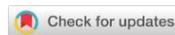


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-208-231



Ссылки для цитирования:

Фомин Д.С., Юдина А.В., Романенко К.А. Неоднородность свойств порового пространства гумусового горизонта темно-серой почвы в масштабе педона // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 117. С. 208-231. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-208-231

Cite this article as:

Fomin D.S., Yudina A.V., Romanenko K.A., Heterogeneity of pore space properties at the pedon scale of the Phaeozems humus horizon, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 117, pp. 208-231, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-208-231

Благодарность:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 21-74-00090, <https://rscf.ru/project/21-74-00090/>.

Acknowledgments:

The research was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 21-74-00090, <https://rscf.ru/project/21-74-00090/>.

Неоднородность свойств порового пространства гумусового горизонта темно-серой почвы в масштабе педона

© 2023 г. Д. С. Фомин^{*}, А. В. Юдина^{**},
К. А. Романенко^{***}

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>, e-mail: fomin_ds@esoil.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: yudina_av@esoil.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-0016-5019>.

Поступила в редакцию 15.05.2023, после доработки 21.10.2023,
принята к публикации 10.10.2023

Резюме: Вариабельность параметров почвы зависит от выбранного метода измерений, генезиса и типа землепользования почвы, а также уровня иерархии структурной организации почвы. Компьютерная томография почв – активно развивающийся метод изучения структуры почвы, для которого остаются актуальными многие методические

вопросы. Цель данной работы – изучить вариабельность основных параметров порового пространства (общей пористости, количества и среднего размера пор) на примере гумусового горизонта серой лесной почвы. Для этого было отобрано избыточное количество микромонолитов в количестве 15 штук (объемом 2×3 см). На основе статистической оценки варьирования параметров была поставлена задача определить оптимальное количество повторностей, позволяющее полноценно охарактеризовать микроструктуру порового пространства почвы в масштабе педона. Наименьшая разница неоднородности между педоном и репрезентативным элементарным объемом *REV* наблюдается для общей пористости (~12 раз), в то время как для количества и среднего размера пор это соотношение больше (~14 раз). В среднем уровень порога, при котором дисперсия свойств прекращала снижаться, для общей пористости равняется 7.3 ± 0.6 шт., для количества пор – 6.5 ± 0.6 шт., для среднего размера пор – 7.5 ± 0.4 шт. Таким образом, минимальное количество повторностей, необходимое для полной характеристики порового пространства исследованной почвы, составило 7 шт. Отбор и анализ микромонолитов в 3-кратной повторности позволили описать неоднородность структуры верхнего горизонта педона только на 25–30%.

Ключевые слова: поровое пространство почвы, структура почвы, пестрота почвенного покрова, компьютерная томография, отбор почвенных образцов.

Heterogeneity of pore space properties at the pedon scale of the Phaeozems humus horizon

© 2023 D. S. Fomin^{*}, A. V. Yudina^{**}, K. A. Romanenko^{***}

Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

^{*}<https://orcid.org/0000-0003-3733-0284>, e-mail: fomin_ds@esoil.ru,

^{**}<https://orcid.org/0000-0003-2453-3090>, e-mail: yudina_av@esoil.ru,

^{***}<https://orcid.org/0000-0003-0016-5019>.

Received 15.05.2023, Revised 21.10.2023, Accepted 10.10.2023

Abstract: The variability of soil parameters depends on the chosen method of measurements, the genesis and type of soil land use, and the level of hierarchy of soil structure organization. Computed tomography of soils is an actively growing method of soil structure study, for which many methodological issues remain relevant. The aim of this work was to examine the variability of the main parameters of the pore space (total porosity, number and average pore

size) by the example of the humic horizon of a Phaeozem soil. For this purpose, an excessive number (15 microcores of 2×3 cm volume) was sampled from soil profile. Based on statistical evaluation of parameter variation, the objective was to determine the optimal number of replicates allowing full characterization of the soil pore space microstructure at the pedon scale. The smallest difference in heterogeneity between pedon and representative elementary volume *REV* was observed for total porosity (~12 times), while this ratio is larger (~14 times) for number and average pore size. On average, the threshold level, at which the dispersion of properties stopped decreasing, was 7.3 ± 0.6 monoliths for total porosity, 6.5 ± 0.6 monoliths for pore number, and 7.5 ± 0.4 monoliths for LT. Thus, minimal number of replicates necessary for full characteristic of soil structure is 7 monoliths. Sampling and analysis of microcores in 3 repetitions allows to describe the heterogeneity of the structure of the upper pedon horizon only by 25–30%.

Keywords: soil pore space, soil structure, soil heterogeneity, computed tomography, soil sampling.

ВВЕДЕНИЕ

Вариабельность почвенных свойств зависит от метода измерений, генезиса и типа землепользования почвы ([Дмитриев, 1999](#); [Урусевская и др., 2000](#)), а также от *уровня иерархии структурной организации почвы* ([Yudina, Kuzyakov, 2019](#); [Yudina et al., 2018](#)). *Вариабельность почвенных свойств как в пространстве (пространственная), так и во времени (временная) имеет разные закономерности для разных масштабных уровней. Оба вида вариабельности свойств почв необходимо учитывать при оценке качества почв и, соответственно, при разработке методов измерения, критериев оценки* ([Vogel et al., 2019](#)).

Оценка вариабельности параметров почвы проводится на основе дескриптивной статистики с помощью статистических характеристик, обозначающих меры местоположения (центрированности), разброса (рассеивания), формы распределения случайной величины ([Дмитриев, 1999](#); [Самсонова, 2007](#)). Наиболее часто используемыми в почвенных исследованиях являются: среднее (*m*), стандартное отклонение (*standard deviation, SD*) и коэффициент вариации (*coefficient of variation, CV, %*) ([Самсонова, 2007](#); [Pen-nock et al., 2008](#)). Для оценки степени вариабельности свойств почв было предложено использовать следующие градации *CV*: от

0 до 15% – низкая вариабельность, 16–35 – средняя, и > 36 – высокая ([Wilding, 1985](#)). Считается, что такие физические свойства как плотность почвы, общая пористость, содержание ила и песка характеризуются низкой–средней, низкой, средней–высокой и низкой–средней вариабельностью соответственно (диапазоны CV равны 3–26, 7–11, 16–53 и 3–37% соответственно) ([Mulla, McBratney, 2001](#)). Однако в последнее время все больше внимания уделяется динамичности физических параметров и разработке на их основе индикаторов функций почв ([Rabot et al., 2018](#); [Yudina, Kuzyakov, 2019](#)).

Представление о вариабельности почвенных свойств рассматривается через призму конкретного свойства и методики измерения ([Дмитриев, 1999](#)). Классический отбор средней пробы дает ограниченный набор информации прежде всего потому, что нарушается целостность почвенной структуры. Исследования почвенных свойств в образцах, имеющих такое же строение, что и в естественных условиях, позволяет расширить понимание неоднородности почвы на различных уровнях. Компьютерная томография (СТ) почв – активно развивающийся метод изучения структуры почв в ненарушенном состоянии ([Абросимов и др., 2021](#); [Mooney et al., 2022](#)), который в зависимости от используемого разрешения съемки и размера образца почвы позволяет описать неоднородность строения почвы в масштабах агрегатов (мм – см), педона (см – м) и ландшафта (м – км). Характеристика строения агрегатов почв размерами 0.25–10 мм обычно проводится при разрешении в единицы и десятки мкм (например, [Papadopoulos et al., 2009](#); [Zhao et al., 2017](#); [Yudina et al., 2022](#)). Горизонты почв на уровнях педона и ландшафта исследуют с помощью компьютерной макротомографии с разрешением от 10 до 100 мкм и более в монолитах цилиндрической формы объемом от 100 см³ и крупнее (например, [Rab et al., 2014](#); [Luo et al., 2010](#); [Lucas et al., 2019](#)).

Использование компьютерной томографии для изучения почвенной структуры и порового пространства всегда является задачей оптимизации качества изображения и оптимального объема образца. Несмотря на перспективность использования метода СТ, томографическое оборудование мало распространено в почвенных лабораториях по причине довольно высокой стоимости и

высоких требований к навыкам оператора и аналитика полученных данных. Обычно качество изображения, т. е. разрешение съемки, определяется исследовательской задачей. Разрешение изображения определяет границы возможного размера образца, и, как правило, для получения изображения с разрешением пикселя 30 мкм и меньше требуется отбор микромонолитов диаметром 2–3 см. Вопрос о количестве повторностей, необходимых для полноценной характеристики структуры с помощью микромонолитов, остается актуальным, так как обычно исследователи используют минимальное число повторностей, равное 3 или 4.

Поэтому цель данной работы – изучить вариабельность основных параметров порового пространства гумусового горизонта серой лесной почвы, полученных с помощью компьютерной томографии. Мы отобрали из гумусового горизонта серой почвы микромонолиты в количестве 15 штук и на основе статистической оценки варьирования параметров поставили задачу определить оптимальное количество повторностей, позволяющее полноценно охарактеризовать микроструктуру порового пространства почвы в масштабе педона.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – темно-серая почва со вторым гумусовым горизонтом под широколиственным лесом (Каширский район, Московская обл., Россия; 54°46'37.52" N; 38°01'55.34" E). Название почвы по WRB (2014) – Luvic Retic Greyzemic Phaeozems. Базовые показатели и дополнительная информация об исследованном почвенном разрезе: описание профиля, физические свойства и характеристики порового пространства по генетическим горизонтам, – представлены в работе Скворцовой и др. (2021); агрегатный состав и механическая устойчивость гумусового горизонта – Fomin et al. (2021).

В работе был исследован гумусовый горизонт AU, имеющий мощность 0–40 см. Все микромонолиты почв размерами 2 см в диаметре и 3 см в высоту были отобраны с глубины 10–15 см в 15-кратной повторности в пределах $\sim 3 \text{ м}^2$ (по трем стенкам разреза). Микромонолиты сразу после отбора были плотно упакованы и убраны на хранение в холодильную камеру при 4 °С для сохране-

ния естественного состояния влажности.

Микротомографическая съемка. Съемка монолитов производилась на рентгеновском компьютерном микротомографе Bruker SkyScan 1172G (США). Образцы ненарушенного строения снимались с разрешением 11 мкм/пиксель, с оборотом образца на 360° вокруг своей оси, угловым шагом 0.4°, параметрами тока на источнике рентгеновского тока 70 кВ и 130 мА, а также с 0.5 мм Al фильтром рентгеновского излучения. Экспозиция каждого кадра составляла 900 мс. Рентгенограмма на каждой угловой позиции является усреднением трех кадров для повышения качества рентгенограммы и снижения шума.

Реконструкция микротомограмм почв. Реконструкция изображений проведена в программе NRecon (США) v 1.7.4.6 от производителя микротомографа. Для каждого набора рентгенограмм была проведена коррекция несоосности (*misalignment compensation*), чтобы скомпенсировать дрейф оси вращения образца относительно оптической оси пучка рентгеновских фотонов. Были использованы алгоритм маскирования дефектных пикселей, алгоритм подавления кольцевых артефактов и алгоритм нивелирования эффекта ослабления пучка, выражающийся в виртуальном увеличении рентгеновской плотности периферической части образца и уменьшении рентгеновской плотности центральной части образца. Для реконструкции изображений был выбран динамический диапазон черного и белого, где граница черного соответствовала значению рентгеновской плотности равной -1 000 единиц Хаунсфилда (HU), а граница белого соответствовала 3 000 HU. То есть все компоненты почвы, например, газовая фаза, имеющая плотность ниже -1 000 HU, на изображении были отображены черным цветом (интенсивность цвета в серых оттенках $I = 0$); а компоненты почвы, такие как железистые образования или массивные зерна кварца или полевых шпатов, имеющие высокую плотность (3000 HU), отображались белым цветом (интенсивность цвета в серых оттенках $I = 255$). К данному диапазону рентгеновских плотностей принадлежат все имеющиеся в образцах фазы почвы.

Результаты реконструкции изображений были сохранены в

формате 8bit BMP в виде стеков файлов с послойными последовательными изображениями двумерных срезов.

Для последующего улучшения качества изображения были обработаны с помощью медианного фильтра с кубическим окном фильтрации со стороной куба 4 пикселя.

После фильтрации изображения были подвергнуты бинаризации (разделению на две томографические фазы) с помощью глобального алгоритма. Таким образом все пиксели делятся на два класса – на поры и твердую фазу – по границе интенсивности цвета в серой шкале. Граница бинаризации выбиралась экспертно, таким образом, чтобы в класс твердой фазы вошли все компоненты твердой фазы, включая минеральные зерна, глинистую матрицу, органическое вещество.

Рассчитанные томографические параметры. Для анализа порового пространства были рассчитаны следующие параметры – общая пористость, количество пор и средний размер пор.

Общая томографическая пористость (P_v , %) – это процентное соотношение количеств пикселей, относящихся к поровому пространству, ко всему объему образца.

Количество пор (NOP , шт./мм³) – это количество отдельных кластеров пикселей, относящихся к поровому пространству, отнесенное к объему образца.

Средний размер пор (LT , мм) – это средний размер сферы (шара), которую можно вписать в поры. Данный параметр также называется “локальная толщина пор” (*local thickness of pores*).

Все исходные данные приведены в Приложении 1.

Анализ вариограмм. Для выявления количества повторностей, достаточных для описания свойств порового пространства почвы, использовался следующий алгоритм: а) выбиралось конкретное свойство; б) общая выборка разделялась на подвыборки разного размера; в) для каждой подвыборки рассчитывалось среднее значение; г) между средними значениями подвыборок для каждого размера рассчитывалась дисперсия между подвыборками; д) анализировалась взаимосвязь между размерами подвыборки и дисперсией между подвыборками с помощью метода вариограмм; е) определялись значение и доверительный интервал порога ва-

риограммы.

Данные для анализа были подготовлены с помощью алгоритма бутстреп (*Bootstrap*). Бутстреп – это метод передискретизации выборки с заменой чисел, который позволяет оценить распределение генеральной совокупности даже по одной выборке. С помощью алгоритма бутстреп были созданы множественные подвыборки с последовательным увеличением размера подвыборки от 2 до 15 повторностей для каждого свойства, т. е. с увеличением числа повторностей отбора образцов. Количество подвыборок для каждого числа повторностей каждого свойства составляло 1 000 шт. Для каждой подвыборки было рассчитано среднее значение, после чего между подвыборками рассчитывалась дисперсия. Для набора дисперсий строились вариограммы, проводились их аппроксимация и анализ. Важно отметить, что по оси абсцисс вместо традиционного для вариографического анализа расстояния между точками, было выбрано количество повторностей отбора образцов.

Аппроксимация вариограмм проводилась экспоненциальной функцией по формуле ([Демьянов, Савельева, 2010](#)):

$$\gamma(h) = c_0 + (c - c_0)[1 - \exp(1 - \frac{3 \times h}{a})], \text{ (уравнение 1)}$$

где $\gamma(h)$ – дисперсия параметра, h – размер подвыборки, т. е. число повторностей; c_0 – наггет или самородок, т. е. точка пересечения функции с осью ординат; c – плато, т. е. минимальная дисперсия свойства; a – действительный радиус или порог, рассчитанный с поправкой ([Chiles, Delfiner, 1999](#)).

Количество повторностей, достаточное для описания свойств порового пространства почвы, определялось на основе величины и доверительного интервала значения порога. Диапазон повторностей определялся на основе округления доверительного интервала до целых чисел. Количество повторностей, достаточное для описания порового пространства профиля темно-серой почвы с 95%-ной вероятностью, рассчитывалось как максимальное значение для всех исследуемых свойств нижнего предела доверительного интервала.

Метаанализ. Для сравнения варибельности свойств порового пространства с другими почвами и образцами был проведен метаанализ. Основным требованием к отбираемым статьям – это наличие нескольких пространственных повторностей в рамках педона. Из исследовательских работ ([Zhao et al., 2017](#); [Liang et al., 2019](#); [Zhao et al., 2020](#); [Menon et al., 2020](#); [Guo et al., 2020](#)) были собраны и проанализированы данные о количестве повторностей, среднем значении и стандартном отклонении для общей пористости, количества пор и среднего размера пор. На основе собранной информации рассчитывался коэффициент вариации (CV) и соотносился с результатами данной работы.

Статистическая обработка. Статистическая обработка и визуализация выполнялись в среде *R 4.2.1*. Расчет базовых статистик выполнялся с использованием пакета *broom* ([Robinson, 2014](#)). Бутстрепинг выполнялся с использованием пакета *mosaic* ([Prim et al., 2017](#)). Визуализация – с использованием пакета *ggplot2* ([Wickham et al., 2016](#)). Тест Шапиро–Уилка выполнялся с уровнем значимости $\alpha = 0.1$ ([Royston, 1995](#)) с использованием пакета *stats*. Доверительный интервал рассчитывался как двусторонний с уровнем значимости $\alpha = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическая оценка варибельности свойств порового пространства. Общая пористость и количество пор характеризуются нормальным распределением (табл. 1).

Общая пористость (P_t) имеет самый низкий коэффициент вариации (17.1%) среди изученных свойств, который позволяет отнести общую пористость к свойствам со средней варибельностью ([Wilding, 1985](#)). Среднее значение P_t (27.65%) отличается от медианы (26.6%) менее чем на 4%. Минимум и максимум общей пористости различаются в 1.8 раза (табл. 1).

Количество пор (NOP) на основе величины коэффициента вариации относится к свойствам почв с высокой варибельностью (36.2%). Среднее значение NOP (49.59) отличается от медианы (48.0) на 3.2%. Разброс количества пор между образцами внутри педона составляет 57 пор на мм^3 .

Средний размер пор (LT) – единственное свойство, не имеющее нормального распределения (табл. 1). Кроме того, LT характеризуется самым высоким коэффициентом вариации (46.2%). Среднее значение и медиана LT различаются на 25% (0.39 и 0.31 мм соответственно). В то же время отношение максимума к минимуму LT лишь немногим выше, чем у NOP , и составляет 4.65 раза.

Таблица 1. Вариабельность параметров порового пространства исследованной серой лесной почвы ($n = 15$)

Table 1. Pore space parameters variability of studied Phaeozem soil ($n = 15$)

Статистический показатель	Параметр		
	Pt (%)	NOP (мм ³)	LT (мм)
Среднее \pm CO*	27.65 \pm 4.72	49.59 \pm 17.94	0.39 \pm 0.18
Коэффициент вариации	17.1%	36.2%	46.2%
Медиана	26.6	48.0	0.31
Минимум	20.19	16.49	0.19
Максимум	36.20	73.50	0.89
Нижний доверительный интервал (Q2.5)	20.83	21.46	0.20
Верхний доверительный интервал (Q97.5)	34.90	73.21	0.76
Тест Шапиро–Уилка (W/p-value)	0.944/0.44	0.939/0.37	0.847/0.02

Примечание. *CO – стандартное отклонение.

Note. *CO – standard deviation.

Определение оптимального количества повторностей при описании порового пространства почвы. Один из основных методов анализа пространственной неоднородности почвенных свойств – это анализ вариограмм. Анализ основан на описании

дисперсии свойства с помощью модели вариограммы, которая включает параметры: самородок (c_0), плато (c) и порог (a). В контексте данной работы самородок равен полной дисперсии свойства в горизонте на уровне педона и равняется квадрату стандартного отклонения свойства из таблицы 1. Плато – это дисперсии репрезентативного элементарного объема (*representative elementary volume, REV*), внутри которого данное свойство в горизонте стационарно. Идеального значения плато можно достичь при использовании неограниченно большого количества повторностей. Однако количество повторностей, которое достаточно для описания дисперсии свойства в горизонте на уровне *REV*, определяется параметром a , т. е. порогом.

Самородок модели аппроксимации вариограммы P_t показывает значение, описывающее значение дисперсии свойства горизонта на уровне педона (рис. 1А). Неоднородность пространственного распределения общей пористости в горизонте на уровне педона (параметр c_0) более чем в 12 раз выше, чем на уровне репрезентативного элементарного объема (параметр c). Оптимальное количество повторностей, которое требуется для достоверного описания неоднородности ($p = 0.95$) общей пористости внутри горизонта на уровне педона, находится в диапазоне доверительного интервала от 6.11 до 8.80 и в среднем составляет 7.31 шт. При округлении до целого числа минимальное количество повторностей равно 6 шт., а максимальное – 9 шт.

Для общего количества пор пространственная неоднородность в горизонте для педона (параметр c_0) почти в 14 раз больше, чем для *REV* (параметр c), что еще больше, чем для общей пористости (рис. 1В). Однако для достижения дисперсии уровня *REV* потребуются меньше повторностей. Доверительный интервал параметра a составляет 5.11–8.32 шт., а среднее значение равно 6.54. При округлении до целого числа минимальное количество повторностей для достоверного определения количества пор равняется 5, а максимальное – 8.

Масштаб различий пространственной неоднородности среднего размера пор в горизонте для педона и *REV* практически равняется количеству пор (рис. 1С).

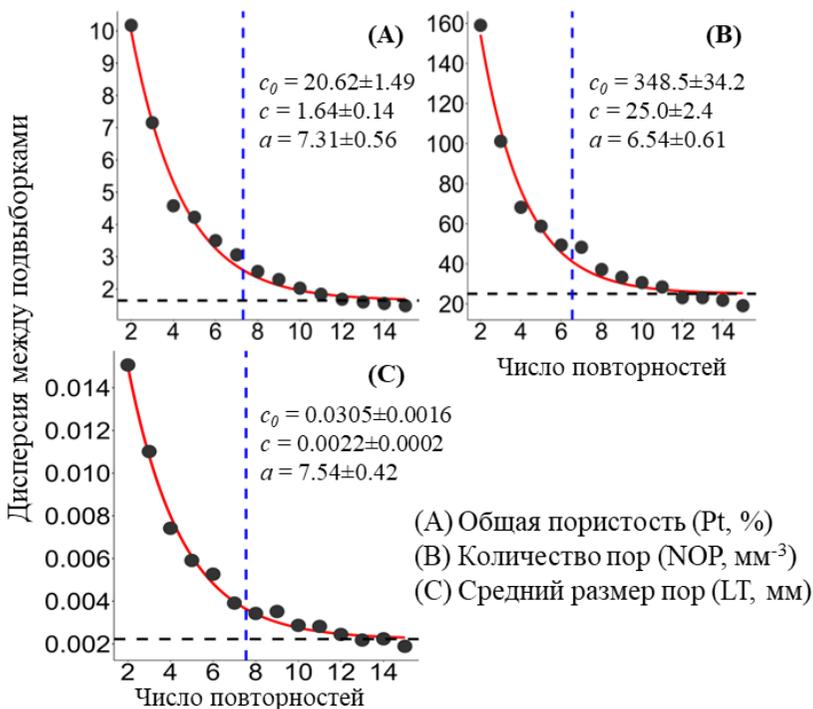


Рис. 1. Модели вариограмм свойств порового пространства гумусового горизонта серой почвы. По оси X – количество повторностей отбора образцов (шт.). По оси Y – дисперсии свойств: (A) – общая пористость (%), (B) – количество пор (мм⁻³), (C) – средний размер пор (мм). Сплошная линия – аппроксимация данных дисперсии на основе экспоненциальной функции (уравнение 1). Вертикальная пунктирная линия обозначает порог (коэффициент a). Горизонтальная пунктирная линия обозначает уровень плато (коэффициент c).

Fig. 1. Variogram models of the pore space properties of the Greyic Phaeozems humus horizon. X-axis is the number of sampling repetitions (pcs). Y-axis: (A) – total porosity (%), (B) – number of pores (mm⁻³), (C) – average pore size (mm). The solid line is an approximation of variance data based on an exponential function (Equation 1). The vertical dashed line denotes the coefficient a . The horizontal dashed line denotes the plateau level (the coefficient c).

Параметр c_0 почти в 14 раз больше, чем параметр c . Однако нижняя граница доверительного интервала порога (параметра a) для LT на 22% выше, чем для NOP , и на 8% выше, чем для P_t , и составляет 6.66 шт. Верхняя граница доверительного интервала равна 8.6 шт., а среднее значение равно 7.54. При округлении до целого числа минимальное количество повторностей для достоверного определения количества пор равняется 7, а максимальное – 9.

Варьирование свойств гумусового горизонта серых почв на разных масштабных уровнях. Гумусовый горизонт наиболее динамичен и подвержен частым изменениям влажности, температуры, а также является наиболее биологически активным пространством. Однако даже в одном горизонте серой почвы на различных масштабных уровнях вариабельность одного и того же почвенного свойства может иметь различные закономерности.

В *масштабе почвенного покрова* (весь ареал серых лесных суглинистых и глинистых почв на территории бывшего СССР) неоднородность и среднее значение содержания органического углерода гумусового горизонта серых лесных почв сильно различается между лесными и пахотными вариантами ([Урусевская и др., 2000](#)). Для серых лесных почв под лесом содержание органического углерода характеризуется разбросом от 1.53 до 13.91% (среднее значение и стандартное отклонение равно $5.55 \pm 1.10\%$) и коэффициентом вариации 19%. Анализ углерода во всех горизонтах был оценен для 980 образцов, из которых гумусовый горизонт был представлен 146 образцами.

В *масштабе водораздела* химические и физико-химические свойства пахотного горизонта серой лесной почвы Владимирского ополья характеризуются различной степенью варьирования ([Жарова и др., 2002](#)). Актуальная кислотность (рН водный) и удельная поверхность (УП) почвы характеризуются крайне низким коэффициентом вариации (КВ) – 3.22 и 8.9% (среднее значение и стандартное отклонение равны 6.82 ± 0.22 и 85.5 ± 7.6 м²/г для рН и УП соответственно). Наибольшее значение КВ характерно для содержания Р₂О₅ и равно 59.2% (9.8 ± 5.8 мг/100 г почвы), в то же время КВ содержания К₂О более чем в 2 раза ниже и равен

22.9% (8.3 ± 1.9 мг/100 г почвы). При этом количество проб для рН составляло 403 образца, для удельной поверхности – 202 образца, для содержания P_2O_5 и K_2O – 279 образцов.

При изучении неоднородности на больших масштабных уровнях минимальной единицей оценки является педон или почвенный индивидуум. В таких исследованиях при изучении поверхностного (гумусового, пахотного) горизонта количество образцов соответствует количеству точек из расчета один образец из одного педона. Данный подход зачастую является вынужденным решением, в рамках которого вариабельность почвенных свойств в масштабе педона игнорируется. Наша работа актуализирует вопрос корректности объединения информации из масштаба педона в масштаб почвенного покрова для оценки физических свойств почвы, которые необходимы для моделирования гидрологического режима в ландшафте.

Варьирование параметров порового пространства различных почв в масштабе педона. Для понимания масштаба пространственной неоднородности свойств порового пространства на уровне педона для разных почв и типов землепользования нами был проведен сбор и анализ данных из научных публикаций по теме работы. Сравнение результатов, полученных для порового пространства гумусового горизонта серой лесной почвы, с данными метаанализа показало, что варьирование свойств исследованного объекта в среднем выше, чем в объектах из метаанализа.

При исследовании Mollisols под вторичным лесом Китая ([Liang et al., 2019](#)) в 4-кратной повторности коэффициент вариации общей пористости и количества пор находится в диапазоне среднее \pm стандартное отклонение CV серой почвы (рис. 2А, 2В). Вероятно, неоднородность порового пространства, сформированного с участием лесной растительности, имеет схожий порядок вариабельности у разных почв.

Почвы Gleysols, Ultisols и Calcicorthic Aridisols на пастбищах при 3-кратной повторности ([Zhao et al., 2020](#)) были исследованы с использованием тех же параметров порового пространства, что и в нашей работе: P_v , NOP , LT . Коэффициент вариации общей пористости выше, чем в среднем у серой почвы, и находится в

диапазоне между средним значением и максимумом. CV количества пор практически равен серой почве. Для среднего размера пор CV существенно ниже, по сравнению со средним значением для серой почвы. В нашей работе вариабельность параметров возрасла в ряду $Pt - NOP - LT$, в то время как у Zhao et al. (2020) в таком же ряду вариабельность снижалась (рис. 2А, 2В, 2С). Поскольку в работах рассматривались по умолчанию разные почвы, то, вероятно, различия обусловлены типом землепользования. Поэтому можно предположить, что для сельскохозяйственных объектов тенденции вариабельности свойств порового пространства могут в противоположную сторону отличаться от почв под естественными экосистемами.

Гумусовый горизонт почв Mollic Fluvisols под пашней, лугом и лесом при 7–8-кратной повторности показал более низкие значения варьирования общей пористости, чем для серой почвы (Menon et al., 2020). Все CV общей пористости всех исследуемых в работе объектов находятся в диапазоне между средним значением и минимумом CV серых почв. Данный факт может быть обусловлен тем, что Fluvisols являются молодыми почвами на аллювиальных отложениях с коротким профилем. Вероятно, слабая зрелость аллювиальных почв и близость их состояния к материнской породе обуславливает их однородность и низкую пространственную вариабельность.

В работе Guo et al. (2022) изучались почвы Typic Hapludoll Китая при традиционной вспашке и при использовании технологии no-till в 3-кратной повторности. Общая пористость пахотных объектов крайне однородна, в то время как CV при no-till больше в 28 раз, что существенно превышает средние значения CV серых почв (рис. 1А). Вариабельность общей пористости и количества пор пахотных почв Calcaric Cambisol Китая при выборке 5 повторностей (Zhao et al., 2017) показали существенно более низкие значения CV , чем для серой почвы (рис. 1А, 1В). В обеих работах были исследованы пахотные почвы, в которых естественная вариабельность порового пространства нарушена и обуславливается только воздействием сельскохозяйственной техники. Регулярная вспашка приводит к гомогенизации гумусового горизонта (Bronick, Lal, 2005). При технологии no-till вспашка почвы не про-

изводится, и корневая система сельскохозяйственных растений за несколько лет может сформировать поровое пространство с высокой пространственной неоднородностью.

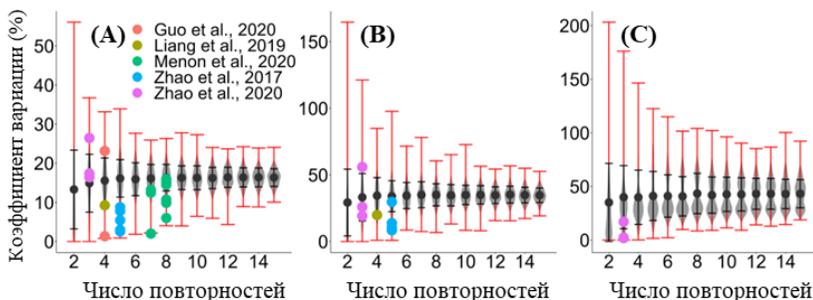


Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации (CV) свойств порового пространства для выборок разного размера. (A) – общая пористость (%), (B) – количество пор (мм^{-3}), (C) – средний размер пор (мм). Ось X – число повторностей (шт.). Ось Y – коэффициент вариации (%). Черные точки – среднее значение коэффициента вариации. Черные усы – стандартное отклонение коэффициента вариации. Красные усы – минимум и максимум коэффициента вариации. Цветные точки – данные метаанализа.

Fig. 2. Relationship between the coefficient of variation (CV) of pore space properties for different number of replicates of the sample. (A) – total porosity, (B) – number of pores, (C) – average pore size. X-axis – number of replicates (pcs). Y-axis – coefficient of variation (%). Black points – mean value of the CV. Black whiskers – standard deviation of the CV. Red whiskers – minimum and maximum of the CV. Colored dots – meta-analysis data.

Понимание функционирования почвенного покрова большой территории и на уровне педона основано на предположении о стационарности (однородности) свойств внутри выбранной единицы масштаба (Козловский, 2003; Gerke, Karsanina, 2020). Описание неоднородности почвы в целом в определенном масштабе является крайне сложной задачей, и для этого используют наборы интегральных свойств или индикаторов (Козловский, 2003; Pachepsky, Hill, 2017). Индикаторы должны обладать важным свойством – чувствительностью к разнообразию условий в рамках заданного масштаба (Priort, 2003). Общая пористость, количество

пор и средний размер пор являются интегральными параметрами порового пространства и почвенной структуры в целом ([Reynolds et al., 2009](#); [Rabot et al., 2018](#)).

Чувствительность индикаторов порового пространства к пространственной неоднородности не означает чувствительность к динамике почвенной структуры во времени и к воздействию внешних факторов на нее ([Vogel et al., 2019](#)). Ранее нами было показано для 3 генетических горизонтов дерново-подзолистой почвы, что общая пористость является плохим индикатором динамики порового пространства при изменении влажности почвы ([Fomin et al., 2023](#)). Как раз одной из причин слабой пригодности общей пористости к оценке динамики структуры является ее высокая пространственная неоднородность.

Важной частью оценки пространственной неоднородности горизонта на уровне педона является отбор достаточного количества образцов для анализа ([Pennock et al., 2008](#)). По результатам проделанной работы на примере гумусового горизонта серой лесной почвы мы можем дать рекомендации по количеству образцов для анализа порового пространства. Минимальный размер выборки определялся как максимальное округленное до целого значение нижнего доверительного интервала порога, т. е. коэффициента a . Для общей пористости минимальное число повторностей равняется 6, для количества пор – 5, для среднего размера пор – 7. Итого, минимальное количество образцов, которое стоит отбирать из профиля почвы для оценки порового пространства, составляет 7 шт. Более того, классический отбор проб для анализа порового пространства почвы (и других свойств в том числе) в 3-кратной повторности даст возможность описать пространственную неоднородность только на 25–30% (для P_t – 29%, для NOP – 25%, для LT – 30%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы изучили неоднородность распределения на уровне педона общей пористости, количества и среднего размера пор гумусового горизонта серой почвы под лесом. Сравнение результатов при разном размере выборки показало снижение дисперсии при увеличении размера выборки. Анализ вариограмм поз-

волил оценить различия вариабельности свойств для уровня педона и репрезентативного элементарного объема. Наименьшая разница неоднородности между педоном и репрезентативным элементарным объемом REV наблюдается для общей пористости (~12 раз), в то время как для количества и среднего размера пор это соотношение больше (~14 раз). Анализ порога позволил выявить различия в количестве повторностей, необходимых для полного описания неоднородности на уровне педона для каждого свойства. В среднем уровень порога, при котором дисперсия свойств прекращала снижаться, для P_t равняется 7.31 ± 0.56 шт., для NOP – 6.54 ± 0.61 шт., для LT – 7.54 ± 0.41 шт.

Сравнение результатов работы с данными метаанализа показали, что в среднем поровое пространство гумусового горизонта серой почвы имеет высокую пространственную неоднородность на уровне педона. В пахотных объектах метаанализа неоднородность порового пространства ниже, чем для объектов под лесом или почвосберегающими практиками землепользования.

Результаты работы показали, что общая пористость, количество пор и средний размер пор являются подходящими индикаторами порового пространства и почвенной структуры, которые имеют высокую чувствительность к пространственной неоднородности. По итогам данной работы мы можем дать рекомендации по количеству повторностей микромонолитов для анализа порового пространства на уровне педона, на примере гумусового горизонта серой почвы. Минимальное количество повторностей составляет 7 шт. Отбор и анализ микромонолитов в 3-кратной повторности позволяет описать неоднородность педона только на 25–30%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов К.Н., Герке К.М., Фомин Д.С., Романенко К.А., Корост Д.В. Томография в почвоведении: от первых опытов к современным методам (обзор) // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1097–1112.
2. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
3. Дмитриев Е.А. Представление о почвах как функция методов их изучения // Почвоведение. 1999. №. 1. С. 145.

4. *Жарова Е.В., Железова С.В., Самсонова В.П.* Пространственное варьирование свойств агросерой почвы в пределах сельскохозяйственного угодья Владимирского ополья // Почвоведение. 2002. №. 8. С. 936–944.
5. *Козловский Ф.И.* Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: ГЕОС. 2003. 536 с.
6. *Самсонова В.П.* Пространственная изменчивость почвенных свойств. 2008. 160 с.
7. *Скворцова Е.Б.* и др. Влияние многократного замораживания-оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ) // Почвоведение. 2018. №. 2. С. 187–196.
8. *Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С.* Географо-генетические особенности гумусного состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. №. 11. С. 1377–1390.
9. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: a review // *Geoderma*. 2005. Vol. 124. No. 1–2. P. 3–22.
10. *Chiles J.P., Delfiner P.* Geostatistics: modeling spatial uncertainty. John Wiley, 1999. 695 p. DOI: [10.1002/9780470316993](https://doi.org/10.1002/9780470316993).
11. *Fomin D. et al.* Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving // *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 214. P. 105183.
12. *Fomin D.S. et al.* Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle // *Geoderma*. 2023. Vol. 432. P. 116401.
13. *Gerke K.M., Karsanina M.V.* How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: Pore-scale modelling and stationarity analysis // *European Journal of Soil Science*. 2021. Vol. 72. No. 2. P. 527–545.
14. *Guo Y. et al.* Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 703. P. 134617.
15. *Liang A. et al.* Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 185. P. 94–101.
16. *Lucas M. et al.* Soil structure formation along an agricultural chronosequence // *Geoderma*. 2019. Vol. 350. P. 61–72.
17. *Luo L., Lin H., Li S.* Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography // *Journal of Hydrology*. Vol. 393. Iss. 1–2. P. 53–64.
18. *Menon M. et al.* Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability // *Geoderma*. 2020. Vol. 366. P. 114259.

19. *Mooney S.J., Young I.M., Heck R.J., Peth S.* (Eds.). X-ray Imaging of the Soil Porous Architecture. Springer Nature, 2022. 229 p.
20. *Mulla D.J., McBratney A.B.* Soil spatial variability // Soil physics companion. Boca Raton: CRC Press, 2001. P. 343–77.
21. *Pachepsky Y., Hill R.L.* Scale and scaling in soils // Geoderma. 2017. Vol. 287. P. 4–30.
22. *Papadopoulou A. et al.* Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X- ray computed tomography // European Journal of Soil Science. 2009. Vol. 60. No. 3. P. 360–368.
23. *Pennock D., Yates T., Braidek J.* Soil sampling designs // Soil sampling and methods of analysis. 2008. Vol. 2. P. 25–37.
24. *Piorr H.P.* Environmental policy, agri-environmental indicators and landscape indicators // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2003. Vol. 98. No. 1–3. P. 17–33.
25. *Prim R.J., Kaplan D.T., Horton N.J.* The mosaic package: helping students to “think with data” using R // R Journal. 2017. Vol. 9. No. 1. P. 77.
26. *Rab M.A., Haling R.E., Aarons S.R., Hannah M., Young I.M., Gibson D.* Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils // Geoderma. 2014. Vol. 213. P. 460–470.
27. *Rabot E. et al.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // Geoderma. 2018. Vol. 314. P. 122–137.
28. *Reynolds W.D. et al.* Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality // Geoderma. 2009. Vol. 152. No. 3–4. P. 252–263.
29. *Robinson D.* broom: And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames //arXiv preprint arXiv:1412.3565. 2014.
30. *Royston J.,* A remark on algorithm AS-181-The W test for normality (Algorithm R94) // J Appl Stat. 1995. Vol. 44. No. 4. P. 547–551.
31. *Vogel H.J. et al.* Quantitative evaluation of soil functions: Potential and state // Frontiers in Environmental Science. 2019. P. 164.
32. *Wickham H., Chang W., Wickham M.H.* Package ‘ggplot2’ // Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. Version. 2016. Vol. 2. No. 1. P. 1–189.
33. *Wilding L.P.* Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys // Soil Spatial Variability *D.R. Nielsen, J. Bouma* (Eds.). Pudoc, Wageningen, 1985. P. 166–194.
34. *Yudina A.V. et al.* Micro-within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability // Geoderma. 2022. Vol. 415. P. 115771.
35. *Yudina A., Kuzyakov Y.* Saving the face of soil aggregates // Global change biology. 2019. Vol. 25. No. 11. pp. 3574–3577.

36. *Yudina A.V. et al.* From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // *Eurasian soil science*. 2018. Vol. 51. P. 1326–1347.
37. *Zhao Y., Hu X., Li X.* Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography // *Catena*. 2020. Vol. 193. P. 104622.
38. *Zhao D. et al.* Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography // *Soil and Tillage Research*. 2017. Vol. 165. P. 239–246.

REFERENCES

1. Abrosimov K.N. et al., Tomography in Soil Science: From the First Experiments to Modern Methods (A Review), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, pp. 1385–1399.
2. Demyanov V.V., Savelyeva E.A., *Geostatistika: teorija i praktika* (Geostatistics. Theory and Practice), Moscow: Nauka, 2010. 327p.
3. Dmitriev E.A., Predstavlenie o pochvah kak funkciya metodov ih izuchenija (The concept of soils as a function of methods of their study), *Pochvovedenie*, 1999, No. 1, pp. 145.
4. Zharova E.V., Zhelezova S.V., Samsonova V.P., Spatial variation of the properties of agrosera soil within the agricultural land of the Vladimir polony (Prostranstvennoe var'irovanie svojstv agroseroj pochvy v predelakh sel'skohozejajstvennogo ugod'ja Vladimirskogo opol'ja), *Pochvovedenie*, 2002, No. 8, pp. 936–944.
5. Kozlovskii F.I., *Teorija i metody izuchenija pochvennogo pokrova* (Theory and Methods of Studying the Soil Cover), Moscow: GEOS, 2003, 536 p.
6. Samsonova V.P., *Prostranstvennaja izmenchivost' pochvennyh svojstv* (Spatial variability of soil properties), 2008, 160 p.
7. Skvortsova E.B. et al., Vlijanie mnogokratnogo zamorazhivanija-ottaivanija na mikrostrukturu agregatov dernovo-podzolistoj pochvy (mikrotomograficheskij analiz) (Influence of repeated freezing-thawing on the microstructure of sod-podzolic soil aggregates (microtomographic analysis)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 187–196.
8. Urusevskaya I.S., Meshalkina Y.L., Khokhlova O.C., Geografo-geneticheskie osobennosti gumusnogo sostojanija seryh lesnyh pochv (Geographic and genetic features of the humus state of gray forest soils), *Pochvovedenie*, 2000, No. 11, pp. 1377–1390.
9. Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: a review, *Geoderma*, 2005, Vol. 124, No. 1–2, pp. 3–22.

10. Chiles J.P., Delfiner P., *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*, John Wiley, 1999, 695 p., DOI: [10.1002/9780470316993](https://doi.org/10.1002/9780470316993).
11. Fomin D. et al., Energy-based indicators of soil structure by automatic dry sieving, *Soil and Tillage Research*, 2021, Vol. 214, pp. 105183.
12. Fomin D.S. et al., Soil pore structure dynamics under steady-state wetting-drying cycle, *Geoderma*, 2023, Vol. 432, pp. 116401.
13. Gerke K.M., Karsanina M.V., How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: Pore-scale modelling and stationarity analysis, *European Journal of Soil Science*, 2021, Vol. 72, No. 2, pp. 527–545.
14. Guo Y. et al., Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure, *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 703, pp. 134617.
15. Liang A. et al., Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis, *Soil and Tillage Research*, 2019, Vol. 185, pp. 94–101.
16. Lucas M. et al., Soil structure formation along an agricultural chronosequence, *Geoderma*, 2019, Vol. 350, pp. 61–72.
17. Luo L., Lin H., Li S., Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography, *Journal of Hydrology*, Vol. 393, Iss. 1–2, pp. 53–64.
18. Menon M. et al., Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability, *Geoderma*, 2020, Vol. 366, pp. 114259.
19. Mooney S.J., Young I.M., Heck R.J., Peth S. (Eds.), *X-ray Imaging of the Soil Porous Architecture*, Springer Nature, 2022, 229 p.
20. Mulla D.J., McBratney A.B., Soil spatial variability, In: *Soil physics companion*, Boca Raton: CRC Press, 2001, pp. 343–77.
21. Pachepsky Y., Hill R.L., Scale and scaling in soils, *Geoderma*, 2017, Vol. 287, pp. 4–30.
22. Papadopoulos A. et al., Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography, *European Journal of Soil Science*, 2009, Vol. 60, No. 3, pp. 360–368.
23. Pennock D., Yates T., Braidek J., Soil sampling designs, *Soil sampling and methods of analysis*, 2008, Vol. 2, pp. 25–37.
24. Piorr H.P., Environmental policy, agri-environmental indicators and landscape indicators, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, Vol. 98, No. 1–3, pp. 17–33.
25. Prim R.J., Kaplan D.T., Horton N.J., The mosaic package: helping students to “think with data” using R, *R Journal*, 2017, Vol. 9, No. 1, pp. 77.

26. Rab M.A., Haling R.E., Aarons S.R., Hannah M., Young I.M., Gibson D., Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils, *Geoderma*, 2014, Vol. 213, pp. 460–470.
27. Rabot E. et al., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137.
28. Reynolds W.D. et al., Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, No. 3–4, pp. 252–263.
29. Robinson D., broom: *And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames* //arXiv preprint arXiv:1412.3565, 2014.
30. Royston J., A remark on algorithm AS-181-The W test for normality (Algorithm R94), *J Appl Stat.*, 1995, Vol. 44, No. 4, pp. 547–551.
31. Vogel H.J. et al., Quantitative evaluation of soil functions: Potential and state, *Frontiers in Environmental Science*, 2019, pp. 164.
32. Wickham H., Chang W., Wickham M.H., Package ‘ggplot2’, Create elegant data visualisations using the grammar of graphics, *Version*, 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 1–189.
33. Wilding L.P., Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys, In: *Soil Spatial Variability* D.R. Nielsen, J. Bouma (Eds.), Pudoc, Wageningen, 1985, pp. 166–194.
34. Yudina A.V. et al., Micro-within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability, *Geoderma*, 2022, Vol. 415, pp. 115771.
35. Yudina A., Kuzyakov Y., Saving the face of soil aggregates, *Global change biology*, 2019, Vol. 25, No. 11, pp. 3574–3577.
36. Yudina A.V. et al., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian soil science*, 2018, Vol. 51, pp. 1326–1347.
37. Zhao Y., Hu X., Li X., Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography, *Catena*, 2020, Vol. 193, pp. 104622.
38. Zhao D. et al., Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography, *Soil and Tillage Research*, 2017, Vol. 165, pp. 239–246.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Исходные данные

Повторность	NOP	LT	Pt
1	35.34732	0.461487	31.83155
2	16.49299	0.18891	32.1104
3	70.23075	0.311226	28.96115
4	48.0025	0.888957	36.19992
5	62.38746	0.515515	31.97288
6	73.49665	0.224321	26.60423
7	37.39783	0.298239	22.01071
8	42.79712	0.214597	25.39324
9	72.67089	0.29925	23.46264
10	30.69543	0.399024	30.84838
11	71.79816	0.280292	20.1869
12	58.00355	0.460414	24.69886
13	31.7377	0.273979	32.49419
14	51.6884	0.49043	24.57977
15	41.07253	0.506368	23.39107