УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222



Ссылки для цитирования:

Плотникова О.О., Романис Т.В., Куст П.Г. Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 199-222. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222

Cite this article as:

Plotnikova O.O., Romanis T.V., Kust P.G., Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 104, pp. 199-222, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-199-222

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке гранта Президиума РАН "Теоретические и экспериментальные исследования для эффективного научно-технического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации".

Acknowledgments:

The research was supported by a grant from the Presidium of the Russian Academy of Sciences "Theoretical and experimental studies for the effective scientific and technical development of the agro-industrial complex of the Russian Federation".

Сравнение методов цифрового анализа изображений для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах

© 2020 г. О. О. Плотникова^{1,2*,} Т. В. Романис^{1**}, П. Г. Куст^{1***}

¹ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2, *<u>https://orcid.org/0000-0002-7719-2915</u>, e-mail: <u>mrs.plotnikova@mail.ru</u>, **<u>https://orcid.org/0000-0003-3846-5324</u>, e-mail: <u>romanis.tatyana@yandex.ru</u>, ****<u>https://orcid.org/0000-0003-4476-9017</u>, e-mail: <u>pavelkust@yandex.ru</u>. ²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

MI у им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Поступила в редакцию 09.06.2020, после доработки 23.10.2020, принята к публикации 11.11.2020

Резюме: Работа посвящена исследованию применимости методов полуавтоматической сегментации микрофотографий для морфометрической характеристики почвенных агрегатов в шлифах из насыпных образцов. Объект исследования – чернозем типичный пахотный (Курская область). Агрегаты были выделены методом мокрого просеивания из насыпного образца верхних 10 см пахотного горизонта после размыва модельным мелководным потоком на большом эрозионном лотке. Из агрегатов, свободно рассыпанных на стекло и закрепленных полиэфирной смолой, были изготовлены шлифы, обработка снимков которых проводилась двумя сравниваемыми способами: Adobe Photoshop + CTan и Thixomet Pro. Большое количество срезов нативных агрегатов под разными углами в среднем сечении позволяет статистически оценить форму агрегатов. Получены данные по морфометрическим показателям агрегатов: фактор формы, степень округлости и коэффициент изрезанности поверхности агрегатов. Оценка сходимости результатов, полученных способом Photoshop + CTan тремя исследователями, проводилась путем сравнения выборок по t-критерию Стьюдента и U-критерию Манна – Уитни. Оценка сходимости усредненных результатов, полученных способом Photoshop + CTan, и результатов, полученных с использованием Thixomet Pro, проводилась по U-критерию Манна – Уитни. Значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученных с помощью сочетания программ Adobe Photoshop и CTan разными исследователями, не обнаружено. Значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученными сравниваемыми способами, не обнаружено. Можно заключить, что достоверность определения морфометрических параметров почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro соизмерима с достоверностью результатов при работе со снимками шлифов в СТап после бинаризации в Adobe Photoshop. Способ получения данных о морфометрических параметрах почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro полностью исключает возможность субъективной ошибки, показывает высокую степень автоматизации, воспроизводимости и достоверности полученных результатов и является более быстрым.

Ключевые слова: бинаризация снимков, морфометрия агрегатов, чернозем, СТап, Thixomet Pro.

Comparison of digital image analysis methods for morphometric characterization of soil aggregates in thin sections

O. O. Plotnikova^{1,2*}, T. V. Romanis^{1**}, P. G. Kust^{1***}

¹Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation, *<u>https://orcid.org/0000-0002-7719-2915</u>, e-mail: <u>mrs.plotnikova@mail.ru</u>, **<u>https://orcid.org/0000-0003-3846-5324</u>, e-mail: <u>romanis.tatyana@yandex.ru</u>, ***<u>https://orcid.org/0000-0003-4476-9017</u>, e-mail: <u>pavelkust@yandex.ru</u>.

²Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation. Received 09.06.2020, Revised 23.10.2020, Accepted 11.11.2020

Abstract: The purpose of this study was to investigate the applicability of semiautomatic segmentation methods for obtaining and evaluating morphometric parameters of soil aggregates in artificially prepared loose samples in soil thin sections. The object of the research is typical arable Chernozem. The aggregates were separated by wet sieving method from loose sample of upper 10 cm of the plowing horizon after erosion by a model shallow water flow on a large erosion tray. The aggregates, loosely scattered on the glass and fixed with polyester resin, were used to produce the thin sections. Images of the thin sections were taken under a polarizing microscope and then were processed using two methods compared: Adobe Photoshop + CTan and Thixomet Pro. Data on morphometric parameters of aggregates were obtained: the shape factor, the degree of roundness and the coefficient of aggregate surface roughness. The convergence of the results obtained using Photoshop + CTan by three researchers was evaluated by comparing samples using the Student's test and the Mann-Whitney test. The convergence of the averaged results obtained using Photoshop + CTan and the results obtained using Thixomet Pro was evaluated using the Mann-Whitney test. No significant differences were found between the parameters of the same aggregates obtained using a combination of Adobe Photoshop and CTan programs by different researchers. No significant differences were found between the parameters of the same aggregates obtained by the compared methods. So, one can conclude that the reliability of determining the morphometric parameters of soil aggregates using Thixomet Pro is comparable to the reliability of results when working with images of sections

in CTan after binarization in Adobe Photoshop. The method of obtaining data on morphometric parameters of soil aggregates using Thixomet Pro completely eliminates the possibility of subjective error, shows a high degree of automation, reproducibility and reliability of the results obtained, and is faster.

Keywords: image binarization, morphometry of aggregates, Chernozem, CTan, Thixomet Pro.

введение

Морфометрические исследования в почвоведении имеют длительную историю развития. Морфометрия элементов микростроения почв как направление микроморфологии была исключительно "ручным" методом, а потому крайне трудоемким и имеющим ограниченное распространение (Польский, 1955; Феофарова, 1956; Kubiena, 1967). Затем для микроморфометрического анализа стали использовать фотометры (Geyger, Beckmann, 1967), автоматический анализатор негативов и фотографий (Афанасьев и др., 1972), различные отечественные и зарубежные анализаторы типа ТАСИ, Протва, микровидеомат, эпиквант, квантимет (Jongerius et al., 1972; Турсина и др., 1985; Dorronsoro, 1988). В 1990 г. в США был проведен первый симпозиум по использованию анализа изображения в почвоведении, по результатам которого был опубликован специальный выпуск журнала Geoderma (Mermut, Norton, 1992). В последующие годы получены морфометрические данные для отдельных элементов микростроения почв. Чаще всего математически оценивают поровое пространство: это и выделение арпорового пространства дерново-подзолистых хетипов почв (Skvortsova, Rozhkov, 2011), и оценка интенсивности педогенеза по степени развития порового пространства (Bryk, 2016), и количественное определение параметров биогенных пор и ориентированной глины (кутан) для прогнозирования изменения структуры почв (Sauzet et al., 2017).

Несмотря на обширное количество работ по морфометрической оценке отдельных микроморфологических характеристик, проведение комплексного количественного анализа элементов микростроения в шлифах до настоящего времени остается трудои времязатратным и является актуальным развивающимся направ-

лением современной микроморфологии (<u>Stoops, 2018</u>). Применение цифровых методов для анализа снимков шлифов почвенных агрегатов перспективно в рамках изучения влияния факторов почвообразования на структурное состояние почвы (<u>San José Martínez</u> et al., 2015), связи между цветом почвы и ее свойствами (<u>Savin et</u> al., 2016), влияния эрозионных процессов на состояние агрегатов почвы (<u>Плотникова и др., 2019</u>). Получаемые этим способом комплексные количественные данные могут быть использованы для оценки интенсивности и направления педогенеза в результате воздействия абиотических и биотических факторов. Одной из составляющих подобных комплексных данных являются морфометрические характеристики агрегатов, для которых требуется разработка методов быстрой и достоверной диагностики.

В случае анализа снимков природных объектов необходимо комбинировать несколько различных программ в одном исследовании для достижения достоверных результатов. Это связано с неравномерным распределением света на объемных объектах, градиентом цвета (изменение тона и/или насыщенности) природного объекта и математическими алгоритмами обработки полученных изображений (Marcelino et al., 2007). В зависимости от целей конкретного исследования авторы используют как свободно распространяемое программное обеспечение для цифрового анализа изображений, например, ImageJ (Wang et al., 2017), так и более узко специализированное, как CTan и Image-Pro Plus (Gorbov et al., 2016; Zhao et al., 2019); редко используются трудоемкие для анализа растровые одноканальные изображения ГИС (Asmussen et al., 2015). Сегментация (процесс выделения на изображении интересующих объектов) и последующая математическая обработка обязательные этапы морфометрического анализа снимков. Специалисты в области анализа цифровых изображений ежегодно разрабатывают новые алгоритмы и модели сегментации (Angulo et al., 2020; Takashimizu, Iiyoshi, 2016). Методы сегментации успешно реализуются в области картографии почв (Королюк, 2012; Симакова, 2014), точного земледелия (Pusdá-Chulde et al., 2020), генетического почвоведения (<u>Чжуан и др., 2019</u>), физики почв (<u>Ivanov</u> <u>et al., 2019</u>) и механики грунтов (<u>Rodríguez et al., 2013</u>).

Цель настоящего исследования - проверить, насколько при-

менимо программное обеспечение СТап для получения данных о морфометрических параметрах почвенных агрегатов. Кроме того, необходимо было оценить достоверность и сходимость результатов измерения морфометрических параметров, получаемых с помощью нового, ранее не использованного в почвоведении программного обеспечения Thixomet Pro в сравнении с уже хорошо себя зарекомендовавшим СТап.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования были выбраны агрегаты чернозема типичного пахотного (Опытное хозяйство ВНИИЗиЗПЭ структурного подразделения ФГБНУ "Курский Федеральный Аграрный Центр", Курская область, координаты разреза 51°32'36.35" с. ш., 36°6'35.54" в. д.). Название почвы по Классификации и диагностике почв СССР – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках глубокопахотный несмытый (Классификация, 1977), по WRB – Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic) (World Reference..., 2015). Агрегаты были выделены методом мокрого просеивания (Вадюнина, Корчагина, 1986) из насыпного образца верхних 10 см пахотного горизонта (PU по Полевому определителю, 2008) после размыва модельным мелководным потоком со скоростью 0.41 м/с на большом эрозионном лотке. Для исследования выбрали фракцию 1–2 мм (средневзвешенный диаметр d 1.84 мм).

Шлифы. Из агрегатов фракции, свободно рассыпанных на стекло и закрепленных полиэфирной смолой, М.А. Лебедевым были изготовлены шлифы. В процессе изготовления шлифов получены срезы агрегатов толщиной 25–30 мкм. Дальнейший анализ проведен для срезов агрегатов. В анализ включались те проекции (срезы) агрегатов на плоскости, максимальное сечение которых превышало 1 000 мкм. Большое количество срезов нативных агрегатов под разными углами в среднем сечении позволяет статистически оценить форму агрегатов (Скворцова, 1999; Плотникова и др., 2019). Изготовление и съемку шлифов проводили с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Функции и свойства почв и почвенного покрова" Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Фотосъемка. Для каждого способа сегментации съемку одних и тех же шлифов фракции агрегатов почв 1–2 мм проводили отдельно. Фотографии шлифов получены на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26. На матрицу фотоаппарата подавалось изображение с 40-кратным увеличением, при этом в оптической схеме применялся объектив UIS 2 UPlanFL N 4x/0.13 ∞ /-/FN26.5 UPLFLN с оптическим разрешением 2.5 мкм.

Для первого способа (Adobe Photoshop + CTan) шлифы снимали в проходящем поляризованном свете без анализатора и без поворота вокруг оси микроскопа (то есть без выявления оптических осей зерен минералов) (рис. 1а). Для второго способа (Thixomet Pro) выполняли съемку каждого поля зрения в проходящем поляризованном свете без анализатора и с анализатором (при повороте объекта съемки вокруг оси микроскопа на 30°) (Скворцов и др., 1989). Поскольку минералы в почве зачастую анизотропны – обладают свойством двойного лучепреломления (Соболев, 1990), - то проходящий через их кристаллы поляризованный свет может быть как полностью поглощен анализатором при совпадении оси индикатрисы кристалла с направлением световых колебаний в поляризаторе, так и пропущен анализатором при отклонении направления световых колебаний кристаллом. В первом случае кристалл полностью погасает и выглядит темным (черным). Это приводит к совпадению его цветовых характеристик с изотропными (не имеющими двойного лучепреломления), а потому тоже темными составляющими почвы в шлифе (изотропного внутриагрегатного вещества и эпоксидной смолы, которая является отвердителем при изготовлении шлифов и заполняет поровое пространство). В связи с этим на получаемом единичном микрофотоснимке невозможно автоматически разделить три вида темных пикселей: поровое пространство; изотропное тонкодисперсное вещество основной почвенной массы; погасший кристалл. Поэтому необходим поворот шлифа для визуализации на границах агрегатов погасших анизотропных зерен минералов. Поворот шлифа приводит к несовпадению световых колебаний в анализаторе и зернах минералов, погасшие зерна светлеют, и становится возможным их выявление на фоне остальных объектов изображения (рис. 2).

Морфометрические параметры. Получены данные по следующим морфометрическим показателям срезов исследуемых агрегатов: фактор формы (FF), степень изометричности (Rdn) и коэффициент изрезанности поверхности агрегатов (U). Формулы расчета этих показателей:

$$FF = \frac{4\pi A}{Pm^2},$$
где A – площадь объекта, мм², Pm – периметр объекта, мм; Rdn = $\frac{4A}{\pi d_{max}^2}$,

где А – площадь объекта, мм², d_{max} – максимальный диаметр объекта, мм;

$$U=\frac{L}{\pi D^*},$$

где L – длина линии, ограничивающей объект, мм, D* – диаметр круга с площадью, эквивалентной площади объекта, мм (Amada et al., 2002).

Подготовка снимков и математическая обработка. Первый вариант получения морфометрических параметров агрегатов заключается в последовательном применении программ Adobe Photoshop CS5 и CTan. Для математической обработки в программе CTan (Bruker CTAn v.1.18 Micro-CT Software) снимки необходимо было предварительно бинаризовать с выделением границ объектов. Бинаризация – частный случай сегментации – получение двухцветного изображения из многоцветного (Тропченко и др., 2015). Возможности программы СТап позволяют выполнять бинаризацию снимков. Использовали инструменты CTan -Treshholding, Filtering, Despeckle – как по отдельности, так и в различных комбинациях. Однако в случае со снимками шлифов процедуры бинаризации в CTan показали низкую эффективность: 1) агрегаты не отделяются от артефактов, следовательно, увеличивается число объектов математической обработки (рис. 1б, красный контур); 2) внутренняя структура агрегатов распознается как пористость, еще больше увеличивая число объектов (рис. 16, зеленый контур); 3) агрегаты, соприкасающиеся с границами снимка, также распознаются как объекты внимания и проходят дальнейшую математическую обработку, искажая результаты исследова-

ния. Кроме того, неправильное распознавание границ агрегатов на снимках приводит к увеличению их коэффициента изрезанности поверхности, а также к "слипанию" агрегатов и в дальнейшем обработке их программой как одного объекта, а не нескольких (рис. 1б, синий контур).

Таким образом, было принято решение бинаризовать снимки для обработки в СТап полуавтоматическим способом в программе Adobe Photoshop CS5 с помощью инструмента Magnetic Lasso. Параметры инструмента: растушевка – 0 пикс., сглаживание – да, ширина – 5 пикс., контрастность – 100%, частота – 57 (без уточнения краев). Этим способом бинаризовали один и тот же набор снимков три разных исследователя независимо друг от друга для последующей оценки применимости данного способа сегментации с целью получения морфометрических параметров срезов почвенных агрегатов (рис. 1в). Бинаризованные в Photoshop снимки затем обрабатывали с помощью ПО (программного обеспечения) СТап.



Рис. 1. Примеры предварительной сегментации снимка почвенного шлифа из агрегатов чернозема типичного Курской области: **a** – исходный снимок (IIN); **б** – снимок после обработки инструментами CTan; **в** – снимок после сегментации в Adobe Photoshop.

Fig. 1. Examples of pre-segmentation of an image of a soil thin section from aggregates of a typical Chernozem of the Kursk region: \mathbf{a} – initial image (IIN); $\mathbf{\delta}$ – image after processing with CTan tools; \mathbf{B} – image after segmentation in Adobe Photoshop.

Второй способ обработки – полуавтоматическая сегментация и математическая обработка в ПО Thixomet Pro, модуль "Агрегаты". При работе с модулем "Агрегаты" ПО Thixomet Pro из

снимков одного и того же поля зрения создается одно целое многослойное изображение (рис. 2), которое затем сегментируется с помощью выделения диапазонов яркости пикселей.

Три снимка одного поля зрения необходимы для точного распознавания программой границ агрегатов, поскольку на снимке в проходящем свете цвет минеральных зерен на границах может совпадать с цветом пор. Также можно выделять диапазоны тона и насыщенности пикселей.

В нашем исследовании экспериментально было установлено, что эффективнее использовать полуавтоматическую процедуру алгоритм программного обеспечения Thixomet Pro, в которой реализован следующий алгоритм (<u>Russ, 2007</u>):

1. Пороговая бинаризация в цветовом пространстве HSL изображений с разным поворотом предметного столика. Порог выставляется экспертом, исходя из цветовых характеристик (зависят от толщины и чистоты) каждого отдельного шлифа.

2. Из серии бинарных изображений, полученных на шаге 1, формируется итоговое бинарное изображение с применением логического оператора OR с учетом изменения цвета отдельных элементов микростроения. Например, один и тот же пиксель на предполагаемой границе агрегата, имеющий светлую окраску на изображении, полученном в поляризованном свете без анализатора (рис. 2а), отнесен к классу "пора"; тот же пиксель темного цвета на изображении в поляризованном свете с анализатором (рис. 2б) отнесен к классу "пора"; тот же пиксель светлого цвета на изображении в поляризованном свете с анализатором ображении в поляризованном свете с анализатором и поворотом предметного столика на 30° (рис. 2в) отнесен к классу "зерно минерала". При таком наборе характеристик пиксель присоединяется к общему ареалу прилегающего агрегата.

3. Последовательное применение морфологических операторов "закрытие" и "раскрытие" с маской в виде круга. Количество итераций применения операторов и размер маски задается экспертом.

4. Заполнение в объектах несплошностей меньше заданного экспертом размера.



Рис. 2. Пример полуавтоматической сегментации снимка почвенного шлифа из агрегатов чернозема типичного с помощью программы Thixomet Pro. **a**, **б**, **в** – снимки, выполненные на поляризационном микроскопе Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26: **a** – снимок в проходящем свете; **б** – снимок в поляризованном свете; **в** – снимок в поляризованном свете с поворотом предметного столика на 30° ; **г** – итоговое изображение, полученное после сведения слоев и обработки в программе Thixomet Pro.

Fig. 2. Example of semi-automatic segmentation of a soil thin section image from typical Chernozem aggregates using the Thixomet Pro software. **a**, **6**, **B** – images taken on an Olympus BX51 polarizing microscope with an Olympus DP26 digital camera: **a** – image in transmitted light; **6** – image in polarized light; **B** – image in polarized light with the subject table rotated by 30°; **r** – the final image obtained after merging layers and processing in Thixomet Pro.

5. Разделение слипшихся агрегатов:

5.1. Построение евклидовой карты расстояний (EDM).

5.2. Бинаризация EDM с использованием алгоритма водораздела (watershed).

5.3. Применение логического оператора AND к изображениям, полученным на этапе 3. Легитимность разделения агрегатов определяется экспертом, прежде всего, по характеристике границы агрегатов (<u>Stoops, 2003</u>).

6. Удаление объектов меньше заданного экспертом размера.

После сегментации проводили анализ изображения для получения морфометрических параметров срезов агрегатов. Как можно видеть на рисунке 2г, особенностью программы Thixomet Pro является то, что при сегментации для математической обработки отбираются только те объекты, которые не соприкасаются с границами изображения. Кроме того, программа Thixomet Pro в отличие от СТап позволяет устанавливать как нижнюю, так и верхнюю границы размеров объектов, параметры которых рассчитываются после сегментации. На рисунке 2г цветом выделены агрегаты, чей минимальный диаметр с учетом масштаба съемки попадает в исследуемую фракцию 1–2 мм.

При оценке сходимости результатов, получаемых разными исследователями с помощью метода Adobe Photoshop + CTan, сравнение выборок по FF и Rdn проводилось попарно по t-критерию Стьюдента, поскольку данные по этим показателям имели нормальное распределение. Распределение данных по U отличалось от нормального, поэтому сравнение выборок по этому показателю проводилось по U-критерию Манна – Уитни (Дмитриев, 2009).

Оценка применимости двух описанных методов сегментации изображений проводилась на основе статистического анализа выборок данных, полученных этими методами. Сравнение выборок данных проводилось для параметров FF, Rdn и U по Uкритерию Манна – Уитни. Уровень значимости α принимался для всех сравнений равным 0.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные морфометрические параметры изученных агрегатов, выделенных на изображениях способом полуавтоматической бинаризации в Photoshop с последующей обработкой в СТап, приведены в таблице 1 (Supplementary files). Основные статистические параметры выборок сравниваемых морфометрических показателей исследованных нами агрегатов и результаты сравнения выборок морфометрических параметров, полученных путем сегментации изображений в Adobe Photoshop тремя исследователями с последующей обработкой бинарных снимков в СТап, приведены в таблицах 1 и 2. Цифрами 1, 2, 3 обозначены выборки трех разных исследователей, сегментировавших снимки.

Уровни значимости различий по выборкам морфометрических показателей почвенных агрегатов, полученным тремя разными исследователями, ни в одном случае не оказались меньше принятого в исследовании уровня *α*, равного 0.01 (табл. 2).

Таким образом, значимых различий между параметрами одних и тех же агрегатов, полученных с помощью сочетания программ Adobe Photoshop и CTan разными исследователями, не обнаружено. Это означает, что описанный метод получения морфометрических параметров срезов агрегатов устойчив к возможному влиянию личности эксперта, выполняющего исследование (отсутствует субъективная погрешность). Сходные результаты получены в различных исследованиях при прямом измерении площади объектов на изображении с использованием непосредственно инструмента Magnetic Lasso программы Adobe Photoshop (Li et al., 2012; Wang et al., 2015). Однако нужно отметить, что при исследовании морфометрии агрегатов недостаточно только информации об их площади, а сложные расчеты в программе Adobe Photoshop выполнить нельзя. Эта программа позволяет выполнить только полуавтоматическую бинаризацию снимков для дальнейшей обработки другими средствами, что делает данный метод достаточно трудоемким. В то же время Thixomet Pro позволяет выполнять и сегментацию снимков, и исследование морфометрических параметров объектов в одной программной среде.

Таблица 1. Описательные статистики по выборкам морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного (фракция 1–2 мм), полученным тремя исследователями путем бинаризации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CTan

Table 1. Descriptive statistics on samples of morphometric parameters of typical Chernozem aggregates (1-2 mm fraction) obtained by three researchers by image segmentation in Adobe Photoshop with subsequent processing in CTan

	Mean	Med	Min	Max	Var	Std. Dev.	Valid N
FF1	0.583	0.595	0.250	0.780	0.013	0.113	
FF2	0.529	0.550	0.230	0.750	0.014	0.117	
FF3	0.525	0.515	0.320	0.760	0.013	0.116	
Rdn1	0.601	0.600	0.322	0.850	0.015	0.123	
Rdn2	0.594	0.597	0.324	0.831	0.015	0.122	32
Rdn3	0.598	0.595	0.324	0.855	0.015	0.123	
U1	1.331	1.301	1.135	1.985	0.026	0.161	
U2	1.406	1.349	1.158	2.094	0.036	0.189	
U3	1.404	1.393	1.146	1.772	0.026	0.161	

Примечание. FF – фактор формы, Rdn – степень изометричности, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов, 1, 2, 3 – номера исследователей, выполнявших бинаризацию и обработку снимков, Mean – среднее значение, Med –медиана, Min – наименьшее значение, Max – наибольшее значение, Var – дисперсия выборки, Std. Dev. – стандартное отклонение, Valid N – количество измерений в выборке.

Для исследования различий между методами Adobe Photoshop + CTan и "Агрегаты" Thixomet Pro были сформированы выборки морфометрических параметров срезов агрегатов, которые попали на обе серии снимков. Таким образом, из-за необходимости поворота столика при съемке для Thixomet Pro сравниваемые выборки уменьшились относительно метода Adobe Photoshop + CTan. Однако использование методов непараметрической статистики позволяет избежать ошибок, связанных с небольшим объемом сравниваемых выборок. Кроме того, для исключения влияния личности эксперта при сравнении двух методов выборка по мето-

ду Adobe Photoshop + СТап формировалась из средних значений морфометрических параметров, полученных тремя исследователями. Выборки исходных морфометрических параметров изученных срезов агрегатов, выделенных на изображениях сравниваемыми способами, приведены в таблице 2 (Supplementary files). Описательные статистики выборок данных, полученных с помощью программ СТап и Thixomet Pro, представлены в таблице 3.

Таблица 2. Уровни значимости различий при попарном сравнении морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного, полученных тремя исследователями путем сегментации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в CTan

Table 2. Levels of significance of differences in pairwise comparison of morphometric parameters of typical Chernozem aggregates obtained by three researchers by segmentation of images in Adobe Photoshop with subsequent processing in CTan

	1–2	1–3	2–3
FF	0.066	0.050	0.906
Rdn	0.821	0.939	0.880
U	0.047	0.038	0.824

Примечание. FF – фактор формы, Rdn – степень округлости, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов.

Уровни значимости различий при сравнении морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного, полученных методами сегментации изображений в Adobe Photoshop с последующей обработкой в СТап и обработки изображений ПО Thixomet Pro (модуль "Aгрегаты") составили: для FF – 0.189, для Rdn – 0.912, для U – 0.091 (табл. 3). Поскольку во всех случаях руровень значимости различий оказался больше α , можно заключить, что достоверность определения морфометрических параметров почвенных агрегатов с помощью ПО Thixomet Pro так же высока, как и при определении с помощью СТап после бинаризации в Adobe Photoshop. Однако Thixomet Pro представляется более удобной программой, поскольку совмещает в себе возможности поворота и наложения слоев изображения с последующей матема-

тической обработкой, что делает весь процесс получения данных значительно менее трудоемким при сопоставимо высокой точности.

Таблица 3. Описательные статистики по выборкам морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного (фракция 1–2 мм), полученным двумя способами, и уровни значимости различий средних этих выборок

Table 3. Descriptive statistics on samples of morphometric indicators of typical Chernozem aggregates (fraction 1-2 mm) obtained in two ways, and the significance levels of differences in the average of these samples

Пара- метр	Mean	Med	Min	Max	Var	Std.Dev.	Valid N	
CTan								
FF	0.544	0.555	0.267	0.763	0.015	0.123		
Rdn	0.602	0.595	0.470	0.766	0.008	0.088	18	
U	1.389	1.345	1.146	1.950	0.037	0.192		
Thixomet Pro								
FF	0.493	0.515	0.230	0.710	0.013	0.115		
Rdn	0.604	0.595	0.460	0.770	0.007	0.086	18	
U	1.512	1.435	1.180	2.200	0.063	0.251		
p-value								
FF	0.189							
Rdn	0.912						18	
U	0.091							

Примечание. Mean – среднее значение, Med – медиана, Min – наименьшее значение, Max – наибольшее значение, Var – дисперсия выборки, Std. Dev. – стандартное отклонение, Valid N – количество измерений в выборке, FF – фактор формы, Rdn – степень изометричности, U – коэффициент изрезанности поверхности агрегатов.

Можно утверждать, что оба сравниваемых метода сегментации микроморфологических снимков дают высокие результаты. Однако ПО Thixomet Pro обеспечивает бо́льшую скорость обработки снимков и получения морфометрической информации за

счет сокращения числа подготовительных операций, требующих тщательного визуального контроля со стороны исследователя. Таким образом, для получения уверенных выводов о форме почвенных агрегатов целесообразнее применение ПО Thixomet Pro, позволяющего оценивать большее количество срезов агрегатов, нежели способ Adobe Photoshop + CTan.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного нами исследования установлено, что:

1. Способ получения данных о морфометрических параметрах срезов почвенных агрегатов, включающий бинаризацию микроморфологических снимков шлифов в Adobe Photoshop с последующей обработкой в СТап является устойчивым к возникновению субъективной погрешности.

2. Способ получения данных о морфометрических параметрах срезов почвенных агрегатов с помощью Thixomet Pro дает результат, сопоставимый с результатами по CTan, позволяя сравнивать их и объединять в одну выборку. При этом использование Thixomet Pro позволяет учесть большее количество входных данных, что полностью исключает возможность субъективной ошибки.

3. Thixomet Pro показывает высокую степень автоматизации, воспроизводимости и достоверности полученных результатов и является намного более производительным, и, следовательно, более эффективным. Использование Thixomet Pro решает вопросы выделения и расчета морфометрических параметров агрегатов в комплексном анализе микросложения почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 1986. 416 с.

2. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Книжный дом Либроком, 2009. 327 с.

3. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.

4. Королюк Т.В. Почвенная интерпретация космических изображений в системе методов ЦПК // В кн. Цифровая почвенная картография: теоре-

тичсекие и экспериментальные исследования. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. 2012. С. 125–140.

5. Плотникова О.О., Лебедева М.П., Демидов В.В., Карпова Д.В. Сравнение микроморфометрических показателей агрегатов несмытого и среднесмытого пахотного чернозема типичного в лабораторном эрозионном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1225–1233. DOI: 10.1134/S0032180X19100095.

6. *Польский М.Н.* О некоторых новых путях изучения порозности и структуры почвы // Почвоведение. 1955. № 5. С. 29–43.

7. Симакова М.С. От визуального дешифрирования аэрофотоснимков и полевого картографирования почв до автоматизированного дешифрирования и картографирования по космическим снимкам // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2014. № 74. С. 3–19. DOI: 10.19047/0136-1694-2014-74-3-19.

8. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков В.А., Федин Л.А. Микроскопы. Л.: Изд-во "Машиностроение", 1989. 512 с.

9. Скворцова Е.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенноизмененных почв: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук.: 03.00.27. М., 1999. 44 с.

10. Соболев Р.Н. Методы оптического исследования минералов. М.: Недра, 1990. 288 с.

11. Тропченко А.А., Тропченко А.Ю. Методы вторичной обработки и распознавания изображений. СПб: Университет ИТМО, 2015. 215 с.

12. *Турсина Т.В., Скворцова Е.Б., Кулинская Е.В., Грачева М.В.* Микроморфометрический анализ пористости почв // Почвоведение. 1985. № 4. С. 60–69.

13. Феофарова И.И. Микроморфологическая характеристика такыров // Такыры Западной Туркмении и пути их сельскохозяйственного освоения. М., 1956. С. 351–380.

14. *Чжуан Я., Хартеминк А.Е., Хуан Ц.* Количественная характеристика фракций крупнозема из почвенных образцов с использованием цифровых фотоснимков // Почвоведение. 2019. № 8. С. 956–965. DOI: 10.1134/S0032180X19080173.

15. *Amada S., Imagawa K., Aoki S.* Splat Profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 154. P. 27–33. DOI: <u>10.1016/S0257-8972(01)01517-1</u>.

16. *Angulo K., Gil D., Espitia H.* Method for Edges Detection in Digital Images Through the Use of Cellular Automata // Advances in Intelligent Systems and Computing book series. 2020. Vol. 1078. P. 3–21. DOI: <u>10.1007/978-3-030-33614-1_1</u>.

17. Asmussen P., Conrad O., Günther A., Kirsch M., Riller U. Semi-automatic segmentation of petrographic thin section images using a "seeded-region growing algorithm" with an application to characterize wheathered subarkose sandstone // Computers & Geosciences. 2015. Vol. 83. P. 89–99. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.05.001.

18. *Bryk M*. Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis // Geoderma. 2016. Vol. 263. P. 86–103. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.09.014.

19. *Dorronsoro C*. Micromorphometria de suelos. Aplicaciones // An. Edafol. Y agrobiol. 1988. Vol. 47. No. 1–2. P. 503–530.

20. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S., Morozov I.V. Physical Properties of soils in Rostov agglomeration // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49. P. 898–907. DOI: 10.1134/S106422931606003X.

21. *Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B.* Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural-functional assessment of pore space // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 1. P. 50–57. DOI:

10.1134/S106422931901006X.

22. Jongerius A., Schoonderbeek D., Jager A., Kowalinski St. Electro-optical soil porosity investigation by means of Quantimet-B equipment // Geoderma. 1972. Vol. 7. P. 177–198.

23. *Kubiena W.* (Ed.). Die micromorphmetrishe Bodenanalyse. Stuttgart. 1967. 196 p.

24. Li P-N., Li H., Wu M-L., Wang S-Y., Kong Q-Y., Zhang Z., Sun Y., Liu J., Lv D-C. A Cost-Effective Transparency-Based Digital Imaging for Efficient and Accurate Wound Area Measurement // PLoS ONE. 2012. Vol. 7. Iss. 5. e38069. DOI: 10.1371/journal.pone.0038069.

25. *Marcelino V., Cnudde V., Vansteelandt S., Carò F.* An evaluation of 2Dimage analysis techniques for measuring soil microporosity // European Journal of Soil Science. 2007. Vol. 58. P. 133–140. DOI: <u>10.1111/j.1365-</u> <u>2389.2006.00819.x</u>.

26. *Mermut A.R., Norton L.D.* Preface // Geoderma. Vol. 53. Iss. 3–4. P. iii–iv. DOI: <u>10.1016/0016-7061(92)90053-A</u>.

27. Pusdá-Chulde M.R., Salazar-Fierro F.A., Sandoval-Pillajo L., Herrera-Granda E.P., García-Santillán I.D., De Giusti A. Image Analysis Based on Heterogeneous Architectures for Precision Agriculture: A Systematic Literature Review // Advances in Intelligent Systems and Computing book series. 2020. Vol. 1078. P. 51–70. DOI: <u>10.1007/978-3-030-33614-1_4</u>.

28. *Rodríguez J., Edeskär T., Knutsson S.* Particle shape quantities and measurement techniques: a review // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 18. P. 169–198.

29. *Russ J.C.* The image processing handbook (5th edition). USA, Taylor & Francis Group, LLC. 2007. 818 p.

30. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W. Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // Geoderma. 2015. Vol. 237–238. P. 36–48. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.003.

31. Savin I.Y., Prudnikova E.Y., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N. The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition // Dokuchaev Soil Bulletin. 2016. Vol. 86. P. 46–52. DOI: <u>10.19047/0136-1694-2016-86-46-52</u>.

32. Sauzet O., Cammas C., Gilliot J.M., Bajard M., Montagne D. Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections // Geoderma. 2017. Vol. 292. P. 135–148. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.004.

33. *Skvortsova E.B., Rozhkov V.A.* Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia // Eurasian Soil Science. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 1209–1221. DOI: 10.1134/S1064229311100140.

34. *Stoops G.* Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin. 2003. 184 p. DOI: 10.2136/2003.guidelinesforanalysis.

35. *Stoops G*. Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies // Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2018. P. 1–19. DOI: <u>10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2</u>.

36. *Takashimizu Y., Iiyoshi M.* New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio // Progress in Earth and Planetary Science. 2016. Vol. 3. Article No. 2. DOI: <u>10.1186/s40645-015-0078-x</u>.

37. *Wang Q., Hartemink A. E., Jiang Z., Jin N., Sun Z.* Digital soil morphometrics of crotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China // Geoderma. 2017. Vol. 301. P. 11–18. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010.

38. Working Group WRB, I. World Reference Base for Soil Resources 2014. update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.

39. Wang Z, Liang X, Wu Z, Lin J, Huang J. A novel method for measuring anterior segment area of the eye on ultrasound biomicroscopic images using

Photoshop // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. Iss. 3. e0120843. DOI: 10.1371/journal.pone.0120843.

40. *Zhao Y., Han Q., Zhao Y., Liu J.* Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images // Journal of Forestry Research. 2019. Vol. 30. P. 1043–1052. DOI: <u>10.1007/s11676-018-0725-3</u>.

REFERENCES

1. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv* (Methods for studying physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.

2. Dmitriev E.A., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical Statistics in Soil Science), Moscow: Knizhnyi dom Librokom, 2009, 327 p.

3. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and Diagnosis of Soils in the USSR), Moscow: Kolos, 1977, 221 p.

4. Korolyuk T.V., Pochvennaya interpretatsiya kosmicheskikh izobrazhenii v sisteme metodov TsPK (Soil Interpretation of Space Images in the System of CPC Methods), In: *Tsifrovaya pochvennaya kartografiya: teoretichsekie i eksperimental'nye issledovaniya* (Digital Soil Cartography: Theoretical and Experimental Studies), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2012, pp. 125–140.

5. Plotnikova O.O., Lebedeva M.P., Demidov V.V., Karpova D.V., Comparison of Micromorphometric Characteristics of Aggregates from Noneroded and Moderately Eroded Typical Chernozem in a Laboratory Experiment, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 10, pp. 1258–1265, DOI: <u>10.1134/S1064229319100090</u>.

6. Pol'skij M.N., O nekotoryh novyh putjah izuchenija poroznosti i struktury pochvy (About some new ways of studying the porosity and structure of soil), *Eurasian Soil Science*, 1955, No. 5, pp. 29–43.

7. Simakova M.S., From visual aerial photo interpretation and field soil survey to automated decoding and soil mapping by satellite imagery, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2014, Vol. 74, pp. 3–19, DOI: <u>10.19047/0136-1694-2014-74-3-19</u>.

8. Skvortsov G.E., Panov V.A., Polyakov V.A., Fedin L.A., *Mikroskopy* (Microscopes), Leningrad: Izd-vo "Mashinostroenie", 1989, 512 p.

9. Skvortsova E.B., *Stroenie porovogo prostranstva estestvennyh i antropogennoizmenennyh pochv: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Structure of Pore Space of Natural and Anthropogenic Changed Soils, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), 03.00.27, Moscow, 1999, 44 p.

10. Sobolev R.N., *Metody opticheskogo issledovanija mineralov* (Optical Mineral Research Methods), Moscow: Nedra, 1990, 288 p.

11. Tropchenko A.A., Tropchenko A.Yu., *Metody vtorichnoi obrabotki i raspoznavaniya izobrazhenii* (Methods of secondary processing and recognition of images e), Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2015, 215 p.

12. Tursina T.V., Skvortsova E.B., Kulinskaya E.V., Gracheva M.V., Mikromorfometricheskij analiz poristosti pochv (Micro-morphometric analysis of soil porosity), *Eurasian Soil Science*, 1985, No. 4, pp. 60–69.

13. Feofarova I.I., Mikromorfologicheskaja harakteristika takyrov (Micromorphological characteristics of takyrs), In: *Takyry Zapadnoj Turkmenii i puti ih sel'skohozjajstvennogo osvoenija* (Takyrs of Western Turkmenistan and ways of their agricultural development), Moscow, 1956, pp. 351–380.

14. Zhang Y., Hartemink A.E., Huang J., Quantifying Coarse Fragments in Soil Samples Using a Digital Camera, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 8, pp. 954–962, DOI: <u>10.1134/S1064229319080179</u>.

15. Amada S., Imagawa K., Aoki S., Splat Profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness, *Surface and Coatings Technology*, 2002, Vol. 154, pp. 27–33, DOI: <u>10.1016/S0257-8972(01)01517-1</u>.

16. Angulo K., Gil D., Espitia H., Method for Edges Detection in Digital Images Through the Use of Cellular Automata, *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 2020, Vol. 1078, pp. 3–21, DOI: 10.1007/978-3-030-33614-1_1.

17. Asmussen P., Conrad O., Günther A., Kirsch M., Riller U., Semiautomatic segmentation of petrographic thin section images using a "seededregion growing algorithm" with an application to characterize wheathered subarkose sandstone, *Computers & Geosciences*, 2015, Vol. 83, pp. 89–99, DOI: <u>10.1016/j.cageo.2015.05.001</u>.

18. Bryk M., Macrostructure of diagnostic B horizons relative to underlying BC and C horizons in Podzols, Luvisol, Cambisol, and Arenosol evaluated by image analysis, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp. 86–103, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.09.014.

19. Dorronsoro C., Micromorphometria de suelos. Aplicaciones, *An. Edafol. Y agrobiol.*, 1988, Vol. 47, No. 1–2, pp. 503–530.

20. Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Abrosimov K.N., Skvortsova E.B., Tagiverdiev S.S., Morozov I.V., Physical Properties of soils in Rostov agglomeration, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, pp. 898–907, DOI: 10.1134/S106422931606003X.

21. Ivanov A.L., Shein E.V., Skvortsova E.B., Tomography of soil pores: from morphological characteristics to structural-functional assessment of pore

space, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 1, pp. 50–57, DOI: 10.1134/S106422931901006X.

22. Jongerius A., Schoonderbeek D., Jager A., Kowalinski St., Electro-optical soil porosity investigation by means of Quantimet-B equipment, *Geoderma*, 1972, Vol. 7, pp. 177–198.

23. Kubiena W. (Ed.)., Die micromorphmetrishe Bodenanalyse, Stuttgart, 1967, 196 p.

24. Li P-N., Li H., Wu M-L., Wang S-Y., Kong Q-Y., Zhang Z., Sun Y., Liu J., Lv D-C., A Cost-Effective Transparency-Based Digital Imaging for Efficient and Accurate Wound Area Measurement, *PLoS ONE*, 2012, Vol. 7, Iss. 5, e38069, DOI: <u>10.1371/journal.pone.0038069</u>.

25. Marcelino V., Cnudde V., Vansteelandt S., Carò F., An evaluation of 2Dimage analysis techniques for measuring soil microporosity, *European Journal of Soil Science*, 2007, Vol. 58, pp. 133–140, DOI: <u>10.1111/j.1365-</u> <u>2389.2006.00819.x</u>.

26. Mermut A.R., Norton L.D., Preface, *Geoderma*, Vol. 53, Iss. 3–4, pp. iii–iv, DOI: <u>10.1016/0016-7061(92)90053-A</u>.

27. Pusdá-Chulde M.R., Salazar-Fierro F.A., Sandoval-Pillajo L., Herrera-Granda E.P., García-Santillán I.D., De Giusti A., Image Analysis Based on Heterogeneous Architectures for Precision Agriculture: A Systematic Literature Review, *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 2020, Vol. 1078, pp. 51–70, DOI: <u>10.1007/978-3-030-33614-1_4</u>.

28. Rodríguez J., Edeskär T., Knutsson S., Particle shape quantities and measurement techniques: a review, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, Vol. 18, pp. 169–198.

29. Russ J.C., *The image processing handbook (5th edition)*, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2007, 818 p.

30. San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W., Soil aggregate geometry: Measurements and morphology, *Geoderma*, 2015, Vol. 237–238, pp. 36–48, DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.003.

31. Savin I.Y., Prudnikova E.Y., Vasilyeva N.A., Veretelnikova I.V., Bairamov A.N., The color of soils as a basis for proximal sensing of their composition, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2016, Vol. 86, pp. 46–52, DOI: 10.19047/0136-1694-2016-86-46-52.

32. Sauzet O., Cammas C., Gilliot J.M., Bajard M., Montagne D., Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections, *Geoderma*, 2017, Vol. 292, pp. 135–148, DOI: <u>10.1016/j.geoderma.2017.01.004</u>.

33. Skvortsova E.B., Rozhkov V.A., Morphometric profiles of pore space in loamy soils of the forest and steppe zones of European Russia, *Eurasian Soil*

Science, 2011, Vol. 4, No. 10, pp. 1209–1221, DOI: 10.1134/S1064229311100140.

34. Stoops G., *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*, Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin, 2003, 184 p., DOI: 10.2136/2003.guidelinesforanalysis.

35. Stoops G., Micromorphology as a Tool in Soil and Regolith Studies, *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, 2018, pp. 1–19, DOI: <u>10.1016/b978-0-444-63522-8.00001-2</u>.

36. Takashimizu Y., Iiyoshi M., New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2016, Vol. 3, Article No. 2, DOI: <u>10.1186/s40645-015-0078-x</u>.

37. Wang Q., Hartemink A.E., Jiang Z., Jin N., Sun Z., Digital soil morphometrics of crotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China, *Geoderma*, 2017, Vol. 301, pp. 11–18, DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.04.010.

38. Working Group WRB, I., World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome, 2015.

39. Wang Z, Liang X, Wu Z, Lin J, Huang J., A novel method for measuring anterior segment area of the eye on ultrasound biomicroscopic images using Photoshop, *PLoS ONE*, 2015, Vol. 10, Iss. 3, e0120843, DOI: 10.1371/journal.pone.0120843.

40. Zhao Y., Han Q., Zhao Y., Liu J., Soil pore identification with the adaptive fuzzy C-means method based on computed tomography images, *Journal of Forestry Research*, 2019, Vol. 30, pp. 1043–1052, DOI: <u>10.1007/s11676-018-0725-3</u>.