

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Калинин Тимофей Геннадьевич

**Томографические показатели в современных агрофизических
исследованиях почв**

Специальность 4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель *Шеин Евгений Викторович, доктор биологических наук, профессор*

Официальные оппоненты *Русаков Алексей Валентинович, доктор географических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», институт наук о Земле, кафедра почвоведения и экологии почв, профессор с возложенными обязанностями заведующего кафедрой*
Мазиров Михаил Арнольдович, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева», институт агробιοтехнологии, кафедра земледелия и методики опытного дела, профессор
Зинченко Сергей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный центр», отдел агрофизики почв, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом

Защита диссертации состоится «23» апреля 2024 г. в 15 ч 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М. В. Ломоносова, биологический факультет, ауд. М-1.

E-mail: *nvkostina@mail.ru*

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/2926>

Автореферат разослан «22» марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Н.В. Костина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Оценка агрофизического состояния, её изменения чрезвычайно актуальны в современных условиях быстро изменяющегося климата и агрогенных воздействий. Традиционные агрофизические показатели, такие как гранулометрический состав, плотность, агрегатный состав, водоустойчивость, пористость и другие свойства дают богатую информацию в отношении оценки состояния и направления изменений почвенных физических условий. Но эта информация не всегда бывает достаточно полной, имеет цифровое обеспечение и отвечает на актуальные проблемы. Пористость почв является одним из важнейших агрофизических свойств, обладает трехмерной структурой со сложной геометрией внутренней поверхности. Матрица порового пространства и форма границы раздела фаз поратвердофазный скелет во многом определяют механические и гидрологические характеристики почв.

С появлением новых средств, в частности, компьютерной томографии, задача количественной оценки структуры порового пространства, как основного определяющего агрофизическое состояние свойства, является практически важной и научно актуальной. Использование рентгеновской компьютерной томографии позволяет получать информацию о структуре порового пространства почв с высокой степенью детализации без разрушения образцов. Однако, для получения количественной информации о структуре порового пространства необходимо применение различных методов, чаще всего связанных с количественным анализом трехмерных изображений.

Степень разработанности темы исследования

Изучение порового пространства почв широко отражено в научной литературе и есть немало работ, посвященных теме изучения порового пространства почв с привлечением различных статистических и морфологических методов (Качинский, 1965; Воронин, 1986; Иванов и др., 2019; Скворцова, Калинина, 2004 и др.). 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 и др.), заканчивая более поздними, где исследуются трехмерные объекты с помощью томографов (Feng et al., 2019; Said et al., 2016). 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 некоторые возможности 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 (Vogel et al., 2010; Berg, 2014; Akai et al. и др. 2019 и др.). Особого внимания заслуживает работа, в которой томографический метод был применен для изучения порового пространства образцов почв России и сравнивался с общепринятым микроморфологическим методом (Герке и др., 2012). 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, формирования и агрофизических исследований структуры порового пространства известно недостаточно. Таким образом, исследование структуры порового пространства, его изменения с помощью современных томографических показателей для количественной агрофизической характеристики почв составляют научную актуальность данной работы.

Цель работы: обосновать количественные томографические показатели для современных агрофизических исследований пахотных почв.

Для достижения этой цели были 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.

Научная новизна:

Впервые в ненарушенных образцах горизонтов агросерой и дерново-аллювиальной глееватой почв 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.

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 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 уменьшается при насыщении почвы водой за исключением некоторых горизонтов, благоприятных по агрофизическим свойствам, в которых 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.

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 диссертации

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 отечественный и 80 зарубежных, содержит 11 таблиц, 38 рисунков и приложения.

Личный вклад автора

Заключается в анализе научной литературы по теме исследования, формулировке цели и задач работы, проведении полевых и лабораторных исследований, статистической 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, расчёты и методы, применяемые в работе математически обоснованы.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении изложены актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Формулируется цель и задачи исследования.

В главе 1 дан обзор научной литературы. Исторически рассмотрено понимание структуры почвы и порового пространства в агрофизике и почвоведении, подходы к математическому описанию порового пространства и моделированию механизмов переноса влаги в почве. Отдельно уделено внимание компьютерной томографии и применению этого метода для природных дисперсных тел. Часть обзора посвящена описанию классических характеристики пор, соответствия классических характеристик томографическим данным и распределению пор по размерам.

В главе 2 описаны объекты и методы исследования. Приведены сведения об основных объектах исследования, классических методах отбора и исследования почвенных образцов, и современных методиках томографического исследования и анализа структуры порового пространства почв.

Основные результаты исследования и заключение

2.1. Дерново-аллювиальные глееватые почвы Фаустовской поймы.

Объектом данной работы послужила почва поймы Москвы реки, в районе Фаустовского расширения, нарушенная в результате землепользования. Пойменные почвы – являются одними из самых плодородных почв Московского региона, поэтому анализ и борьба с деградацией этих почв особенно важны. На рисунке 1 показан общий план расположения Фаустовской поймы и местоположение разреза.

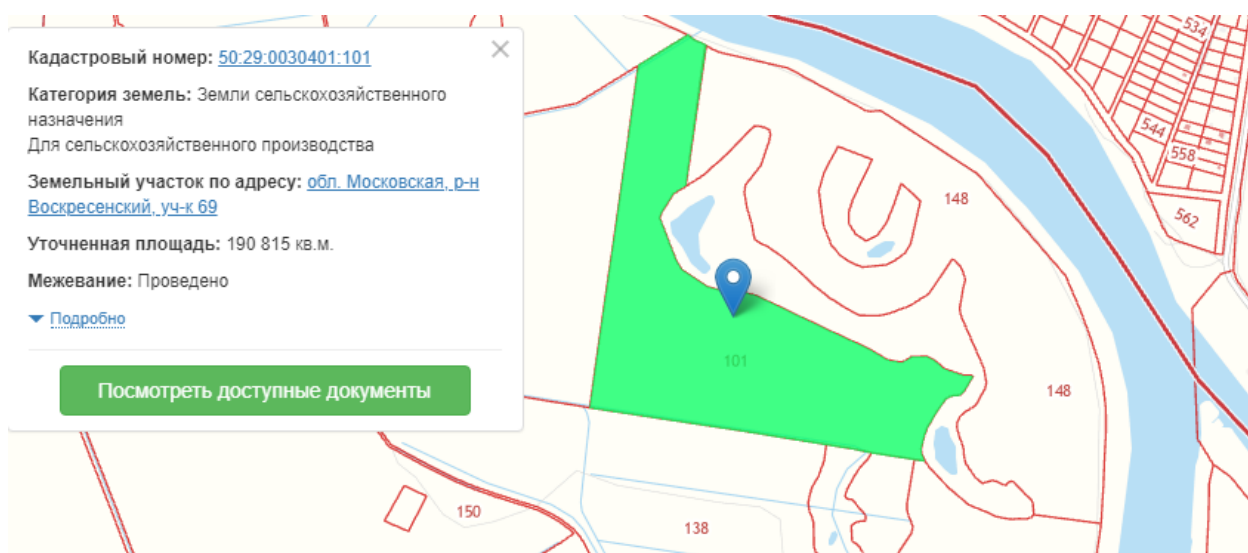


Рисунок 1. Общий план расположения Фаустовской поймы и местоположение разрезов.

В таблице 1 приведены некоторые физические свойства дерново-аллювиальной глееватой почвы. Следует отметить повышенную плотность подпахотного горизонта этих почв, образовавшегося, по-видимому, вследствие высокой агротехнической нагрузки при выращивании овощных культур.

Таблица 1. 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

2.2. Агросерые лесные почвы Владимирского ополья

Вторым объектом исследования служили агросерые лесные почвы Владимирского ополья (Phaeozem albic, WRB 2014 г., версия 2015 г.).

Владимирское ополье расположено на Русской равнине северо-западнее г. Владимира, на левом высоком берегу р. Клязьмы, к юго-востоку от границы Московского оледенения. Эта территория относится к зоне достаточного увлажнения: средняя многолетняя сумма осадков составляет 575 мм при испаряемости свыше 400 мм в год. С мая по сентябрь выпадает 290-315 мм, что в среднем обуславливает достаточную влагообеспеченность с-х культур. В почвенном покрове Владимирского ополья представлен комплекс серых лесных почв, включающий серые лесные, серые лесные остаточные карбонатные, серые лесные со 2-м гумусовым горизонтом разной степени оподзоленности (Тюрюканов, 1971; Дмитриев, 2000 и др.). Некоторые физические свойства этих почв представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Некоторые физические 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	АВ (37-57)	47,7	1,4	20,4	2,4
80-90	В (57+)	45,71	1,36	23	2,3

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

Отметим (таблица 2), 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 значений выше 1.4 г/см³ (Н.А. Качинский, 1965; Бондарев, 1985; Feng Y. et al., 2019), однако является неудовлетворительной для подпахотного горизонта и удовлетворительной для пахотного. По-видимому, следует ожидать

проявление этого явления и на уровне распределения пор по размерам, т.е. ухудшения структуры порового пространства. Влажность находится в диапазоне 30-40% и является хорошей. Коэффициент фильтрации по Рудольфу Эггельсману (Ф.Р.Зайдельман, 1985) имеет 4 и 5 класс и является средним и высоким соответственно.

2.3. Методы исследования.

Плотность почвы определялась буровым методом и рассчитывалась как соотношение массы абсолютно сухой почвы к объему цилиндра. Влажность - термостатно-весовым методом. Томографическое исследование образцов почв выполнено в Почвенном институте им. В.В. Докучаева на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G. 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/>). Томографические срезы обработаны и проанализированы при помощи следующего программного обеспечения (Bruker SkyScan NRecon User Manual, 2016): Data Viewer, CTvox, CTan. (SkyScan CTvox Quick Start Guide, 2014; SkyScan Morphometric parameters measured by Skyscan CTanalyser software. User Guide, 2017). 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 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 2 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.

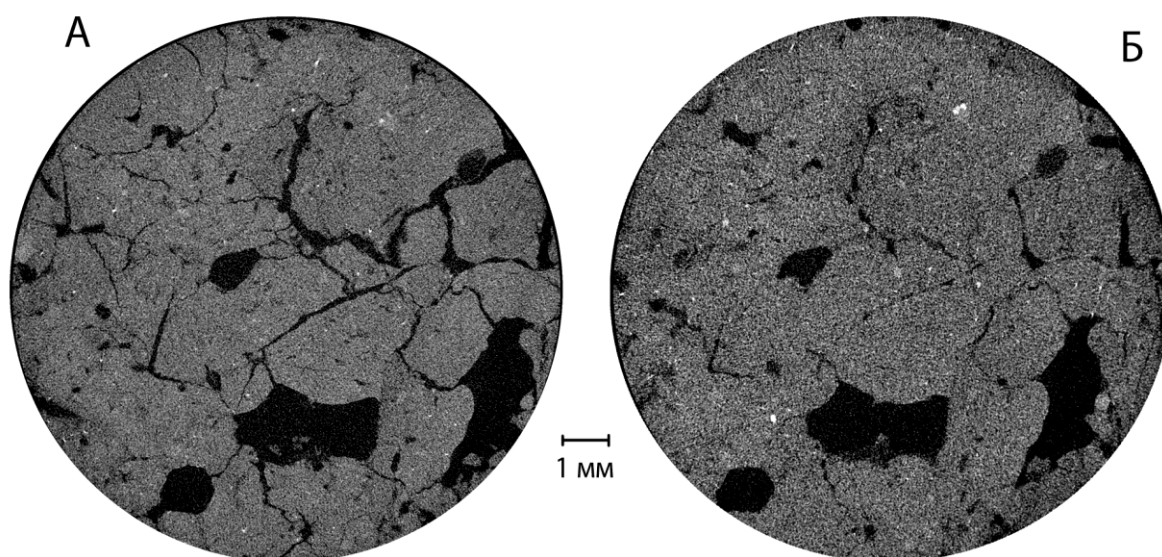


Рисунок 2. Двумерный горизонтальный срез томографического изображения. Образец агросерой почвы, глубина 30-40см, Аподпахотный. А – «сухой», Б – «влажный» образцы.

Глава 3. Результаты и обсуждение

Распределение пор по размерам

Агросерая лесная почва Владимирского ополя

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 3).

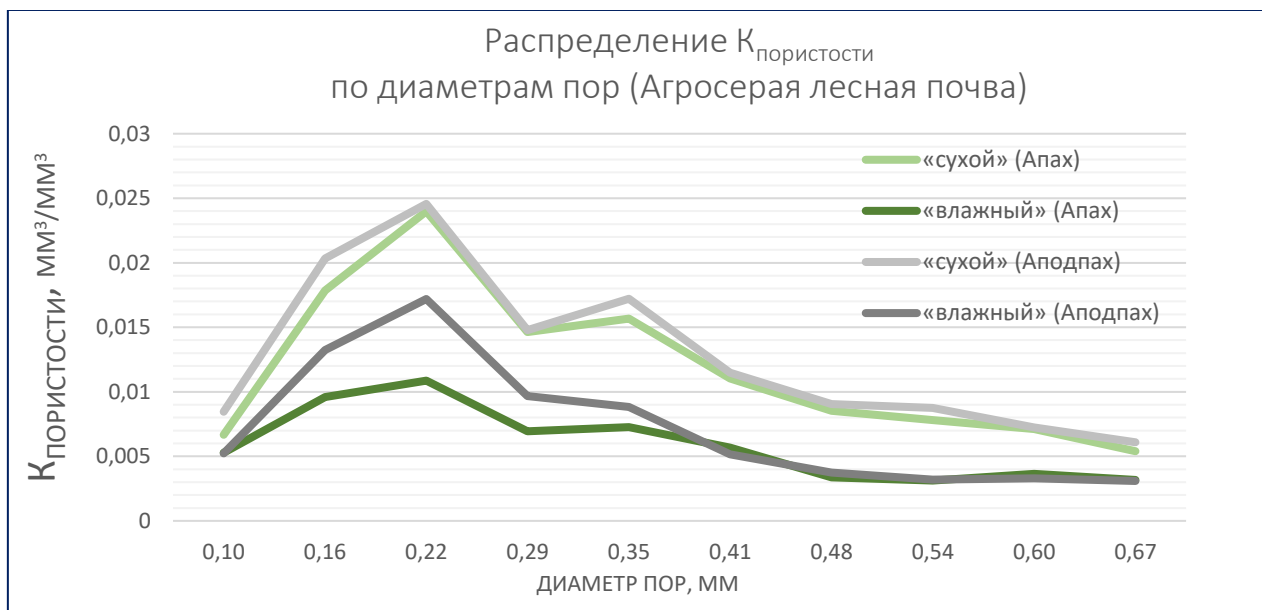


Рисунок 3. Дифференциальное распределение пор по объемам в агросерой лесной почве, образец пахотного горизонта А (0-10см) и образец подпахотного горизонта А (20-30см). Каждый образец представлен в «сухом» (влажность близка к гигроскопической) и «влажном» (влажность близка к НВ).

В образцах всех исследуемых горизонтов происходит уменьшение суммарного объёма видимого диапазона пор при увлажнении образцов. В образцах горизонтов АВ и В (рисунок 4) количество пор изменяется менее значительно при насыщении почвы водой. 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, размер которых не превышает 70 мкм.

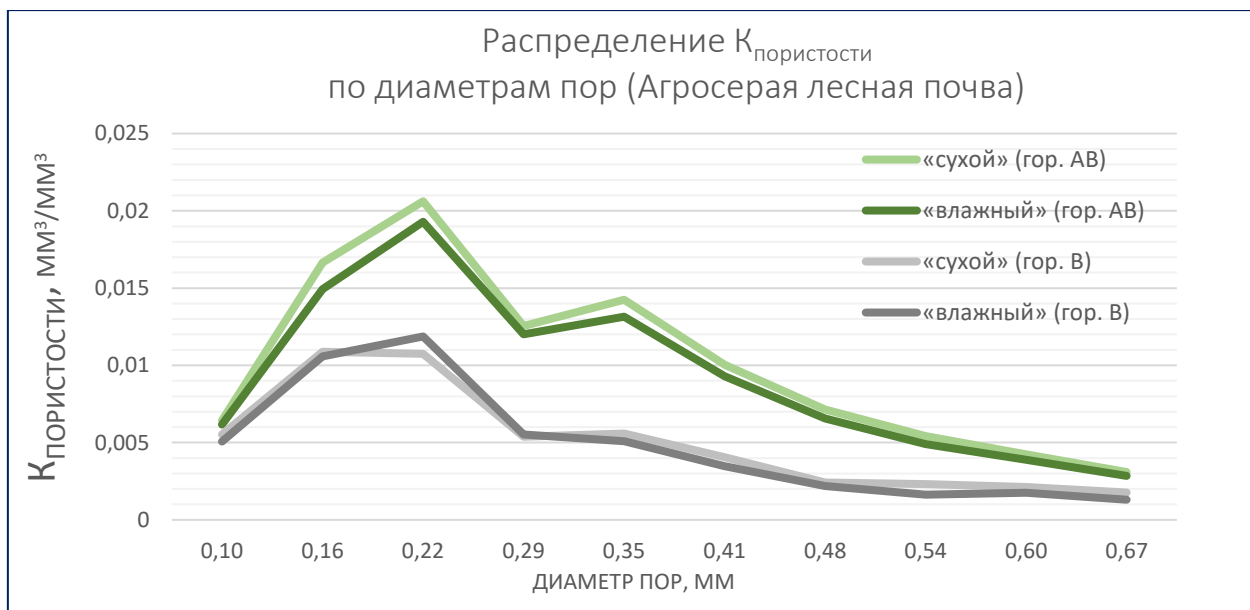


Рисунок 4. Дифференциальное распределение пор по объёмам в агросерой лесной почве, для образцов горизонтов АВ(48-58см) и горизонта В (80-90см).

Дерново-аллювиальная глееватая почва Фаустовской поймы (Московская обл.)

Для образцов дерново-аллювиальной глееватой почвы, получены томограммы с разрешением 4 мкм на пиксель, что позволило оценить объёмы и предположить агрофизическое значение пор, диаметром от 0.01мм без ошибок из-за шумов. Наиболее интересно изменение микро- мезопор. При насыщении образца водой, количество микро- и мезо- пор увеличивается, при этом объём пор этого диаметра возрастает на 50-200%. Ключевое расхождение объёма пор во влажных и сухих образцах приходится на область от 0.01 до 0.07 мм (рисунок 5), то есть пор, 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, т.к. эти поры позволяют почве не пересыхать и запасать питательные вещества и воду. Это особенно важно, потому что в исследуемых агропочвах, такие поры обеспечивают более 50% от всего порового объёма во влажном состоянии для любого из рассмотренных горизонтов.

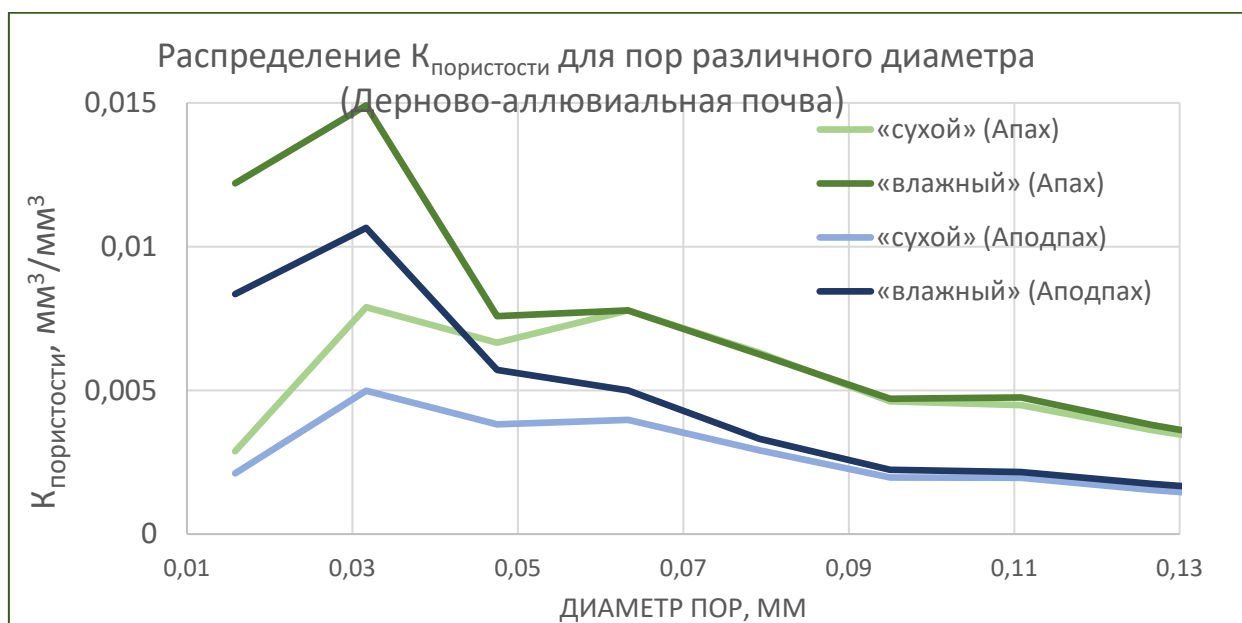


Рисунок 4. Дифференциальное распределение коэффициента пористости ($K_{\text{пористости}}$) в дерново-аллювиальной глееватой почве, для образцов горизонтов Апахотного (10-20см) и Аподпахотного (20-30см).

Для горизонта В на всех образцах кривые распределения пор влажного и сухого состояния не сходятся при давлении 350см водного столба (поры диаметром больше 0.07мм). Предполагается, что уплотнение горизонта достаточно велико, что не позволяет создаваемому при набухании давлению крупные поры в таких же количествах как в неуплотненном горизонте. Это связано и с менее подвижной структурой, с большим количеством жёстких связей, присущей горизонту В. Такие связи достаточно жёсткие и прочные, чтобы не происходило «схлопывание» макропор при набухании, но недостаточно жёсткие чтобы сдержать появление микро-мезо пор при насыщении почвы влагой.

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

Функционалы Минковского с точностью до множителя соответствуют объему пор (M_0), площади поверхности пор (M_1) и интегральной средней кривизне границы раздела фаз «пора-твердофазный скелет» (M_2), а также характеристике Эйлера-Пуанкаре пористого пространства (M_3) (Arns et al., 2005)

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

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

где числа Бетти могут быть интерпретированы следующим образом: b_0 – число отдельных пор (полые пространства, не имеющие выходов за границы образца. Топологически гомеоморфные шару и всегда являющиеся закрытыми порами), b_1 (туннели) – число, характеризующее количество связей в поровом пространстве. Например, сквозные поры, имеющие больше одного выхода за пределы образца (чем больше выходов, тем больше число b_1). Чем большее значение принимает число b_1 , тем более разветвленное и связанное поровое пространство. b_2 – число кластеров связности твердой фазы, окруженных пустотами (b_2 равно единице, в данном случае не рассматривается).

Детально рассмотрим образец с глубиной отбора 5-10 см из Апах горизонта агросерой почвы, изображение порового пространства которого приведено на рисунке 5, 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.

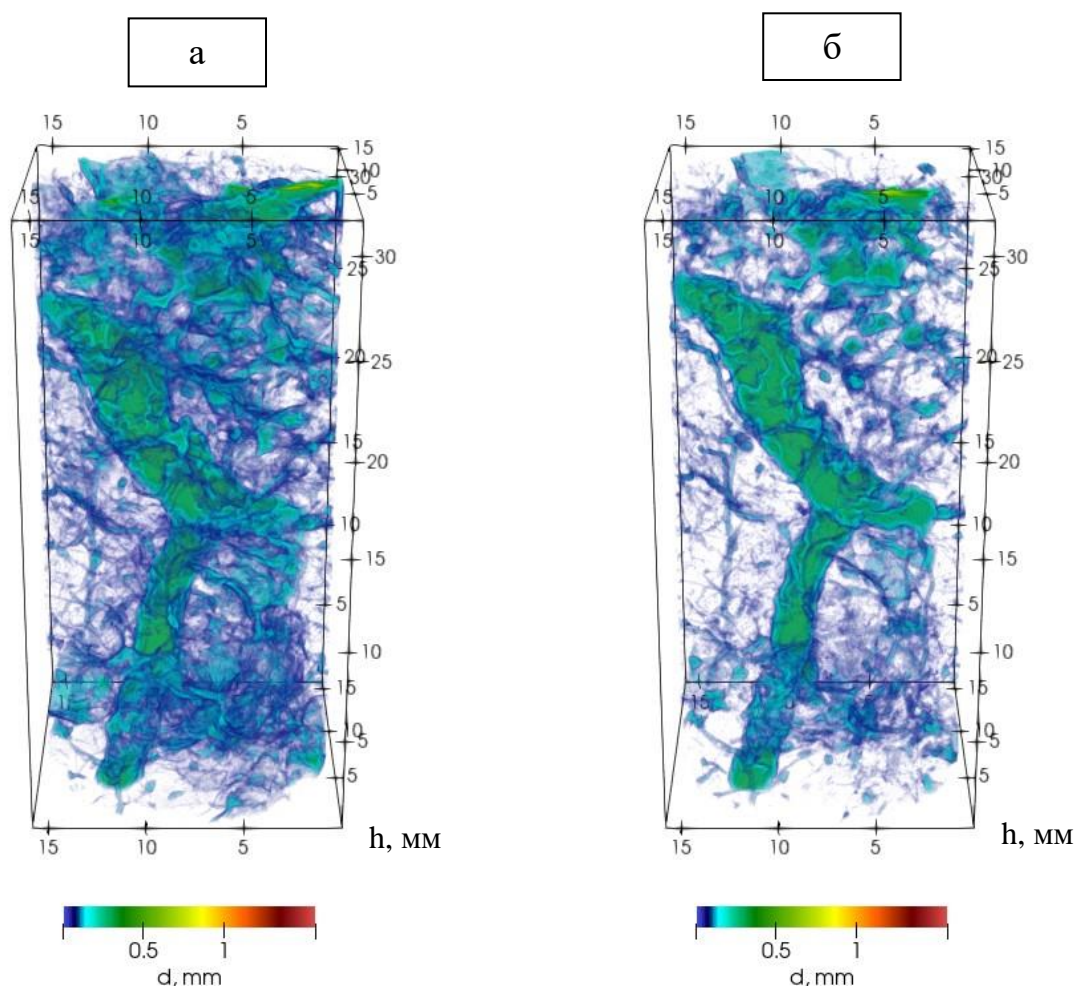


Рисунок 5. Визуализация порового пространства образца №1 агросерой почвы, отобранного на глубине 5-10 см из горизонта А пахотного: (а) в «сухом» состоянии; (б) «влажном» состоянии.

Анализ распределения функционалов Минковского и чисел Бетти показывает, что в процессе насыщения водой общая макропористость образца уменьшилась во всем видимом диапазоне пор, как уменьшилась и томографическая площадь поверхности пор. 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.

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.

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. Изменение 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.

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 6) и $K_{\text{фильтрации}}$ (рисунок 7) 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 $-0,97$. Для $K_{\text{фильтрации}}$ и $b_0(\text{вл/сух})$ коэффициент корреляции Пирсона имеет значение $0,94$ с доверительным интервалом от $0,79$ до $0,99$.

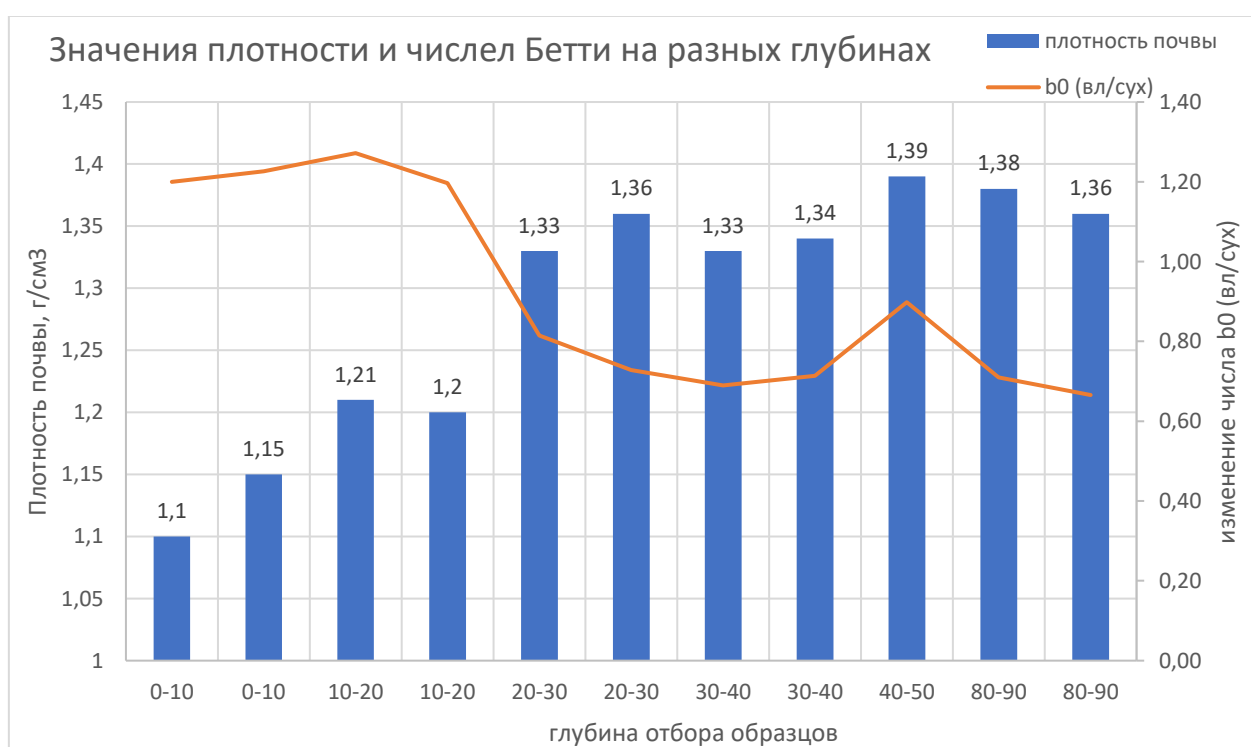


Рисунок 6. Послойные значения плотности и относительного числа Бетти (для двух влажностных состояний) для образцов агросерой почвы.

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 $0,8$, близко для горизонтов с большей глубиной залегания, таких как менее благоприятных по физическим

свойствам АВ и В. 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.

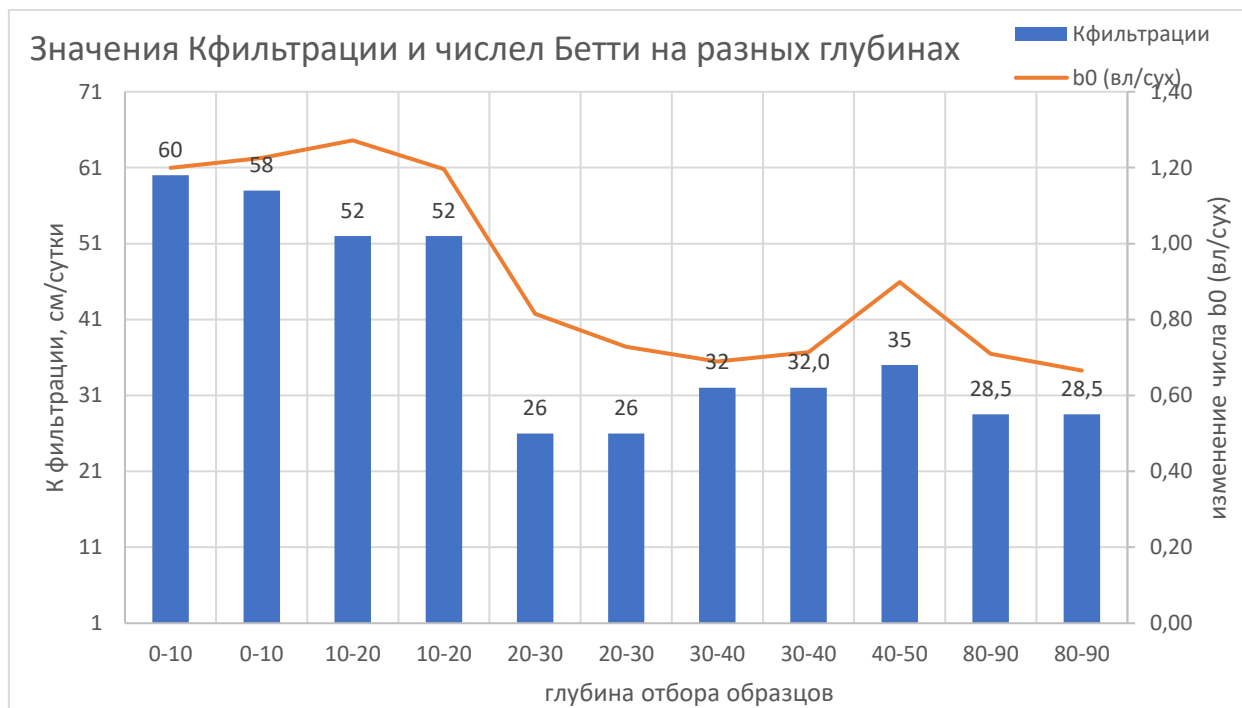


Рисунок 7. Послойные значения Коэффициента фильтрации и относительного числа Бетти (для двух влажностных состояний) для образцов агросерой почвы.

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, 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 работ, опубликованных по теме диссертации в рецензируемых 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)

Прочие публикации:

4. Kalnin T.G., Shein E.V., Suzdaleva A.V. Bubbling Pressure in Clay Soils as a Physical Quantity and Approximation Parameter. In: Maximova S.G., Raikin R.I., Chibilev A.A., Silantyeva M.M. (eds) *Advances in Natural, Human-Made, and Coupled Human-Natural Systems Research. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham. 2023. V. 252. P. 3-10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78105-7_1. (0,5/ 0,3)