 © Авторы статьи / Authors of the article

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА/MELIORATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2 EDN: UINJVF

МИКРОТОМОГРАФИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННЫХ КОНКРЕЦИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Научная статья

Ковалев И.В.[1, *], Звычайная Е.А.[2], Ковалева Н.О.[3], Грачев Е.А.[4]
[3] ORCID : 0000-0002-8672-256X;
[1, 2, 3, 4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kovalevmsu[at]mail.ru)

Предложена: 27.06.2026; Принята: 21.08.2026; Опубликована: 19.10.2026

Аннотация

С помощью математических методов обработки трехмерных изображений рентгеновской томографии впервые получена уникальная количественная информация о структуре порового пространства железисто-марганцевых конкреций из агросерых почв Русской равнины. Рентгеновские микротомограммы ортштейнов позволили обнаружить отчетливый центр концентрирования, их концентрически-тонкослоеватое сложение в мелких фракциях (1–3 мм) ортштейнов. Создан алгоритм предобработки данных рентгеновской томографии сложных образцов путем процессов бинаризации и сегментации. На основе предложенного алгоритма интегральных и топологических характеристик (функционалы Минковского) установлены различия по кривизне поверхности, объему, пористости и удельной поверхности в зависимости от размера конкреций даже при детальном рассмотрении: фракции 1–2; 2–3 и 3–5 мм. Метод томографии позволил выявить влияние степени гидроморфизма почв на характеристики ортштейнов. Под действием осушения произошло уменьшение объема и кривизны ортштейнов, а площадь поверхности и пористость характеризуются широким варьированием.

Ключевые слова: железисто-марганцевые конкреции, рентгеновская томография, трехмерные изображения, функционалы Минковского.

MICROTOMOGRAPHY IN THE STUDY OF THE SOIL CONCRETIONS STRUCTURE BASED ON A MATHEMATICAL APPROACH

Research article

Kovalev I.V.[1, *], Zvychaynaya E.A.[2], Kovaleva N.O.[3], Grachev E.A.[4]
[3] ORCID : 0000-0002-8672-256X;
[1, 2, 3, 4] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (kovalevmsu[at]mail.ru)

Suggested: 27.06.2026; Accepted: 21.08.2026; Published: 19.10.2026

Abstract

Using mathematical methods for processing three-dimensional X-ray tomography images, unique quantitative information on the structure of the pore space in iron-manganese concretions from agro-grey soils of the Russian Plain has been obtained for the first time. X-ray microtomograms of ortsteins have made it possible to identify a distinct centre of concentration and their concentric, thin-layered structure in the fine fractions (1–3 mm) of ortsteins. An algorithm has been developed for the pre-processing of X-ray tomography data from complex samples using binarisation and segmentation processes. Based on the suggested algorithm utilising integral and topological characteristics (Minkowski functionals), differences in surface curvature, volume, porosity and specific surface area were established depending on the size of the concretions, even upon detailed examination: the 1–2, 2–3 and 3–5 mm fractions. The tomography method has made it feasible to identify the influence of the degree of soil hydromorphism on the characteristics of orthstones. Under the influence of drainage, there was a reduction in the volume and curvature of the ortsteins, whilst the surface area and porosity exhibited wide variation.

Keywords: iron-manganese concretions, X-ray tomography, three-dimensional images, Minkowski functionals.

Введение

Для детального исследования агрофизических и гидрологических свойств почв в последние десятилетия все чаще привлекаются современные неразрушающие методы рентгеновской томографии. Одним из самых надежных диагностических критериев оценки степени гидроморфизма почв являются железисто-марганцевые конкреции (ортштейны (nodules)). Несмотря на то, что их генезису посвящена обширная литература [1], на протяжении последних 100 лет, по-прежнему, обсуждаются два типа механизмов ортштейнообразования:

1) хемогенный;

2) прямой или опосредованный биогенный.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Развитие методов тонкой биохимии, метагеномного анализа, электронной микроскопии позволило глубже понять процесс ортштейнообразования [2], объясняя феномен устойчивости ортштейнов во времени и зависимость от влажности почв [1]. Почвенные ортштейны (nodules) агросерых почв — результат почвообразовательных процессов при контрастном окислительно-восстановительном потенциале, обусловленным временным переувлажнением [2], [3]. Значительная роль агросерых почв в сельском хозяйстве является причиной для круглогодичного мониторинга агрофизического состояния структуры этих почв. Но в условиях переувлажнения в период обильного снеготаяния, а также при промерзании в зимний период, диагностика структурного состояния оказывается невозможной [1]. Это подтверждает необходимость развития неразрушающих методов исследования, таких как томография [4]. В отличие от агрегатов, ортштейны устойчивы независимо от времени года и влажности года, поэтому данные томографии ортштейнов представляют ценность. Кроме того, в почвоведении для характеристики структуры почв традиционно использовался описательный подход [5] или геофизические модели, методы инверсии и их комбинацию для извлечения информации о структуре почвы в ранее неисследованных пространственных и временных масштабах [6], [7], при котором не учитываются важные характеристики, как объем, площадь поверхности, средняя интегральная кривизна, а также энтропия. Однако методы томографии и численной характеристики все чаще применяются [8]. В нашей работе использован совместный морфометрический и топологический подход [9]. Под морфометрическим подходом в данной работе понимается количественное описание формы и внутреннего строения почвенных агрегатов и ортштейнов по их трёхмерным томографическим изображениям. В отличие от традиционного морфологического описания, где структуру характеризуют качественно как более плотную, рыхлую, округлую, слоистую или неоднородную — морфометрический подход переводит эти признаки в измеряемые показатели. К таким показателям относятся объём исследуемого объекта, площадь его внутренней и внешней поверхности, степень изрезанности границ, средняя интегральная кривизна, характеристика Эйлера, а также особенности распределения твёрдой фазы и порового пространства. Иными словами, морфометрический подход позволяет описывать структуру не только словами, но и числами, которые можно сопоставлять между образцами, вариантами увлажнения, степенью гидроморфизма, глубиной отбора и другими факторами [10]. Функционалы Минковского [11], [12] дают описание объёма, площади поверхности, интегральной кривизны и характеристики Эйлера, а персистентная гомология позволяет выделять устойчивые компоненты связности, каналы и полости при изменении порога сегментации [13]. Такое сочетание признаков особенно важно для объектов со слоистой и неоднородной внутренней организацией. Цель работы — разработать и апробировать вычислительный подход к анализу структурных элементов почвенных конкреционных новообразований по данным рентгеновской томографии и показать, какие характеристики оказываются наиболее информативными в железисто-марганцевых ортштейнах (nodules) под влиянием оглеения и дренажа.

Методы и принципы исследования

Объектами исследования послужили автоморфные и гидроморфные агросерые почвы Подольско-Коломенского ополья Ступинского района Московской области (55003’34"с.ш., 38010’51"в.д.) [1], [3]. Для определения количества и химического состава (в том числе и для томографических исследований) ортштейнов в первой декаде августа, так как почва находится в максимально окисленном состоянии и наиболее устойчива в этот период, отбирались смешанные из 30 точек на каждом участке пробоотбора образцы почвы весом около 2 кг из слоя 0–20 см в трех повторностях в 1989–1992 гг. и в пяти повторностях в 1993–2025 гг. На осушенных агросерых глееватых почвах отбор проб осуществлялся как с междренного расстояния, так и в одном метре от дрены. Образец воздушно-сухой почвы размачивался в воде и затем пропускался через сито 1 мм путем мокрого просеивания. Оставшиеся на сите конкреции промывали дистиллированной водой, высушивали на воздухе и отделяли от скелетных включений высушивали, отбирали от примесей. Фракционирование ортштейнов осуществлялось через сита диаметром 1, 2 и 3 мм [2].

Компьютерная микротомография (мКТ) образцов ортштейнов проводилась на промышленной системе GE Phoenix v|tome|xL 240/180. Во время съемки образец пошагово поворачивается на платформе, в то время как нанофокусная рентгеновская трубка и детектор неподвижны. Запись рентгеновских проекций осуществляется детектором на основе фотодиодной матрицы размером 2024×2024 с размером элемента 0,2×0,2 мм со сцинтиллятором из CsI. Съемки проводилась при следующих условиях: ускоряющее напряжение: 100 кВ. Ток: 99 мкА. Геометрическое увеличение: 66.66х. Размер вокселя: 3мкм. Экспозиция: 500мс. Количество усредняемых снимков — 6. Количество снимков на 1 оборот — 2400. Программное обеспечение GE Phoenix datos|x reconstruction использовалась для преобразования серии из 2400 двумерных рентгенографических изображений в трехмерную модель. Для этого проводилась предобработка изображений. В силу неоднородной внутренней структуры ортштейна ренгтеновская плотность конкреций изменяется в широком диапазоне, что отражает гистограмма распределения количества пикселей от величины яркости пикселя. При проведении серии экспериментов яркость и контрастность изображений не являются постоянными, даже на одной установке. Поэтому на первом этапе обработки проводился линейный сдвиг контраста для всех изображений. На втором этапе создавалась маска для удаления удерживающего пенала и окружающего ортштейн воздушного пространства. Затем смещением порога бинаризации выделялся ортштейн, и после чего метода микроморфологического открытия и закрытия удалялись остаточные шумы (рис. 1).

 © Авторы статьи / Authors of the article

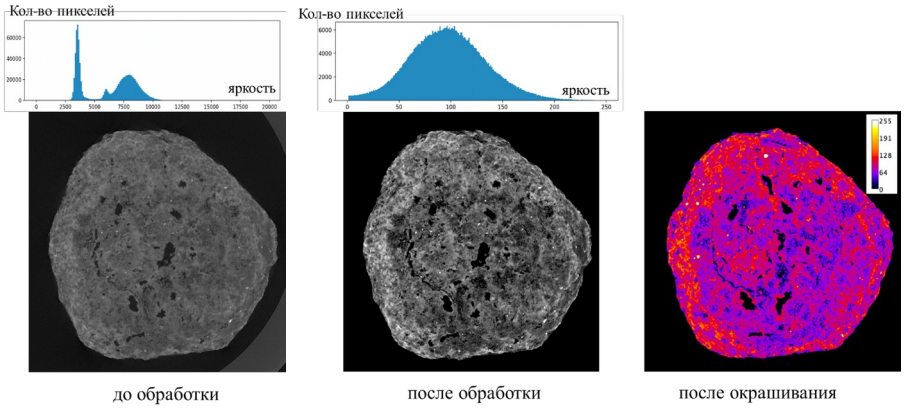


Рисунок 1 - Предобработка томографических изображений на примере томографического среза ортштейна 3-5 мм
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.1

Для того чтобы перевести серию двумерных рентгенографических изображений в трехмерную модель, необходимо провести процесс бинаризации — разделить объект на две фазы: представляющую исследовательский интерес и фоновый материал. Таким образом были выбраны 4 порога бинаризации от самых плотных вкраплений (красных) до менее плотных (бирюзовых) (рис. 2). Полученные сегментированные изображения демонстрируют различия в структуре ортштейнов и позволяет классифицировать их.

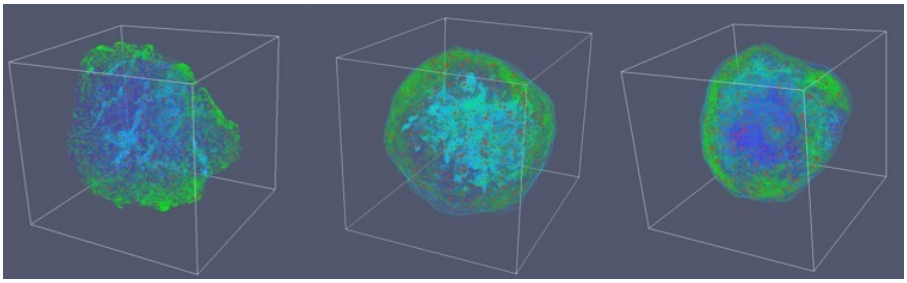


Рисунок 2 - Трехмерная модель ортштейнов, сегментированных по порогам яркости вокселя:
красным цветом раскрашены самые плотные вкрапления, от самых плотных областей к менее плотным
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.2

Примечание: красный-зелёный-синий-бирюзовый

Для анализа томографических изображений трехмерных структур и описания геометрических и топологических свойств ортштейна предлагаются функционалы Минковского, а именно 1, 2, 3 и числа Бетти. В случае трехмерного пространства эти функционалы соответствуют объему вкраплений, площади поверхности, интегральной средней кривизне поверхности и Эйлеровой характеристике вкраплений ортштейна.

Числа Бетти: b0 — количество связных компонент (отдельных пор) b1 — количество связей в поровом пространстве (разветвленность) b2 — количество кластеров связности твердой фазы в объекте. Характеристика Эйлера — это знакопеременная сумма чисел Бетти:

$$\chi = b0 - b1 + b2 \quad (1)$$

$$V - E + F = 2 \quad (2)$$

Функционалы Минковского

В ортштейнах в качестве объектов исследования могут быть выбраны как поровые пространства, так и различные твердые компоненты. Положим, что в ортштейнах есть две и более фаз, каждая из которых представляет из себя множество тел в пространстве. Пусть X — фаза, ограниченная поверхностью δX, в d=3-мерной Евклидовом пространстве. Для описания геометрических и топологических свойств такого тела, интегральная геометрия позволяет определить d + 1 топологических инвариантов — функционалов Минковского (Arns и др., 2004; Hadwiger, 1975). Введем четыре функционала Минковского $M_n(X)$, n = 1, 2, 3, 4 фазы X:

$$M_O(X) = V = \int_X dv \ ,$$
$$M_1(X) = \frac{1}{8} \int_{\delta X} ds \ ,$$
$$M_2(X) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{\delta X} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) ds$$

 © Авторы статьи / Authors of the article

$$M_3(X) = \frac{3}{(4\pi)^2} \int_{\delta X} \frac{1}{R_1 R_2} ds$$

где *dv* — элемент объема, *ds* — элемент поверхности, R_1 и R_2 — главные радиусы кривизны поверхности. Это приводит к определению объема: V = M_0(X), площади поверхности: $S = 8M_1(X)$, интегральная средняя кривизна: $H = 2\pi^2 M_2(X)$ и трехмерной Эйлеровой характеристики: $\chi(X) = \frac{4\pi}{3} M_3(X)$.

Характеристика Эйлера фазы 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 b0 — число несвязанных пор, b1 — число сквозных проводящих каналов, а b2 представляет собой число кластеров связности твердой фазы (матричных блоков), окруженных пустотным пространством.

Числа Бетти

Числа Бетти — топологические инварианты, характеризующие топологические свойства объектов, определяемые строго математически для симплициальных пространств, частными случаями которых являются цифровые изображения.

Определение: Размерности групп гомологий называют числами Бетти:

$$b_p(K) = \dim\left(H_p(K)\right)$$

где b_0, b_1 и b_2 соответствуют числу компонент связности, число сквозных “туннелей” и числу полостей.

Характеристика Эйлера-Пуанкаре, являющаяся знакопеременной суммой числе Бетти, характеризует топологическую сложность объекта:

$$\chi(K) = b_0 - b_1 + b_2$$

Вычисление функционалов Минковского для трехмерного изображения

Томографические изображения можно перевести в кубическое сеточное представление — трехмерные карты, состоящей из вокселей. Тогда существует алгоритм Микелсена и Де Райга, который позволяет вычислить функционалы Минковского через такие величины, как *nc* — число вокселей, *nf* — число граней, *ne* — число ребер и *nv* — число вершин в узле сетки:

$$M_0(X) = nc$$
$$M_1(X) = -6nc + 2nf$$
$$M_2(X) = (3nc - 2nf + ne)/2$$
$$M_3(X) = -nc + nf - ne + nv$$

Карты функционалов Минковского на Рис. 3 делались по файлам сегментированных ортштейнов. Функционалы считались в окне размером 11x11x11 вокселей. Удельный функционал Минковского считается по формуле:

$$\overline{M_k}(x, y, z) = \frac{1}{w^3} \sum_{\substack{-w/2<\Delta x<w/2 \\ -w/2<\Delta y<w/2 \\ --w/2<\Delta z<w/2}} M_k(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$$

где *k* — номер функционала Минковского, w — размер окна, который задаётся вручную. M_k *(x,y,z)* — это значение ф-ла в точке изображения (*x,y,z*), т.е. функционал одного вокселя. Для построения карт использовался пакет quantimpy для Python.

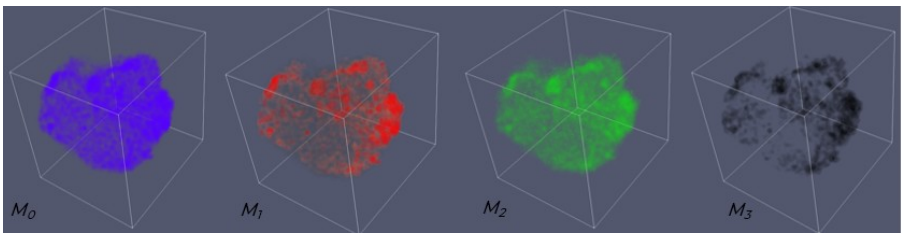


Рисунок 3 - Карты функционалов Минковского
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.3

Основные результаты

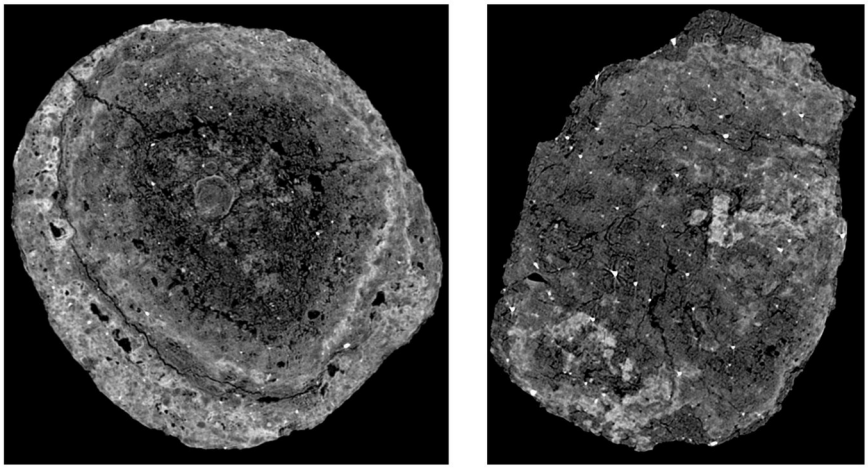
В профилях всех исследуемых почв обнаружены железистомарганцевые конкреционные новообразования (ортштейны) преимущественно округлой формы размером от 1 до 5 мм в диаметре ржаво-охристого, бурого, серого и черно-бурого оттенков (рис. 4).

© Авторы статьи / Authors of the article

Рисунок 4 - Морфология ортштейнов различных фракций
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.4

 © Авторы статьи / Authors of the article

Ортштейны крупных размеров (4-6 мм в диаметре) часто приобретают вытянутую овальную и бобовидную форму (рис. 5).



а *б*

Рисунок 5 - Рентгеновские микротомограммы ортштейнов:
а – фракция 1–2 мм; *б* – фракция 5–7 мм
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.5

Причина округлости вскрывается с помощью метода компьютерной микротомографии, позволяющего обнаружить отчетливый центр концентрирования и хорошо выраженные кольца нарастания колоний микроорганизмов в мелких фракциях (1–3 мм) ортштейнах, их концентрически-тонкослоеватое сложение (рис. 4) и самые высокие показатели округлости — максимальную кривизну поверхности (рис. 6), что подтверждается нашими ранними исследованиями по данным 13C и 13P ЯМР-спектроскопии, пулу лигниновых фенолов, содержанию грибной и бактериальной биомассы, а также и по видому составу микроорганизмов по данным метагенномного анализа [2].

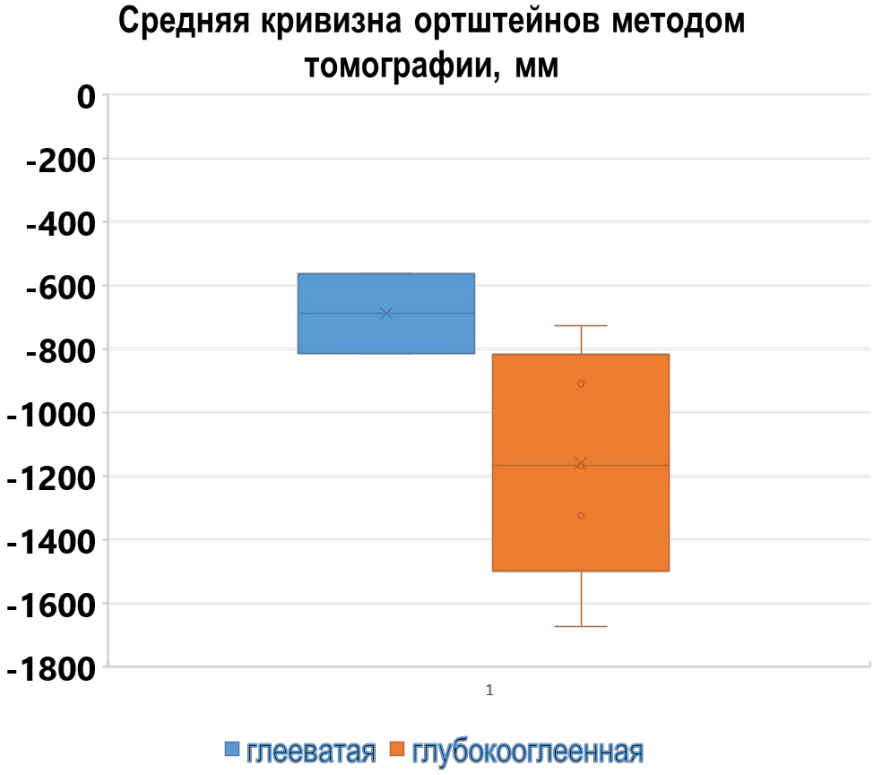


Рисунок 6 - Средняя кривизна ортштейнов 2-3 мм методом томографии
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.6

 © Авторы статьи / Authors of the article

Примечание: объем выборки n=2 и 6 соответственно

По графику средней кривизны (рис. 6) видно, что в ортштейнах глееватой почвы кривизна поверхности меньше по модулю. С ослаблением степени гидроморфизма от глееватой до глубокооглеенной, в ортштейнах увеличивается по модулю кривизна поверхности. Однако в более крупных ортштейнах овальной формы наблюдается не один центральный, а несколько перефирических (2–3) менее выраженных центров концентрирования (рис. 5 (Б)) и наименьшие показатели округлости или кривизны поверхности. Средняя кривизна поверхности твердой фазы внутри пор означает интегральную сумму величин, обратных радиусу кривизны поверхности, и усредненную по трем измерениям x, y, z.

$$\int_S \frac{1}{R} dS = \int_S (R)^{-1} dS \quad (3)$$

На основе количественных подходов по использованию интегральных методов Минковского и чисел Бетти удалось установить порозность конкреций. Пористость ортштейнов считалась как отношение количества пикселов пор Npx пор (пустого пространства, не содержащего каких-либо веществ) к количеству пикселов материала Npx материала, взятого вместе с количеством пикселов пор Npx пор (в знаменателе оно незначительно и может рассматриваться как погрешность):

$$\varepsilon = \frac{Npx\ \text{пор}}{Npx\ \text{пор} + Npx\ \text{материала}} \times 100\%$$

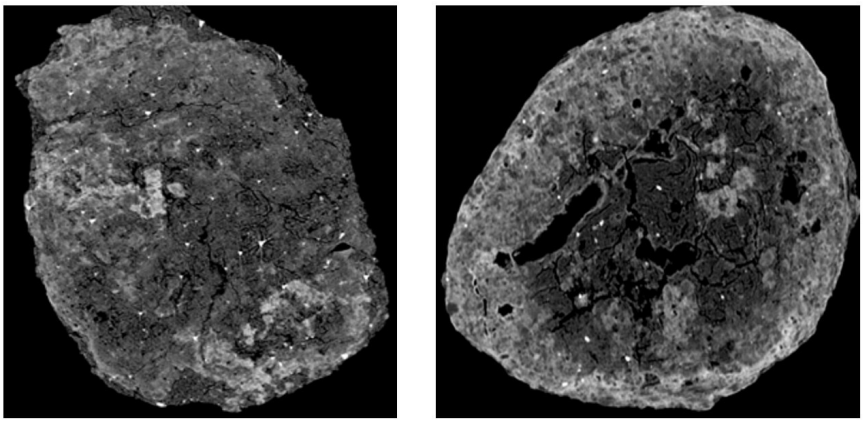
Пористость ортштейнов, определенная таким методом, неодинакова: в более крупных ортштейнах процент пор меньше, чем в мелких разностях (1,65–2,42% и 3,90–4,21% соответственно), табл. 1.

Таблица 1 - Пористость конкреций различных фракций

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.7

Фракции ортштейнов, мм	Пористость, %
1–2	3,90
1–2	4,21
1–2	3,79
2–3	1,97
2–3	1,92
3–5	2,42
3–5	1,65

Это подтверждается и томографическими изображениями ортштейнов (рис. 7).



а *б*

Рисунок 7 - Томограммы ортштейнов различных фракций:
а - глееватая, осушенная пластмассовым дренажом, 3-5 мм: процент пор – 1,92; *б* - контроль - светло-серая (глееватая) недренированная, 2-3 мм: процент пор 3,90

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.8

Объём ортштейна, мм^3, рассчитывается программой как Npx материала, то есть равен количеству «непустых» пикселов, содержащих материал. Объем конкреций также неодинаков: с увеличением размера ортштейнов наблюдается четкое увеличение объема конкреций (табл. 2). Объем конкреций в разных фракциях (мм^3),

 © Авторы статьи / Authors of the article

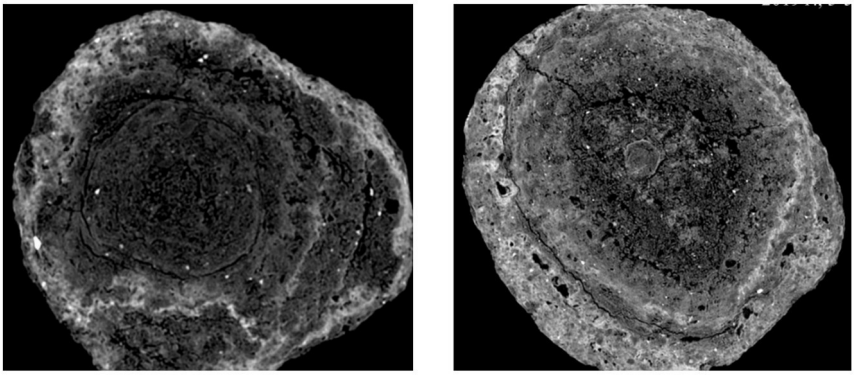
рассчитывается программой как Npx материала, то есть равен количеству «непустых» пикселов, содержащих материал.

Таблица 2 - Зависимость объема ортштейнов от размера их фракции

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.9

Фракции ортштейнов, мм	Объем, мм^3
1–2	6,27
1–2	4,08
1–2	4,27
2–3	11,04
2–3	12,42
3–5	14,22

Примечание: объем выборки для ортштейнов 1-2 мм – n=3, 2-3 мм – n=3, 3-5 мм – n=1



а *б*

Рисунок 8 - Объем ортштейнов в светло-серой глееватой почве в зависимости от размера их фракции:
а – размер ортштейна - 2-3 мм, объем пор - 4,06; *б* – размер ортштейна – 3-5 мм, объем пор – 14,22
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.10

Площадь поверхности нарастает по мере увеличения размеров новообразований. Показано, что более крупным ортштейнам характерно нарастание площади поверхности ортштейнов (рис. 9). Надо заметить, что проведенная нами сравнительная оценка удельной поверхности, полученной методом томографии и методом БЭТ, имеют близкие значения (с учетом математического расчета). При этом, удельная поверхность по методу БЭТ для растертых и не растертых ортштейнов значимо не отличается.

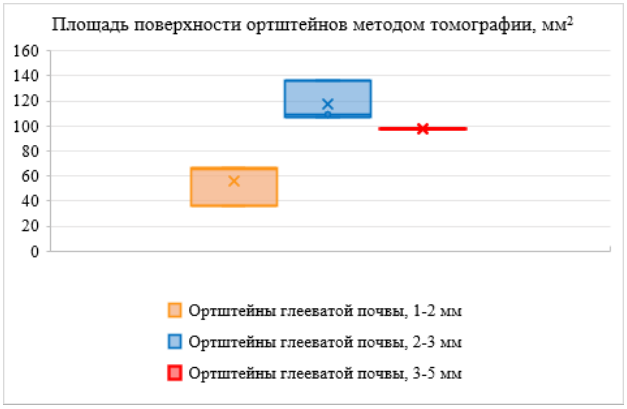


Рисунок 9 - Площадь поверхности ортштейнов методом томографии
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.11

Примечание: объем выборки для ортштейнов 1-2 мм – n=3, 2-3 мм – n=3, 3-5 мм – n=1; для каждой томограммы проводилось усреднение по 6 кадрам

 © Авторы статьи / Authors of the article

В процессе «старения» (увеличения возраста и размеров) ортштейнов площадь экспонирования внешней поверхности увеличивается при уменьшении внутренней площади экспонированных для микроорганизмов поверхностей [9].

Метод томографии позволил выявить влияние степени гидроморфизма почв на характеристики ортштейнов. Ранее нами было показано, общее содержание и формы железисто-марганцевых конкреций в гумусовых горизонтах отражают степень гидроморфизма почв: их количество минимально в автоморфной (глубокооглеенной) почве 0,3 г на 100 г почвы и максимально в наиболее влажной глееватой почве 2 г на 100 г почвы [1], [2]. Рентгеновская компьютерная микротомография показала, что объем и средняя кривизна снижаются с проявлением автоморфных свойств у глубокооглеенной почвы на микроповышении (рис. 9). Рентгеновская компьютерная микротомография позволяет установить и изменение характеристик ортштейнов под влиянием дренажа (рис. 10).

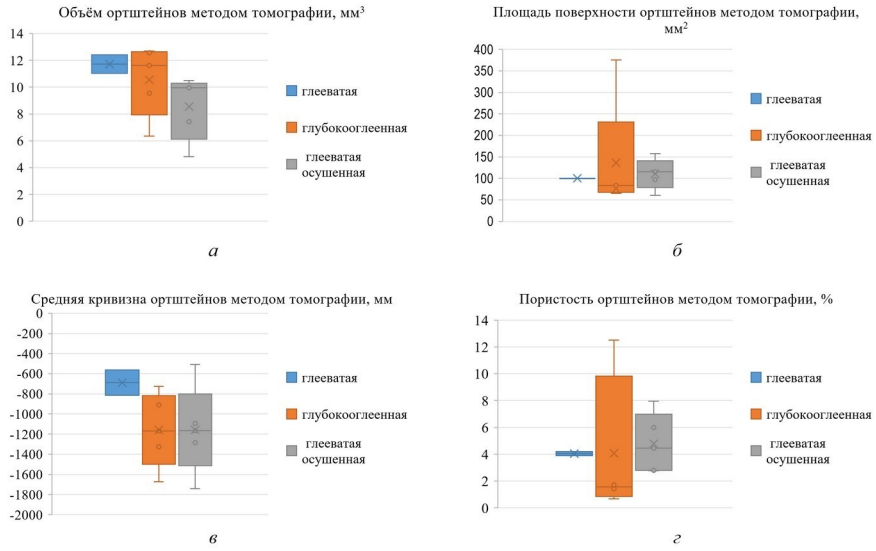


Рисунок 10 - Влияние дренажа на томографические показатели ортштейнов осушенных агросерых почв:
а - объем; *б* - площадь поверхности; *в* - средняя кривизна; *г* - пористость
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.74.2.12

Дренаж оказывает влияние на водный режим почвы, повышая доступность почвенного воздуха для растений и создавая благоприятные условия для разрушения ортштейнов. Это приводит к изменению объема, площади поверхности, средней кривизны и пористости ортштейнов. Уменьшение количества воды в почве при дренаже приводит к сжатию почвенных частиц и разрушению ортштейнов. Средняя кривизна ортштейнов изменяется при осушении. Уменьшение количества воды в почве снижает напряжение на границах раздела фаз, что приводит к снижению кривизны ортштейнов. Пористость конкреций также изменяется при дренаже вследствие разрушения.

Уменьшение количества воды в почве увеличивает количество воздуха в порах, что приводит к разрушению ортштейнов и увеличению пористости.

Заключение

Таким образом, по нашим данным [1], [2], [3] дренаж воздействует на трансформацию водного и окислительно-восстановительно режимов и вызывает изменение химических, физических и биологических свойств почвы, что оказывает влияние и на объем, площадь поверхности, среднюю кривизну и пористость ортштейнов. Итак, методы математической обработки снимков рентгеновской компьютерной микротомографии (алгоритм интегральных и топологических характеристик) позволили дать количественную морфологическую характеристику почвенных конкреций (ортштейнов) в зависимости от степени гидроморфизма почв и под влиянием осушения.

Выводы:

1. Установлено, что содержание ортштейнов в почвах с естественным водным режимом адекватно отражает степень гидроморфизма серых почв.

2. Средняя кривизна поверхности твердой фазы внутри пор ортштейнов оглеенных агросерых почв, полученная методом томографии, согласуется с первым утверждением.

3. Морфологические свойства ортштейнов определяются процессом ортштейнообразования, а именно размером ортштейнов. Метод компьютерной микротомографии позволяет обнаружить отчетливый центр концентрирования, хорошо выраженные кольца нарастания колоний микроорганизмов в мелких фракциях (1–3 мм) ортштейнах, их концентрически-тонкослоеватое сложение и самые высокие показатели округлости — максимальную кривизну поверхности.

4. Рентгеновская компьютерная микротомография позволяет установить различия по кривизне поверхности, объему, пористости и удельной поверхности в зависимости от размера конкреций даже при детальном рассмотрении:

 © Авторы статьи / Authors of the article

фракции 1–2; 2–3 и 3–5 мм. С увеличением размера конкреций порозность, кривизна поверхности, объем, удельная поверхность – возрастают.

5. Осушение приводит к глубокой трансформации и таких устойчивых соединений как конкреции на фоне непрекращающегося процесса ортштейнообразования: произошло уменьшение объема и кривизны ортштейнов; а площадь поверхности и пористость характеризуются широким варьированием. Это утверждение оказалось справедливым и за 30-летний период последействия дренажа.

6. По средней кривизне поверхности и пористости ортштейнов осушенные почвы со временем приближаются к «автоморфным» (глубокооглеенным) почвам.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема №121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления»).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was carried out as part of a state assignment for Lomonosov Moscow State University (project No. 121040800146-3, ‘The physical basis of the ecological functions of soils: monitoring, forecasting and management technologies’).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kovalev I.V. Assessment of the effectiveness of different drainage systems in mineral heavy loamy soil; parameters, regimes, and requirements for drainage system reconstruction / I.V. Kovalev // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2024. — Vol. 79. — № 4. — P. 438–454. — DOI: 10.3103/S0147687424700.

2. Kovalev I.V. The age and genesis of fe–mn nodules in gray forest soilsof the southern taiga based on the results of isotope and metagenomic studies / I.V. Kovalev, N.O. Kovaleva, E.M. Stolpnikova [et al.] // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2022. — Vol. 77. — № 4. — P. 295–302. — DOI: 10.3103/S014768742204007X.

3. Kovalev I.V. Drained soils as an analogue of a large-area lysimeter / I.V. Kovalev // Moscow University Soil Science Bulletin. — 2021. — Vol. 76. — № 3. — P. 138–147. — DOI: 10.3103/S0147687421030054.

4. Abrosimov K.N. Tomography in Soil Science: From the First Experiments to Modern Methods (A Review) / K.N. Abrosimov, K.M. Gerke, D.S. Fomin [et al.] // Eurasian Soil Science. — 2021. — Vol. 54. — № 9. — P. 1385–1399. — DOI: 10.1134/S1064229321090027.

5. Emmet-Booth J.P. A review of visual soil evaluation techniques for soil structure / J.P. Emmet-Booth, P.D. Forristal, O. Fenton [et al.] // Soil Use and Management. — 2016. — Vol. 32. — № 4. — P. 623–634. — DOI: 10.1111/sum.12300.https://sci-hub.box/10.1111/sum.12300.

6. Rabot E. Soil structure as an indicator of soil functions: A review / E. Rabot, M. Wiesmeier, S. Schlüter [et al.] // Geoderma. — 2018. — Vol. 314. — P. 122–137. — DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

7. Romero-Ruiz A. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization / A. Romero-Ruiz, N. Linde, T. Keller [et al.] // Reviews of Geophysics. — 2019. — Vol. 56. — № 4. — P. 672–697. — DOI: 10.1029/2018rg000611.

8. Fomin D.S. Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle / D.S. Fomin, A.V. Yudina, K.A. Romanenko [et al.] // Geoderma. — 2023. — Vol. 432. — P. 116401.

9. Kovaleva N.O. Mathematical methods in the study of the morphology of soil nodules / N.O. Kovaleva, I.V. Kovalev, E.A. Zvychaynaya // International conference Mathematics in the constellation of sciences. On the anniversary of the rector of Moscow State University, academician Viktor Antonovich Sadovnichy. Abstracts of reports. — Moscow: Publishing House of Moscow State University. — 2024.

10. Tolstygin K.D. Morphological and topological dynamics of soil pore structure during wetting–drying / K.D. Tolstygin, A.S. Zubov, M.V. Karsanina [et al.] // Soil and Tillage Research. — 2026. — Vol. 256. — № 2. — P. 106895. — DOI: 10.1016/j.still.2025.106895.

11. Ivonin D. Quantitative Analysis of Pore Space Structure in Dry and Wet Soil by Integral Geometry Methods / D. Ivonin, T. Kalnin, E. Grachev [et al.] // Geosciences. — 2020. — Vol. 10. — № 9. — P. 365. — DOI: 10.3390/geosciences10090365.

12. Vogel H. Quantification of soil structure based on Minkowski functions / H. Vogel, U. Weller, S. Schlüter // Computers and Geosciences. — 2016. — Vol. 36. — P. 1236–1245.

13. Kalnin T.G. Analysis of tomographic images of the soil pore space structure by integral geometry methods / T.G. Kalnin, D.A. Ivonin, K.N. Abrosimov [et al.] // Eurasian Soil Science. — 2021. — Vol. 54. — № 9. — P. 1400–1409. — DOI: 10.1134/s1064229321090039.