов набухания-усадки. Степень этого различия зависит от генетического горизонта и качества (деградированности) структуры и подтверждается классическими агрофизическими исследованиями.
2. В пахотных горизонтах исследованных почв увлажненные образцы имеют в 3-5 раз большие объемы пор в области 0.01-0.1 мм, т.е для диапазона микро и мезопор, осуществляющих функции сохранения доступных для растений запасов влаги и веществ. Объёмы и количество пор большего диаметра, напротив, в большинстве образцов сокращаются при насыщении почвы водой.
3. Предложен методический подход к анализу, расчетам и интерпретации методов топологии для оценки изменения структуры порового пространства почв, основанный на использовании чисел Бетти и характеристике Эйлера-Пуанкаре для воздушно-сухих и влажных при состоянии близком к НВ ненарушенных образцов почв. Показано, что при набухании, для горизонтов с благоприятными физическими свойствами уменьшается Первое число Бетти и возрастает Нулевое число Бетти в диапазоне макропор, при этом для горизонтов с неблагоприятными физическими свойствами оба этих числа в диапазоне макропор уменьшаются. Обнаружено высокое соответствие (корреляция) между указанными томографическим параметром (отношением Нулевого числа Бетти во влажном и сухом состояниях и традиционными агрофизическими показателями (плотность почвы, коэффициент фильтрации)

4. Отношение характеристики числа Бетти b_0 влажных образцов к сухим, может говорить о наличии структурных деформаций. Значения этого отношения $\leq 0,8$ соответствует подпахотному горизонту с наличием подпахотного уплотнения и генетическим горизонтам с большей глубиной залегания, таких как АВ и В. Для пахотного горизонта эти значения варьируют от 1,2 до 1,3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов К. Н., Герке К. М., Фомин Д. С., Романенко, К. А. Томография в почвоведении: от первых опытов к современным методам (обзор) // Почвоведение. – 2021. – Т. 55. – №. 9. – С. 1097-1112.
2. Александрова Л. Н., Гречин И. П. Почвоведение (ред. Гречина И.П., Кауричев И.С.). М: Колос, 1969.
3. Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование. Пущино, 1995. 320 с.
4. Алифанов В.М. Серые лесные почвы центра Русской равнины: историко-генетический анализ // История развития почв СССР в голоцене. – 1984. – С.80-81.
5. Ахромейко А. Структура почвы. Москва. – 1930.
6. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. – 415 с.
7. Величко А.Ф., Морозова Т.Д. Палеогеографические основы истории формирования современного почвенного покрова // История развития почв СССР в голоцене. Пущино, 1984. С. 14-15.
8. Величко А.Ф., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука, 1996. – 148 с.
9. Вершинин П. В., Мельникова М. К., Мичурин Б. Н., Мошков Б. С., Поясов Н. П., Чудновский А. Ф. Основы агрофизики. – 1959.
10. Воронин А.Д. Основы физики почв. Москва: Изд - во Моск. ун-та. 1986. 244 с.

11. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. Москва: Изд - во Моск. ун-та. 1984. 204 с.
12. Герке К. М., Скворцова Е. Б., Корост Д. В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России // Почвоведение. – 2012. – №. 7. – С. 781-781
13. Давлетшина Д. А., Чувиллин Е. М., Якимчук И. В., Надеев А.Н. Применение рентгеновской микротомографии для исследования микроморфологии мерзлых пород // Тр. III Всерос. конф. “Практическая микротомография”. СПб. – 2014. – С. 45-49.
14. Дембовецкий А. В., Калнин Т. Г., Шеин Е. В. Томографическая пористость почв: особенности распределения пор по размерам в сухих и влажных почвах, связь с гидрологическими свойствами // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. – 2020. – С. 39-40.
15. Дмитриев Е.А., Липатов Д.Н., Милановский Е.Ю. Содержание гумуса и проблема вторых гумусовых горизонтов в серых лесных почвах Владимирского ополья // Почвоведение. – 2000. – С. 6-15.
16. Добровольский Г. В., Урусевская И. С. Почвенно-географическое районирование // Почвенно-геологические условия Нечерноземья. – 1984. – С. 387-464.
17. Зайдельман Ф. Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос. – 1975. – 320 с.
18. Зайдельман Ф. Р., Банников М. В. Водный режим и генезис псевдофибровых и глеевых почв полесий // Почвоведение. – 1996. – №. 10. – С. 1213-1221.
19. Зайдельман Ф. Р., Никифорова А. С. Изменение свойств легких почв Окско-Мещерского полесья под влиянием осушения и окультуривания // Вестник

- Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 1996. – №. 2. – С. 11-15.
20. Захарова С. А. Основная тематическая группа земледельческой лексики «почва (ее свойства, структура)» как источник метафоризации // Научный диалог в языковом пространстве: сборник статей. – 2017. – С. 34.
21. 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.
22. Калнин Т.Г., Ивонин Д.А., Абросимов К.Н., Грачев Е.А., Сорокина Н.В. Анализ томографических изображений структуры порового пространства почв методами интегральной геометрии // Почвоведение. – 2021. – Т. 55. – №. 9. – С. 1113-1123. DOI: 10.31857/S0032180X21090033
23. Качинский Н. А. О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и дифференциальной порозности // Почвоведение. – 1947. – №. 6. – С. 336-348.
24. Качинский Н. А. Физика почвы. – 1965.
25. Кершенбаум В. Я., Аванесов В. С., Микаэлян Э. А., Придвижкин В. А., Семин В. И., Скрипка В. Л., Чайковский Г. П. Испытания нефтегазового оборудования и их метрологическое обеспечение. – 2016.
26. Когут Б. М., Фрид А. С. Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. – 1993. – №. 9. – С. 118-122.
27. Корост Д. В., Калмыков Г. А., Япаскурт В. О., Иванов М. К. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2010. – №. 2. – С. 36-42.
28. Медведев В.В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. // М.: Агропромиздат. – 1988. – 160 с.

29. Милановский Е.Ю., Шеин Е.В., Степанов А.А. Лиофильно-лиофобные свойства органического вещества и структура почвы // Почвоведение. – 1993. – №. 6. – С. 122-126
30. Почвы Московской области и повышение их плодородия, 1974 / Отв. ред. д-р с.-х. наук Л. И. Кораблева и канд. геол.-минерал. наук М. С. Симакова / Всесоюз. с.-х. акад. им. В. И. Ленина. Почв. ин-т им. В. В. Докучаева. С.314
31. Романенко К.А., Рогов В.В., Юдина А.В., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Курчатова А.Н. Исследование микростроения мерзлых почв и дисперсных пород с помощью рентгеновской компьютерной томографии: методы, подходы, перспективы // Бюллетень Почвенного Института им. В.В. Докучаева. – 2016. – № 83.
32. Рубцова Л.П. О генезисе почв Владимирского ополья // Почвоведение. – 1974. – С. 17-27.
33. Самсонова В. П. Статистические характеристики содержания обменных катионов в профиле дерново-подзолистой почвы // Научные доклады высшей школы. Серия биологических наук. – 1976. – №. 4. – С. 76.
34. Скворцова Е. Б., Герке К. М., Корост Д. В., Абросимов К. Н. Строение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (анализ 2D и 3D изображений) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2013. – №. 71. – С. 65-79.
35. Скворцова Е. Б., Шеин Е. В., Романенко К. А., & Абросимов К. Н. Формирование пузырьковых пор в агрегатах из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2020. – №. 7. – С. 840-849.
36. Скворцова Е.Б., Калинина Н.В. Микроморфометрические типы строения порового пространства целинных и пахотных суглинистых почв // Почвоведение. – 2004. – № 9. – С.1114–1125
37. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., Юдина А.В. Микротомографический анализ

- порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2016. – № 11. – С. 1328-1336
38. Сорочкин В.М. О выборе показателей для агрономической оценки структуры почв // Почвоведение. – 1991. – № 7. – С. 50-58.
39. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К., 2007. – 616 с.
40. Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л. Ополья Центральной России и их почвы. М.: Наука, 1971. – 239 с.
41. Умарова А. Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС. – 2011.
42. Шеин Е. В., Милановский Е. Ю., Хайдапова Д. Д., Поздняков А. И., Тюгай З. Н., Початкова Т. Н., Дембовецкий А. В. Практикум по физике твердой фазы почв: Учебное пособие. М.: Буки-Веди, 2017. – 119 с.
43. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Московского университета, 2005. – 432 с.
44. Шеин Е.В., Скворцова Е.Б., Дембовецкий А.В., Абросимов К.Н., Ильин Л.И., Шнырев Н.А. Распределение пор по размерам в суглинистых почвах: сравнение микротомографического и капилляриметрического методов определения // Почвоведение. – 2016. – №. 3. – С. 344-354.
45. Якушевская И. В. О почвах Владимирского ополья. – Научный доклад высшей школы Биологической науки. – 1959.
46. Abramyan A. I., Ezhelev Z. S., Umarova A. B., Suslenkova M. M., Romanenko K. A., Ivanova A. E. Effects of freezing-thawing cycles on porosity and geometric configuration of an artificial soils in laboratory modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 862. – №. 1. – С. 012037.

47. Akai T., Lin Q., Alhosani A., Bijeljic B., Blunt M. Quantification of Uncertainty and Best Practice in Computing Interfacial Curvature from Complex Pore Space Images // *Materials*. – 2019. – T. 12. – №. 13. – C. 2138.
48. Arns C.H., Knackstedt M.A., Martys N. Cross-property correlations and permeability estimation in sandstone // *Physical Review E*. – 2005. – V. 72. – № 4. – P. 046304. doi: 10.1103/PhysRevE.72.046304
49. Arns C.H., Knackstedt M.A., Mecke K.R. Characterisation of irregular spatial structures by parallel sets and integral geometric measures // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2004. – V. 241. – № 1-3. – P. 351–372. doi: 10.1016/j.colsurfa.2004.04.034
50. Asaoka A., Nakano M., Noda T., Kaneda K. Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure // *Soils and Foundations*. – 2000. – T. 40. – №. 3. – C. 75-85.
51. Baldock J. A., Skjemstad J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Organic geochemistry*. – 2000. – T. 31. – №. 7-8. – C. 697-710.
52. Belik A. A., Kokoreva A. A., Bolotov A. G., Dembovetskii A. V., Kolupaeva V. N., Korost D. V., Khomyak A. N. Characterizing macropore structure of agrosoddy-podzolic soil using computed tomography // *Open Agriculture*. – 2020. – T. 5. – №. 1. – C. 888-897.
53. Berg C.F. Permeability Description by Characteristic Length, Tortuosity, Constriction and Porosity // *Transport in Porous Media*. – 2014. – T. 103. – №. 3. – C. 381-400.
54. Brewer R., Sleeman J. R. Soil structure and fabric: their definition and description // *Journal of Soil Science*. – 1960. – T. 11. – №. 1. – C. 172-185.
55. Campbell G. S. *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. – Elsevier, 1985.

- 56.Chan K. Y., Heenan D. P., So H. B. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review // Australian Journal of Experimental Agriculture. – 2003. – T. 43. – №. 4. – C. 325-334.
- 57.Coleman G. B., Andrews H. C. Image segmentation by clustering //Proceedings of the IEEE. – 1979. – T. 67. – №. 5. – C. 773-785.
- 58.Cormack A. M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications // Journal of applied physics. – 1963. – T. 34. – №. 9. – C. 2722-2727.
- 59.Dong Y., Wang L., Wei C. Characterization of Liquid-Vapor Interfaces in Pores During Evaporation //Water Resources Research. – 2022. – T. 58. – №. 9. – C. e2021WR031908.
- 60.Fedotov A., Grishin P., Ivonin D., Chernyavskiy M., Grachev E. Natural hydrocarbon samples classification by topological analysis method //Applied Sciences. – 2021. – T. 12. – №. 1. – C. 50.
- 61.Feng Y., Wang J., Liu T., Bai Z., Reading L. Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on three-dimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump // J. Soils Sediments. – 2019. – V. 19. – № 3. – P. 1467–1478. doi: 10.1007/s11368-018-2130-0
- 62.Fomin D. S., Yudina A. V., Romanenko K. A., Abrosimov K. N., Karsanina M. V., & Gerke K. M. Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle //Geoderma. – 2023. – T. 432. – C. 116401.
- 63.Gorbov S.N., Abrosimov K.N., Bezuglova O.S., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S. Microtomography research of physical properties of urban soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 368. – P 012015.

64. Hadwiger Hugo. Vorlesungen über Inhalt." Oberfläche, und Isoperimetrie // Springer-Verlag. Berlin. – 1957.
65. Hajnos M., Lipiec J., Świeboda R., Sokołowska Z., Witkowska-Walczak B. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods // *Geoderma*. – 2006. – T. 135. – С. 307-314.
66. Haralick R. M., Shapiro L. G. Image segmentation techniques // *Computer vision, graphics, and image processing*. – 1985. – T. 29. – №. 1. – С. 100-132.
67. Helliwell J. R., Sturrock C. J., Grayling K. M., Tracy S. R., Flavel R. J., Young I. M., Mooney S. J. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review // *European Journal of Soil Science*. – 2013. – T. 64. – №. 3. – С. 279-297.
68. Hounsfield G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system // *The British journal of radiology*. – 1973. – T. 46. – №. 552. – С. 1016-1022.
69. Iassonov P., Gebrenegus T., Tuller M. Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: A crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures // *Water resources research*. – 2009. – T. 45. – №. 9.
70. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B. Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural–functional assessment of pore space // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – V. 52. – № 1. – С. 50-57.
71. Jackson R. B., Canadell J., Ehleringer J. R., Mooney H. A., Sala O. E., Schulze E. D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes // *Oecologia*. – 1996. – T. 108. – С. 389-411.
72. Karsanina M. V., Gerke K. M., Skvortsova E. B., Mallants D. Universal spatial correlation functions for describing and reconstructing soil microstructure // *PloS one*. – 2015. – T. 10. – №. 5. – С. e0126515.

73. Khaidapova D.D., Klyueva V.V., Skvortsova E.B., Abrosimov K.N. Rheological properties and tomographically determined pore space of undisturbed samples of typical chernozems and soddy-podzolic soils // *Eurasian Soil Sci.* – 2018. – V. 51. – № 10. – P. 1191–1199.
74. Kleber M., Bourg I. C., Coward E. K., Hansel C. M., Myneni S. C., Nunan N. Dynamic interactions at the mineral–organic matter interface // *Nature Reviews Earth & Environment.* – 2021. – T. 2. – №. 6. – C. 402-421.
75. Lal R. Tillage and agricultural sustainability // *Soil and tillage research.* – 1991. – T. 20. – №. 2-4. – C. 133-146.
76. Lanen H. A. J., Bouma J., Randen Y. Mixed qualitative/quantitative land evaluation methodology applied to the EC soil map. Step I: Selection of potentially favourable areas. – 1989.
77. Lavrukhin E. V., Gerke K. M., Romanenko K. A., Abrosimov K. N., Karsanina M. V. Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil XCT images based on pore-scale modelling of saturated flow properties // *Soil and Tillage Research.* – 2021. – T. 209. – C. 104942.
78. Legland D., Kiêu K., Devaux M.-F. Computation of Minkowski measures on 2D and 3D binary images // *Image Analysis Stereology.* – 2011. – № 26. – P. 83. doi:10.5566/ias.v26.p83-92
79. McClure J.E., Armstrong R.T., Berrill M.A., Schlüter S., Berg S., Gray W.G., Miller C.T. A geometric state function for two-fluid flow in porous media. // *Physical Review Fluids.* – 2018. – T. 3. – №. 8. – C. 084306.
80. Mecke K.R., Wagner H. Euler characteristic and related measures for random geometric sets // *Journal of Statistical Physics.* – 1991. – T. 64. – C. 843-850.
81. Michielsen K., De Raedt H. Integral-geometry morphological image analysis // *Physics Reports.* – 2001. – V. 347. – № 6. – P. 461–538. doi:10.1016/S0370-1573(00)00106-X

82. Milanovsky E.Y., Shein E.V., Stepanov A.A. Liophilic-liophobic properties of organic matter and soil structure // Eurasian Soil Science. – 1993. – №.6. – С. 122.
83. Muthukrishnan R., Radha M. Edge detection techniques for image segmentation // International Journal of Computer Science & Information Technology. – 2011. – Т. 3. – №. 6. – С. 259.
84. Nunan, N., Wu, K., Young, I. M., Crawford, J. W., & Ritz, K. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil // FEMS Microbiology Ecology. – 2003. – Т. 44. – №. 2. – С. 203-215
85. Oades J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure // Soil structure/soil biota interrelationships. – Elsevier, 1993. – С. 377-400.
86. Ohser J., Schladitz K. 3D images of materials structures: processing and analysis // John Wiley & Sons. – 2009.
87. Ohser J., Schladitz K. 3D images of materials structures: processing and analysis. – John Wiley & Sons, 2009.
88. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. – 1979. – Т. 9. – №. 1. – С. 62-66.
89. Pal N. R., Pal S. K. A review on image segmentation techniques // Pattern recognition. – 1993. – Т. 26. – №. 9. – С. 1277-1294.
90. Pappas T. N., Jayant N. S. An adaptive clustering algorithm for image segmentation // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing,. – IEEE, 1989. – С. 1667-1670.
91. Ridler T. W., Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method // IEEE trans syst Man Cybern. – 1978. – Т. 8. – №. 8. – С. 630-632.

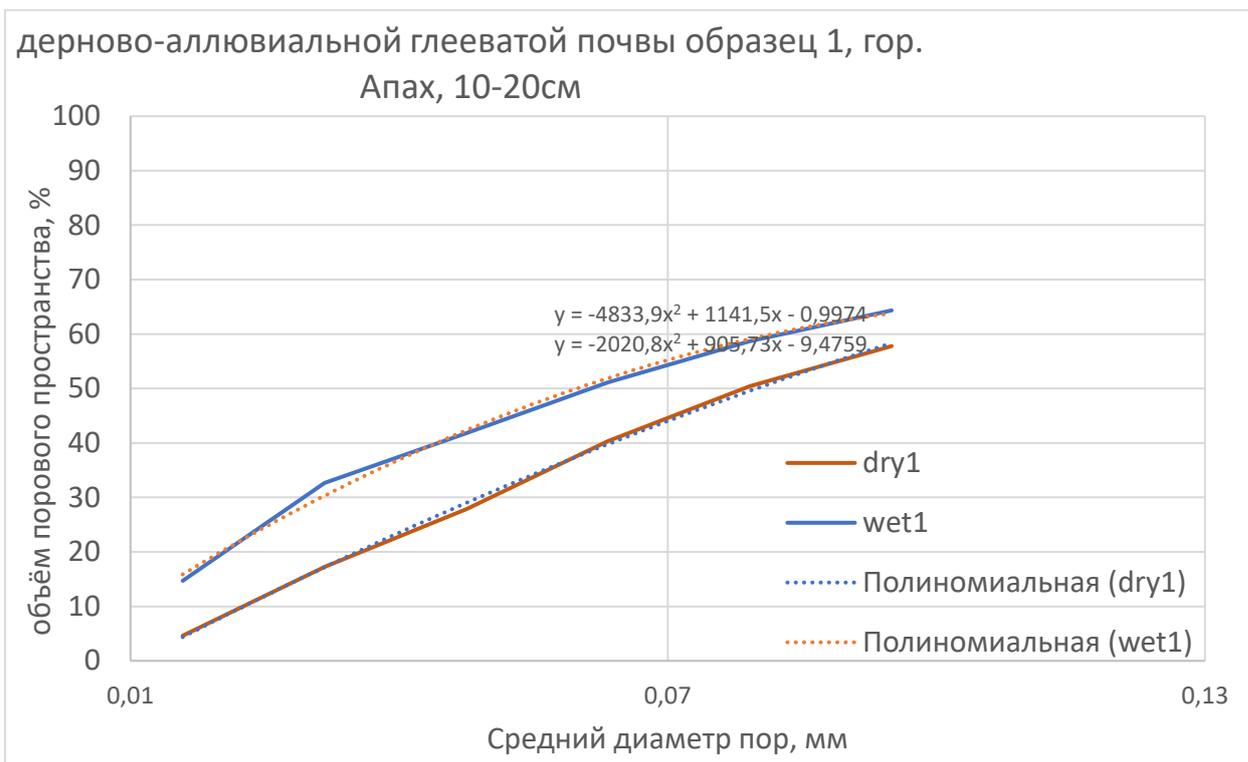
92. Rogasik H., Onasch I., Brunotte J., Jegou D., Wendroth O. Assessment of soil structure using X-ray computed tomography // Geological Society, London, Special Publications. – 2003. – T. 215. – №. 1. – C. 151-165.
93. Romanis T., Sedov S., Lev S., Lebedeva M., Kondratev K., Yudina A., Abrosimov K., Golyeva A., Volkov D. Landscape change and occupation history in the central Russian upland from upper palaeolithic to medieval: Paleopedological record from Zaraysk kremlin // Catena. – 2021, – V. 196, – P. 104873.
94. Said K.A.M., Jambek A.B., Sulaiman N. A study of image processing using morphological opening and closing processes // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – T. 9. – №. 31. – C. 15-21.
95. San José Martínez F., Martín L., García-Gutiérrez C. Minkowski Functionals of Connected Soil Porosity as Indicators of Soil Tillage and Depth // Frontiers in Environmental Science. – 2018. – T. 6. – C. 55.
96. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // Geoderma. – 2015. – T. 237. – C. 36-48.
97. San José Martínez F., Muñoz-Ortega F., Caniego J., Peregrina F. Morphological Functions with Parallel Sets for the Pore Space of X-ray CT Images of Soil Columns // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – T. 173. – C. 995-1009.
98. San José Martínez F., Muñoz-Ortega F., Caniego Monreal F.J., Peregrina F. Morphological Functions to Quantify Three-Dimensional Tomograms of Macropore Structure in a Vineyard Soil with Two Different Management Regimes // Vadose Zone Journal. – 2013. – T. 12. – №. 3. – C. 1-11.
99. 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. – T. 251. – №. 3-4. – C. 163-176.

100. Schäffer B., Mueller T. L., Stauber M., Müller R., Keller M., & Schulin R. Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macro-pore stability in undisturbed and repacked soil // *Geoderma*. – 2008. – T. 146. – №. 1-2. – C. 175-182.
101. Schindelin J., Rueden C.T., Hiner M.C., Eliceiri K.W. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis // *Molecular reproduction and development*. – 2015. – T. 82. – №. 7-8. – C. 518-529.
102. Schladitz K., Ohser J., Nagel W. Measuring Intrinsic Volumes in Digital 3d Images // *Discrete Geometry for Computer Imagery*, Springer Berlin Heidelberg. – 2006. – V. 4245. – P. 247–258. ISBN 978-3-540-47651-1
103. Schlüter S., Leuther F., Albrecht L., Hoeschen C., Kilian R., Surey R., Vogel H. J. Microscale carbon distribution around pores and particulate organic matter varies with soil moisture regime // *Nature communications*. – 2022. – T. 13. – №. 1. – C. 2098.
104. Schlüter S., Weller U., Vogel H. J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks // *Computers & Geosciences*. – 2010. – T. 36. – №. 10. – C. 1246-1251.
105. Schnoor J. L. Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air, and soil. – 1996. – C. xvi+ 682 pp.
106. Serra J. Image analysis and mathematical morphology. – Academic Press Inc. – 1983.
107. Sezgin M., Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // *Journal of Electronic imaging*. – 2004. – T. 13. – №. 1. – C. 146-165.
108. Shein E.V., Kiryushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I. Assessment of agronomic homogeneity and compatibility of soils in the Vladimir Opolie region // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – T. 50. – C. 1166-1172.

109. Skvortsova E.B., Kalinina N.V. Micromorphometric types of the pore space in virgin and plowed loamy soils // Eurasian Soil Science. – 2004. – V. 37. – № 9. – C. 980-991.
110. Skvortsova E.B., Rozhkov V.A., Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Khokhlov S.F., Khaidapova D.D., Klueva V.V., Yudina A.V. Microtomographic analysis of pore space in a virgin soddy-podzolic soil // Eurasian Soil Science. – 2016. – V. 49. – № 11. – P. 1250–1258
111. Sorochkin V. M. Equilibrium density of sod-podzolic soils and its change during processing // Eurasian Soil Science. – 1982. – №2. – C. 129.
112. Sorochkin V. M. On the choice of indicators for agronomic assessment of soil structure // Eurasian Soil Science. – 1991. – № 7. – C. 50-58.
113. Spirkovska L. A summary of image segmentation techniques. – Ames Research Center. – 1993. – T. 104022.
114. Thakur M. M., Kim F., Penumadu D., Herring, A. Pore space and fluid phase characterization in round and angular partially saturated sands using radiation-based tomography and persistent homology //Transport in Porous Media. – 2021. – T. 137. – C. 131-155.
115. Totsche K. U., Rennert T., Gerzabek M. H., Kögel-Knabner I., Smalla K., Spiteller M., Vogel H. J. Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2010. – T. 173. – №. 1. – C. 88-99.
116. Van Veen J. A., Kuikman P. J. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms //Biogeochemistry. – 1990. – T. 11. – №. 3. – C. 213-233.
117. Vogel H. J. Topological characterization of porous media //Morphology of condensed matter: Physics and geometry of spatially complex systems. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. – C. 75-92.

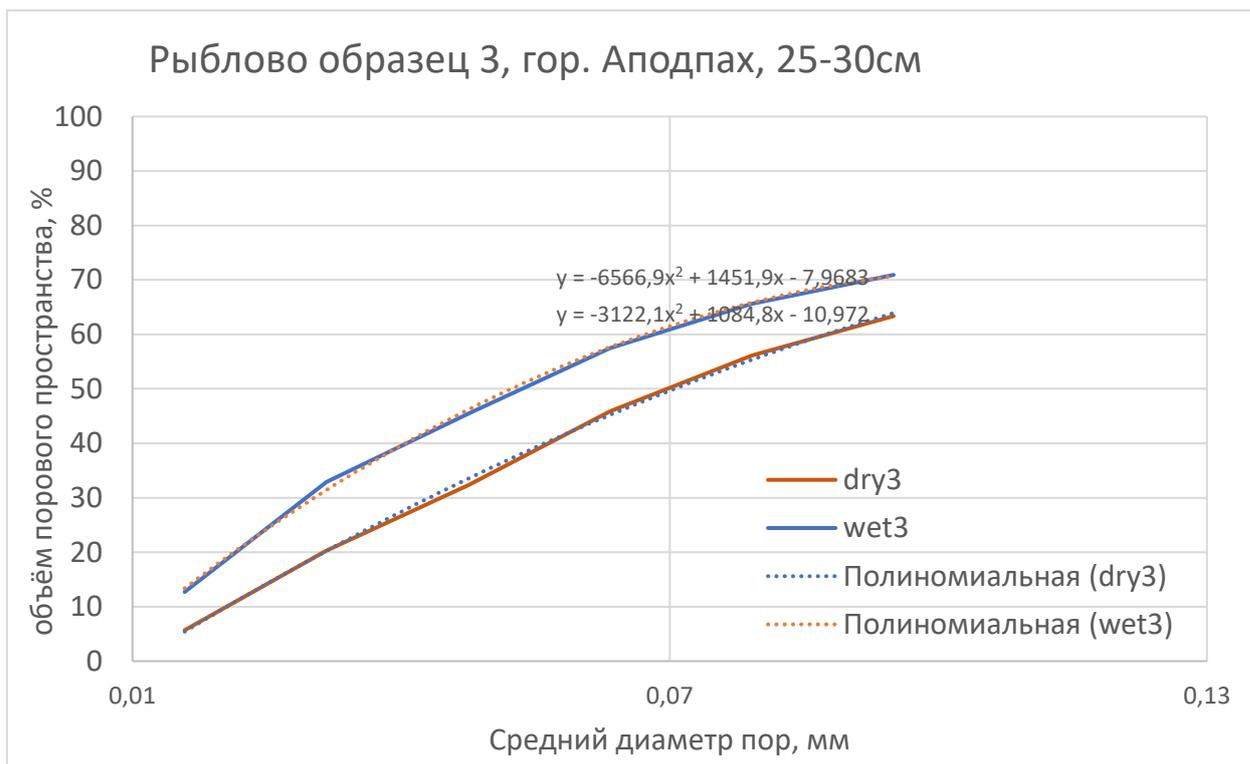
118. Vogel H.J., Weller U., Schlüter S. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. *Computers & Geosciences*. – 2010. – T. 36. – №. 10. – С. 1236-1245.
119. Wang W., Kravchenko A.N., Smucker A.J.M., Liang W., Rivers M.L. Intra-aggregate Pore Characteristics: X-ray Computed Microtomography Analysis // *Soil Science Society of America Journal*. – 2012. – T. 76. – №. 4. – С. 1159-1171.
120. Wildenschild D., Sheppard A. P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems // *Advances in Water resources*. – 2013. – T. 51. – С. 217-246.
121. Wirjadi O. Survey of 3D image segmentation methods. – 2007.
122. Wösten J. H. M., Finke P. A., Jansen M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics // *Geoderma*. – 1995. – T. 66. – №. 3-4. – С. 227-237.
123. Wösten J. H. M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils // *Geoderma*. – 1999. – T. 90. – №. 3-4. – С. 169-185.
124. WRB I. W. G. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps // *World Soil Resources Report*. – 2014. – T. 106.
125. Yanowitz S. D., Bruckstein A. M. A new method for image segmentation // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. – 1989. – T. 46. – №. 1. – С. 82-95.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



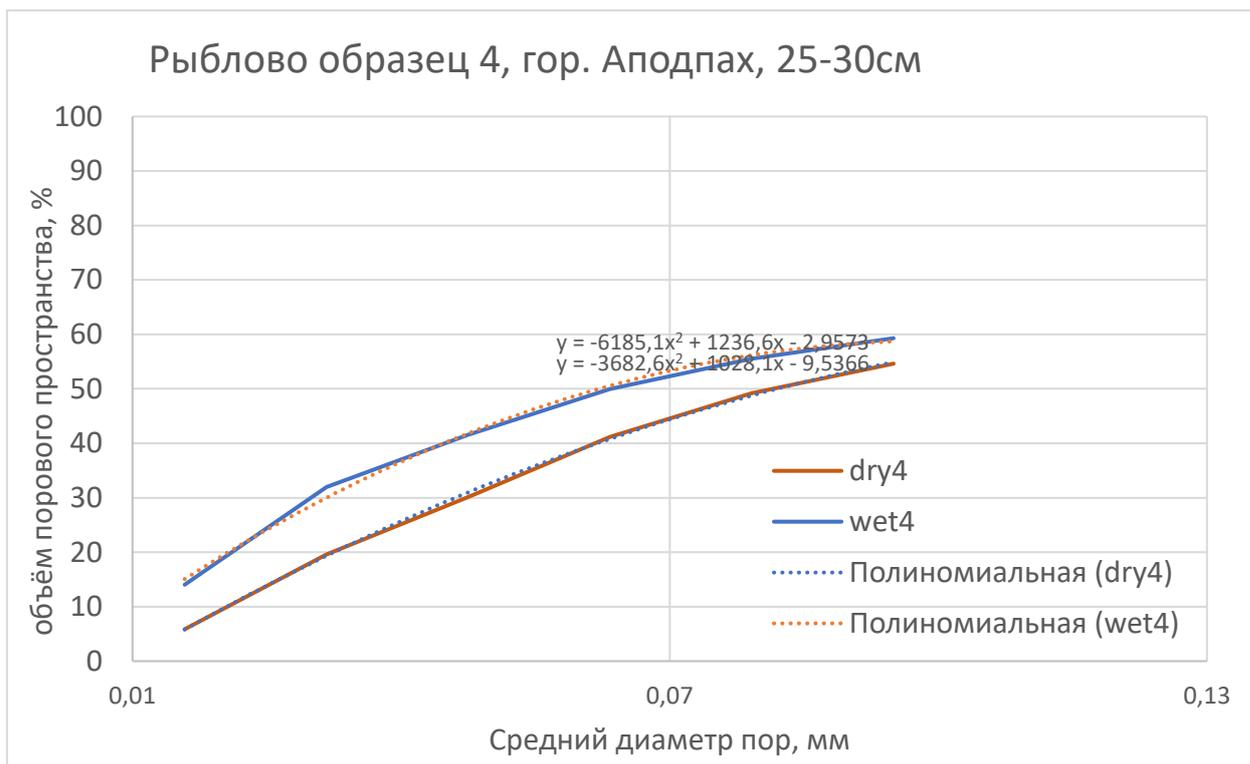
Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 1 Апах (10-20см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



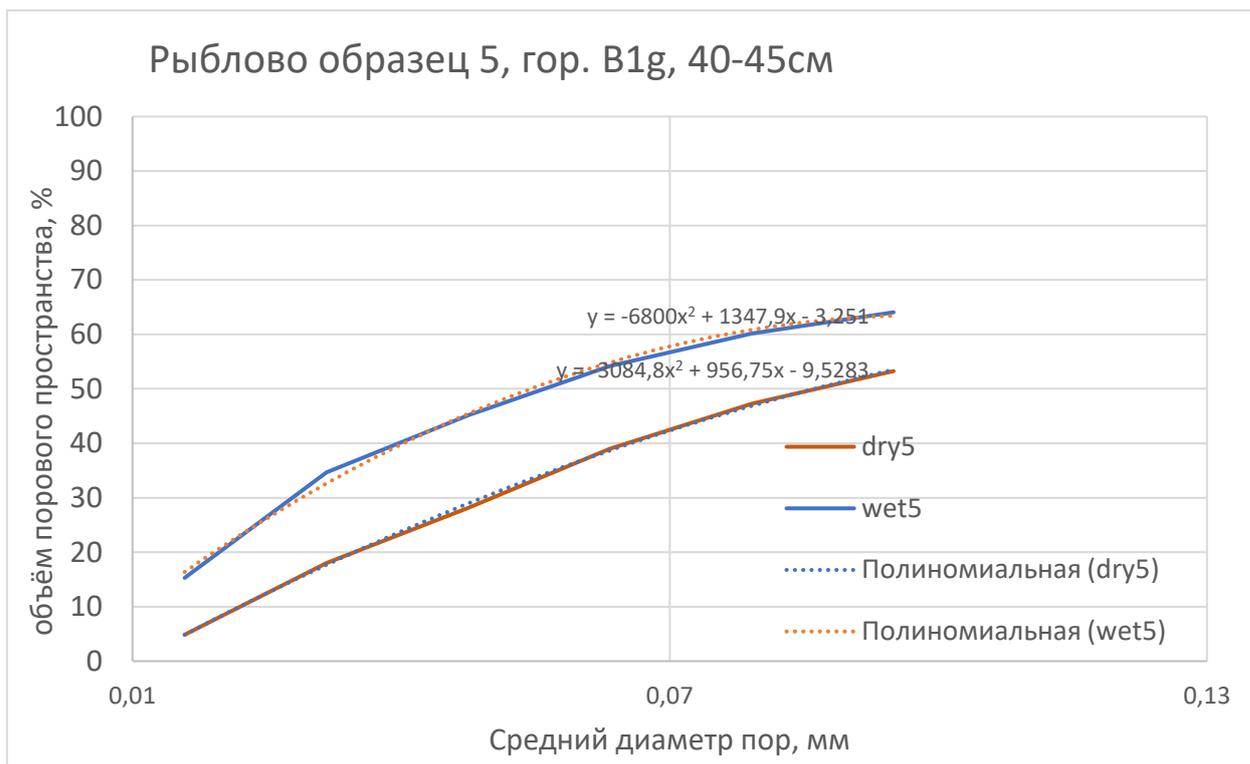
Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 3 Аподпах (25-30см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



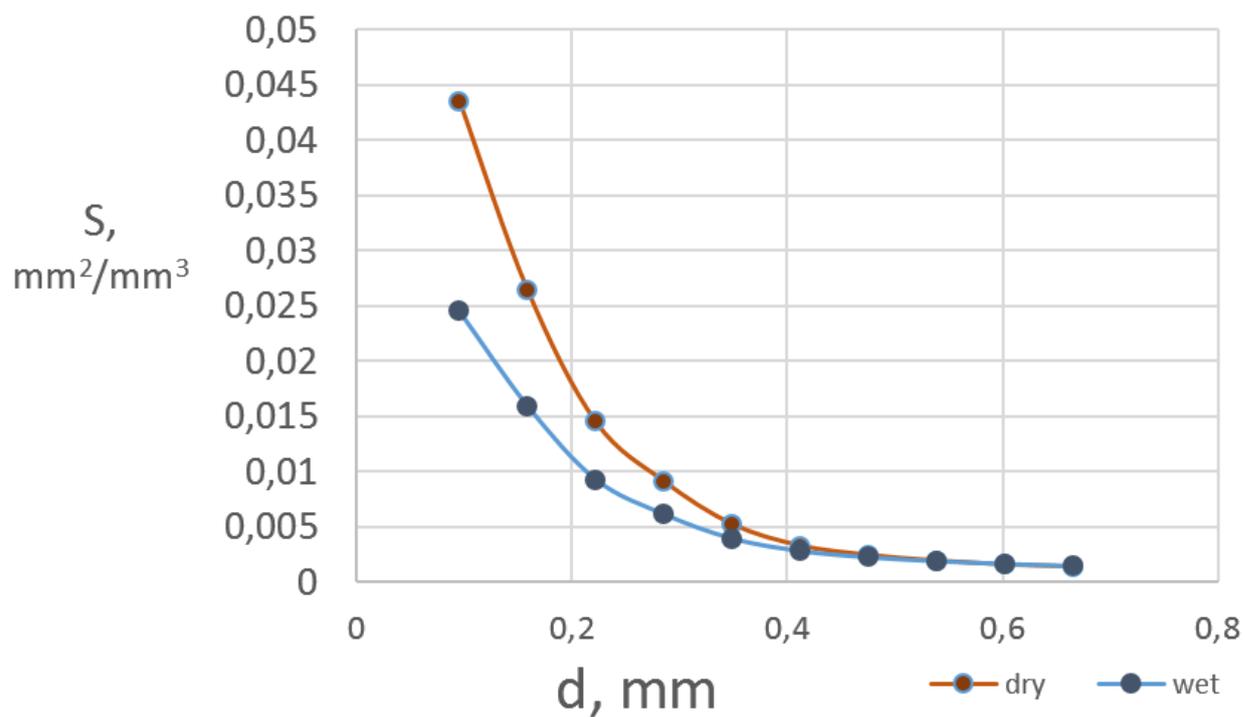
Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 4 Аподпах (25-30см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



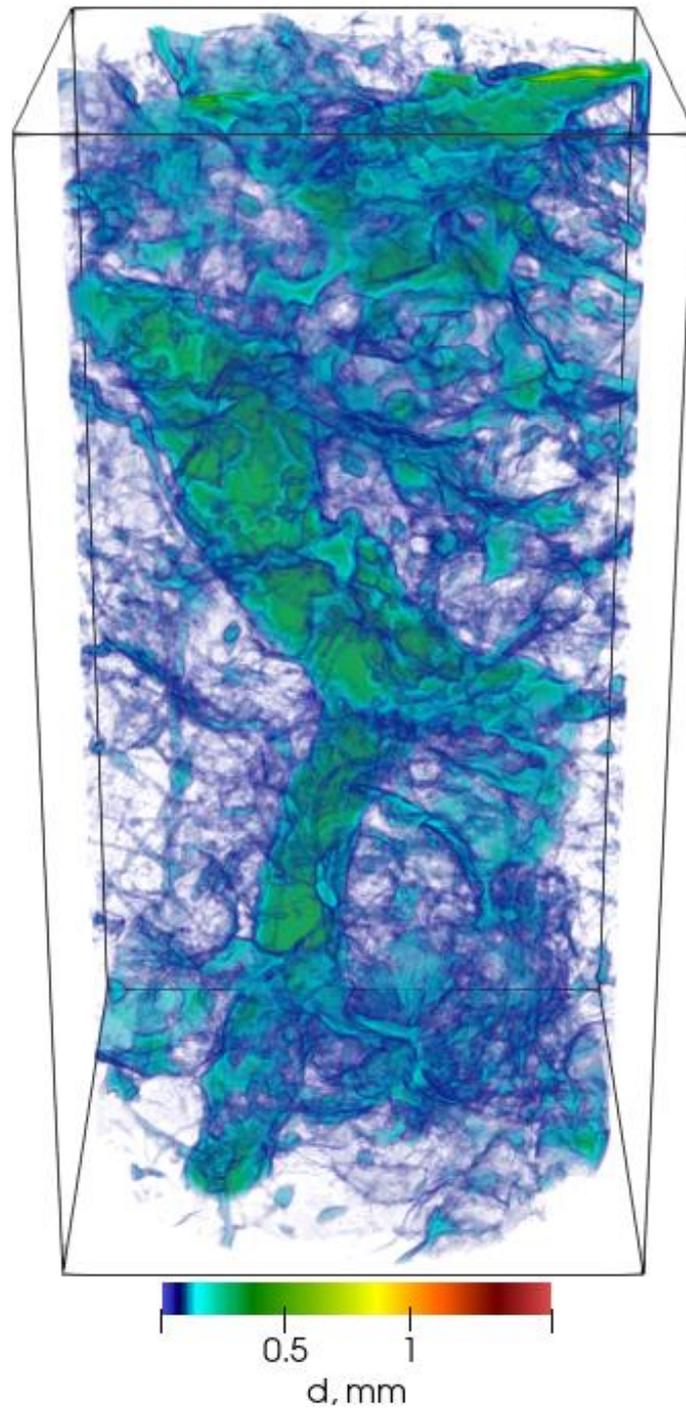
Полиномиальная аппроксимация распределения пор по размерам в диапазоне капиллярного давления от 375 до 0 см водного столба для влажного и сухого состояния образца 5 В1g (40-45см) дерново-аллювиальной глееватой почвы

ПРИЛОЖЕНИЕ 5



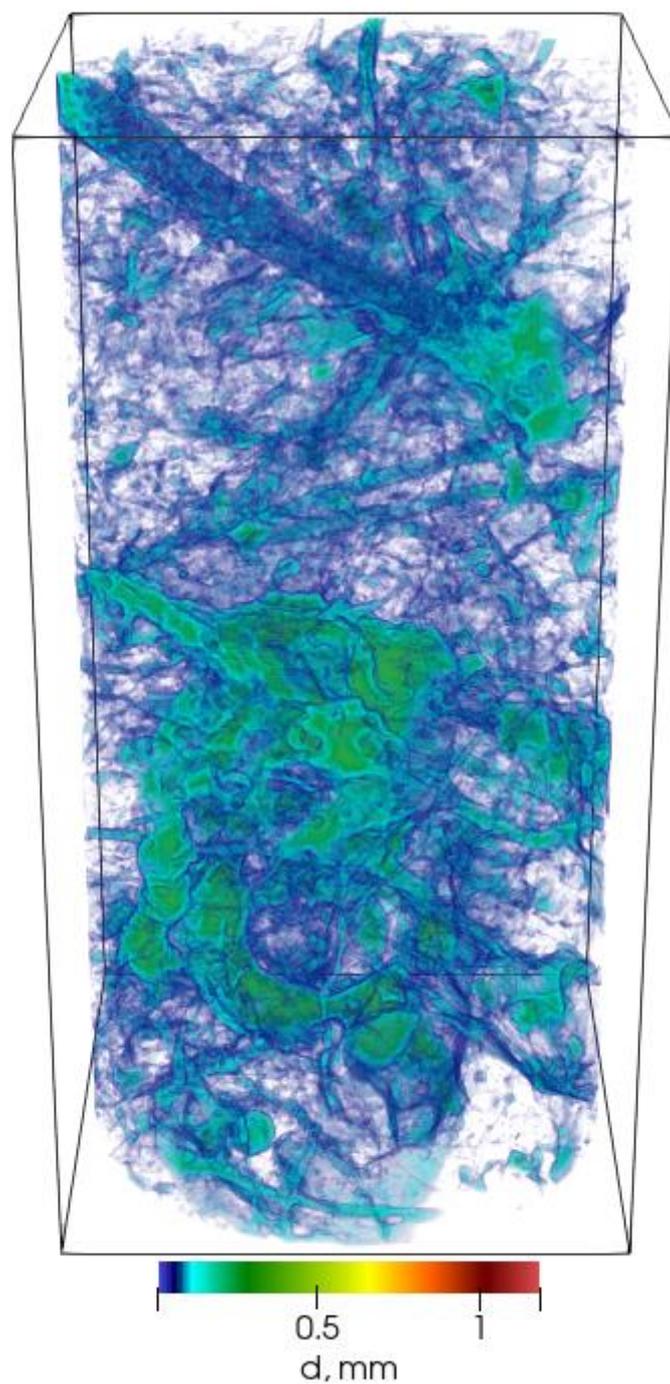
Кумулятивный график зависимости площади поверхности S от размера пор для образца агросерой почвы, отобранного на глубине 30-40см из горизонта А подпахотного во влажном (синий цвет) и сухом (коричневый цвет) состояниях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7



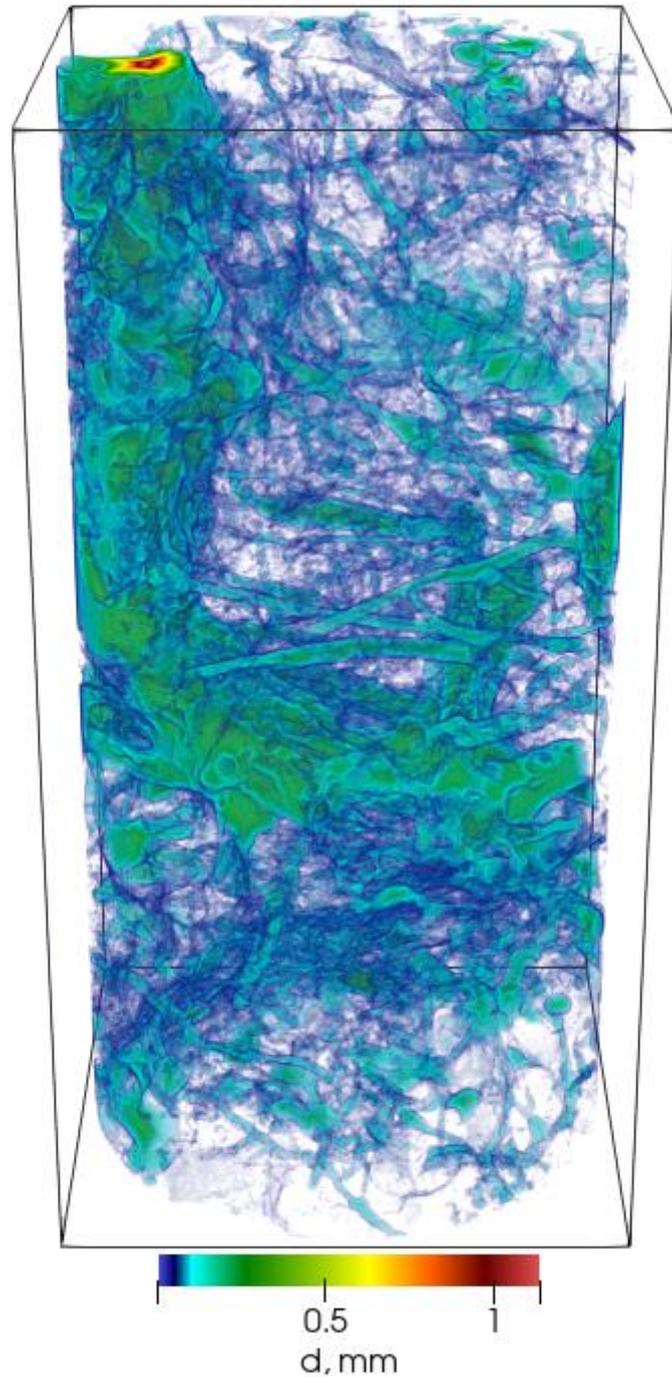
Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 5-10 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8



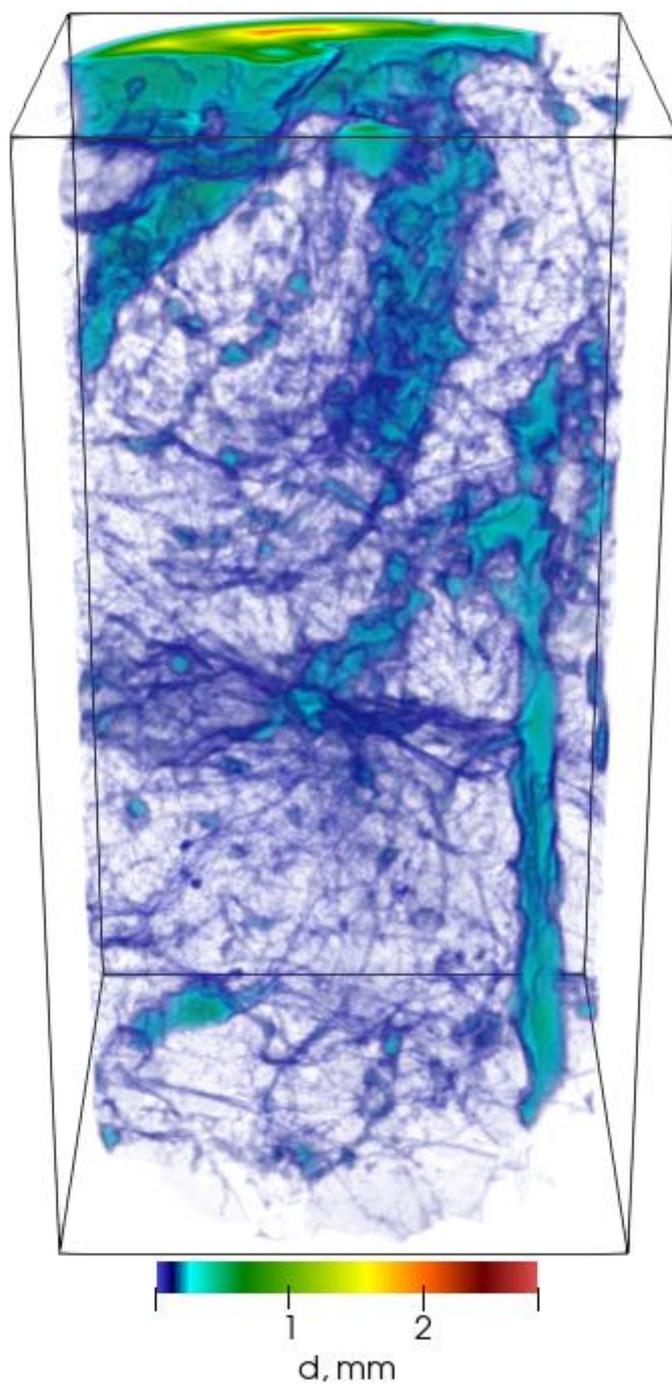
Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 5-10 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9



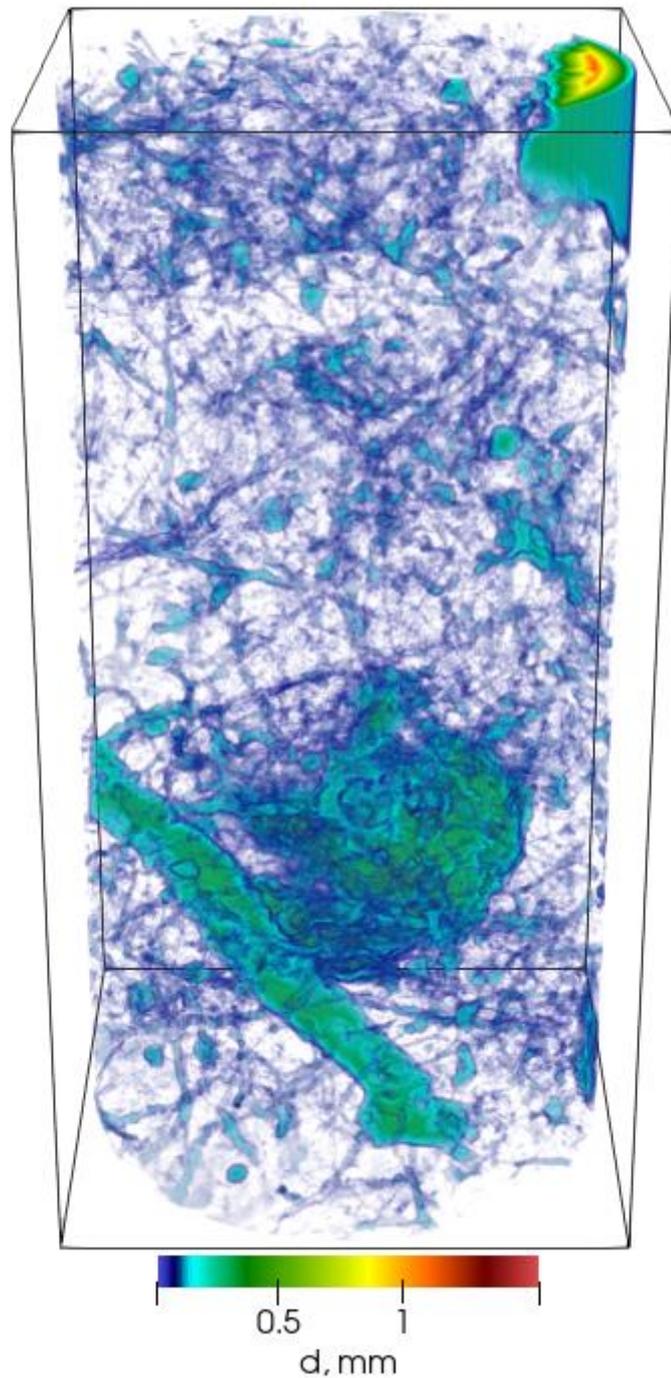
Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 5-10 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10



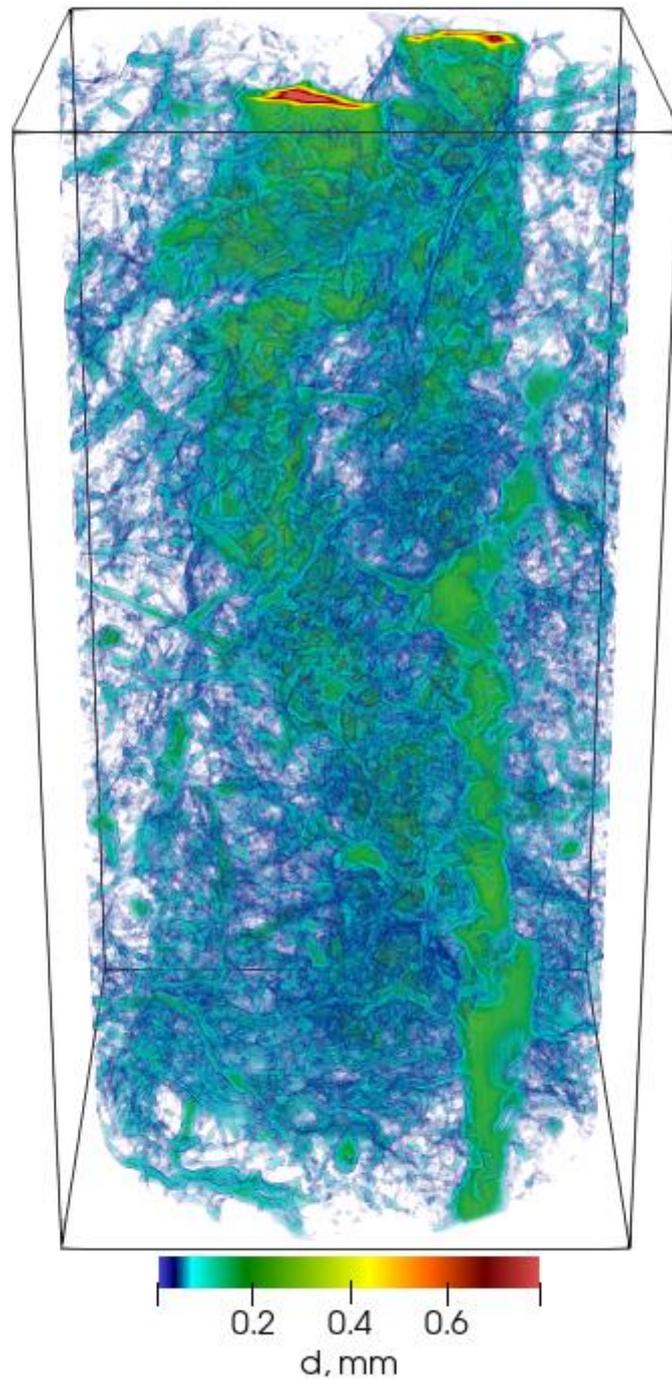
Визуализация порового пространства образца №1 агросерой почвы, отобранного на глубине 10-20 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11



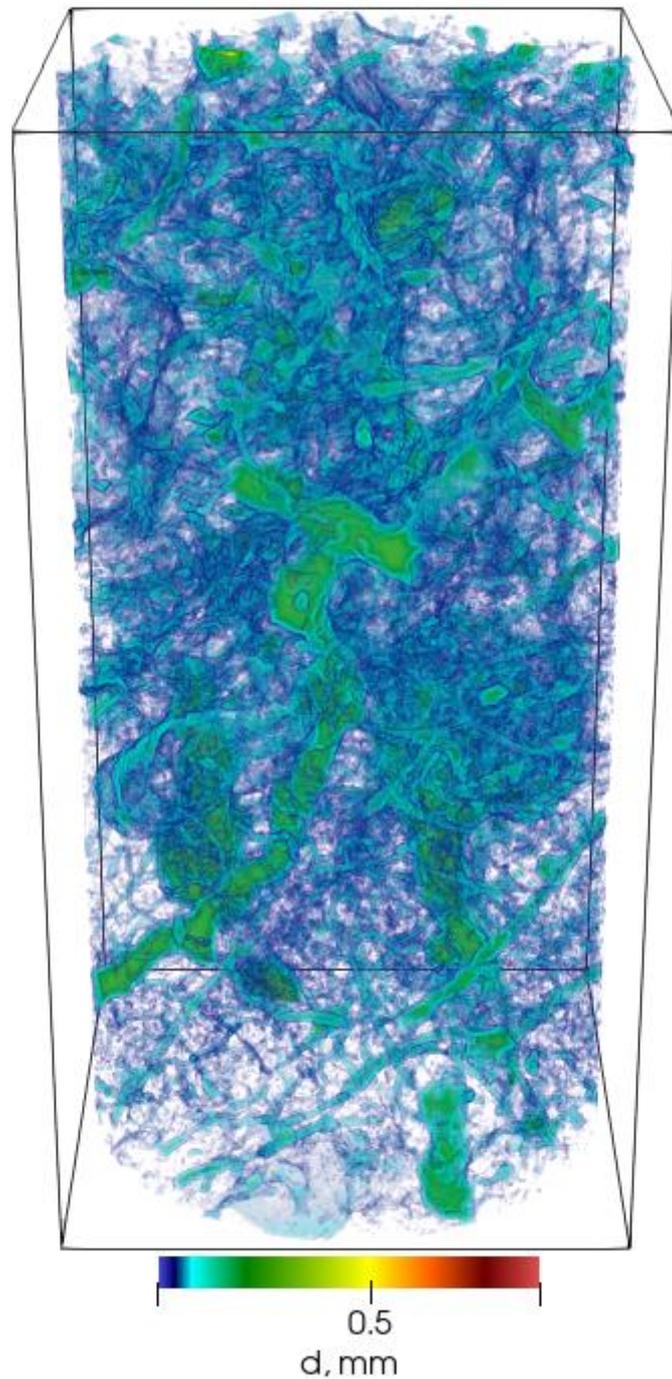
Визуализация порового пространства образца №1 агросерой почвы, отобранного на глубине 10-20 см из горизонта А пахотного в «сухом» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12



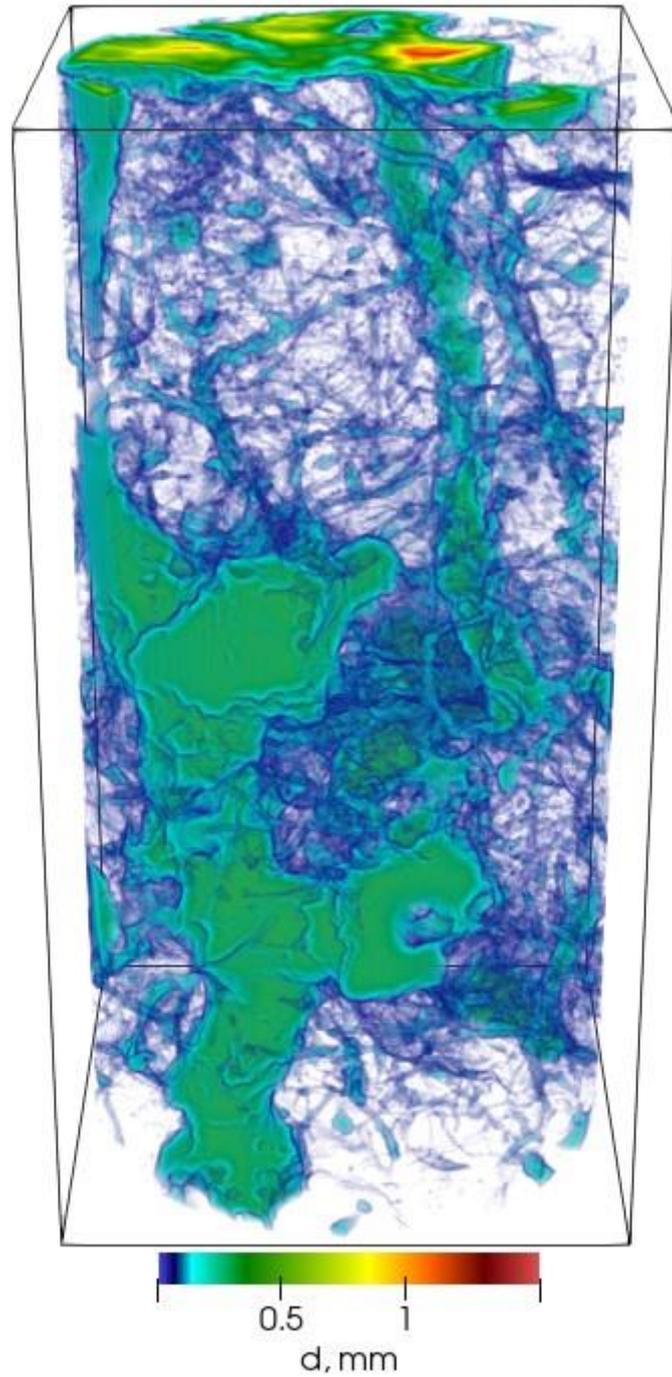
Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 20-30 см из горизонта А подпахотного в «сухом» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 13



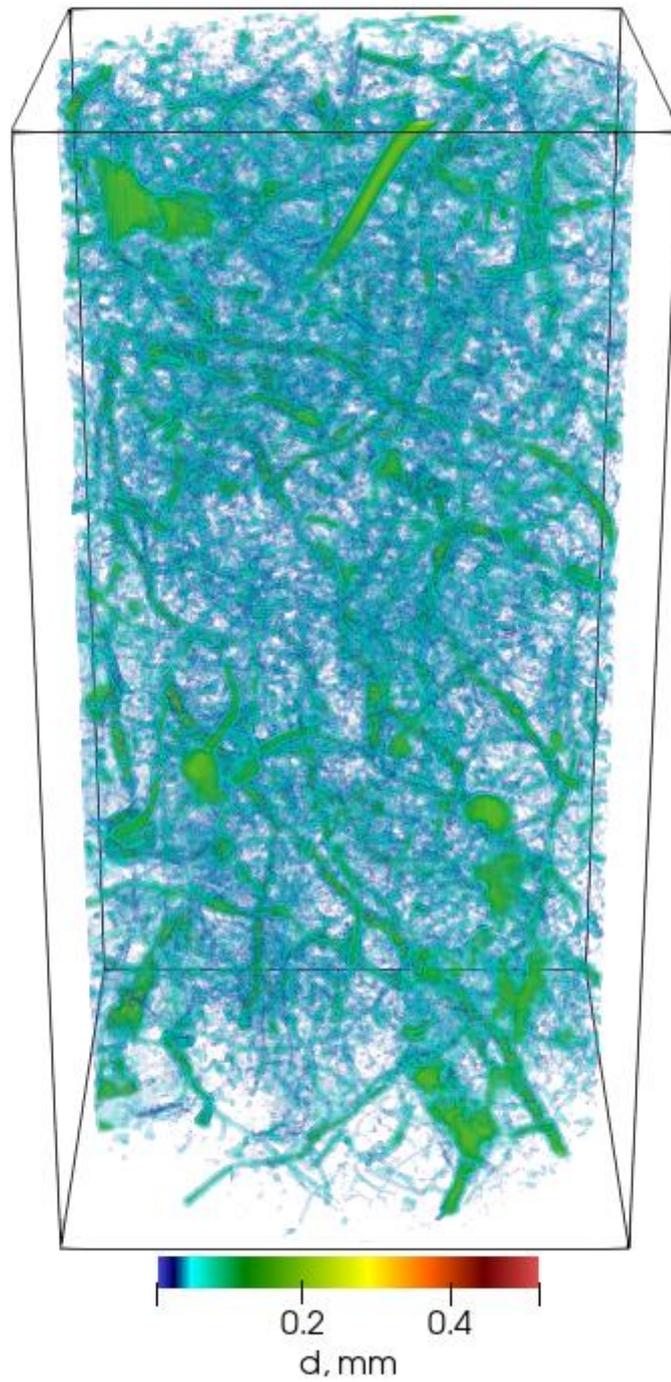
Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 30-40 см из горизонта А подпахотного в «сухом» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14



Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 40-50 см из горизонта АВ в «сухом» состоянии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 15



Визуализация порового пространства образца агросерой почвы, отобранного на глубине 80-90 см из горизонта В в «сухом» состоянии.