

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135



Ссылки для цитирования:

Хирк А.В., Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В., Петросян Р.Д. Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 107-135. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135

Cite this article as:

Khirk A.V., Khaidapova D.D., Karpova D.V., Petrosyan R.D., Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye: composition and strength of aggregates, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 107-135, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-107-135

Благодарность:

Исследования выполнены с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:

Research was conducted using the equipment obtained within the framework of the Moscow State University Development Program.

Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность

© 2024 г. А. В. Хирк^{1,2*}, Д. Д. Хайдапова¹, Д. В. Карпова¹,
Р. Д. Петросян³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12,
*e-mail: khirkav@my.msu.ru.

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

³ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”, Россия,
601261, Суздаль, поселок Новый, ул. Центральная, 3.

Поступила в редакцию 06.12.2023, после доработки 25.04.2024,
принята к публикации 21.08.2024

Резюме: Исследован характерный для Владимирского Ополья комплекс почв: агросерая типичная глубокопахотная, агрозем языковатый и агросерая глееватая почва. Высокая контрастность свойств почв, которая обусловлена генезисом опольных ландшафтов, прослеживается в

различиях пахотных и подпахотных горизонтах агросерых почв на агрегатном и микроагрегатном уровне. Почвы обладают отличным структурным состоянием, высокими водоустойчивостью и механической прочностью агрегатов. В агрегатной структуре пахотных горизонтов обнаружены зависимости от положения в рельефе: вниз по склону уменьшается содержание агрономически ценных агрегатов, увеличивается средневзвешенный диаметр агрегатов, уменьшается водоустойчивость агрегатов и механическая прочность агрегатов при капиллярном насыщении. Однако распределение и размер микроагрегатов, а также прочность агрегатов в воздушно-сухом состоянии отражают сложный генезис ландшафта и сохраняют влияние палеорельефа с западинами и повышениями. Средневзвешенный диаметр микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополья близок к таковому в черноземах Курской области. Гранулометрический состав исследованных почв типичен для почв Владимирского Ополья и близок между собой. В соответствии с классификацией Н.А. Качинского, пахотные горизонты – среднесуглинистые крупнопылеватые, горизонты ВТ – тяжелосуглинистые крупнопылеватые. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной почвы, он имеет крупные микроагрегаты и самое большое содержание агрономически-ценных агрегатов, а также обладает высокой водоустойчивостью. Наиболее однородной по агрегатному составу является агрозем языковатый, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны и близки по содержанию микроагрегатов и агрономически ценных агрегатов. Также эта почва отличается высокой водоустойчивостью. Агросерая глееватая почва содержит меньше агрономически ценных агрегатов, а ее водопрочность неудовлетворительная.

Ключевые слова: механическая прочность агрегатов; микрорельеф; водоустойчивость; средневзвешенный диаметр агрегатов; гранулометрический состав.

Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye: composition and strength of aggregates

© 2024 A. V. Khirk^{1,2*}, D. D. Khaidapova¹, D. V. Karpova¹,
R. D. Petrosyan³

¹Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
^{*}e-mail: khirkav@my.msu.ru.

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

³*FSBSI “Upper Volga Federal Agrarian Research Center”,
3 Central Str., Noviy village 601261, Suzdal, Russian Federation.*

Received 06.12.2023, Revised 25.04.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: A complex of soils characteristic of the Vladimir Opole region was studied: agro-gray typical deep-arable soil, tongue-shaped agrozem and agro-gray gleyic soil. The high contrast of soil properties, which is due to the genesis of field landscapes, can be traced in the differences in the arable and subarable horizons of agro-gray soils at the aggregate and microaggregate levels. The soils have an excellent structural condition, high water resistance and mechanical strength of aggregates. In the aggregate structure of arable horizons, dependences on the position in the relief were found: down the slope the content of agronomically valuable aggregates decreases, the weighted average diameter of aggregates increases, the water resistance of aggregates and the mechanical strength of aggregates at capillary saturation decreases. However, the distribution and size of microaggregates, as well as the strength of aggregates in an air-dry state, reflects the complex genesis of the landscape and retains the influence of paleorelief with depressions and elevations. The weighted average diameter of microaggregates of arable horizons of the soils of the Vladimir Opole region is close to the chernozems of the Kursk region. The granulometric composition of the studied soils is typical of Vladimir Opolye soils and close to each other. In accordance with the classification of N.A. Kachinsky arable horizons are medium loamy, coarse silt, BT horizons are heavy loamy, coarse silt. The most structural is the arable horizon of agro-gray typical deep-arable soil, it has large microaggregates, it also has high water resistance and the highest content of agronomically valuable aggregates. The most homogeneous in terms of aggregate composition is tongue-shaped agrozem; the average diameter of aggregates and microaggregates in the arable and subarable horizons are equal and similar in the content of microaggregates and agronomically valuable aggregates. This soil is also highly water resistant. Agro-gray gleyic soil contains fewer agronomically valuable aggregates and its water stability is unsatisfactory.

Keywords: mechanical strength of aggregates; microrelief; water resistance; weighted average diameter of aggregates; particle size distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегатная структура почв чрезвычайно важна для обеспечения оптимальных условий для роста и развития корневых си-

стем растений, именно она противодействует механическому разрушению и эрозии почв. Оценка агрегатного состояния и ее устойчивости к водным и механическим воздействиям позволяет оптимизировать необходимые агротехнические мероприятия и прогнозировать урожайность высеваемых культур.

Почвы Владимирского Ополья имеют большую вариабельность в свойствах пахотных горизонтов. Например, они различаются по гидротермическому режиму: серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом прогреваются и остывают медленнее, чем фоновые серые лесные почвы, их температура отличается большей инерционностью и меньшим размахом годовых колебаний (Архангельская, 2008). Контрастность почвенного покрова Владимирского Ополья приводит к тому, что в агрономическом отношении комплекс серых лесных почв неоднороден. Потенциальное плодородие серых лесных почв микроповышений ниже, чем потенциальное плодородие почвы микропонижений со вторым гумусовым горизонтом (Шеин, 2017). Эти различия обусловлены генезисом всего ландшафта ополей, для которых характерен микрорельеф с регулярной сеткой из мелких блюдцеобразных понижений, диаметром от 5 до 10 м, и неясно выраженных повышений, расстояние между западинами 15–20 м. Образование этих западин характерно для всех ополей, которые были во времена оледенений перегляциальными тундрами. Сложились различные представления о причинах возникновения данного микрорельефа, но неоспоримо то, что именно он является причиной высокой контрастности почв ополей на высоком таксономическом уровне. А.Н. Тюрюканов и Т.Л. Быстрицкая назвали эти два самостоятельных, но генетически сопряженных типа почв в повышениях и понижениях микрорельефа “ополец” и “ополица” и объясняли их палеопойменными процессами (Тюрюканов, 1971.) Алифанов В.М. (Алифанов, 2010) также связывает образование темноцветного гумусового горизонта в западинах с гидроморфным этапом развития центра Русской равнины с палеокриогенезом, когда происходило мерзлотно-гидроморфное почвообразование лугово-болотного типа почв в микропонижениях. По мнению А.А. Величко, Т.Д. Морозовой и др. (Величко, 1975), второй гумусовый горизонт является реликтом западных почв и развит в понижениях

реликтового криогенного микрорельефа. Второй гумусовый горизонт имеет почти черный цвет, плотное сложение, плитчато-крупитчатую структуру, резко выраженный гуматный состав гумуса. Характерную для них языковатую нижнюю границу А.А. Величко, Т.Д. Морозова и др. объяснили процессами морозобойного растрескивания и усыхания сезонного характера во время суббореального похолодания. При этом морозобойное растрескивание второго гумусового горизонта произошло уже после формирования полигонально-блочного рельефа, так языковатость второго гумусового горизонта не связана с элементами рельефа: клиновидная форма второго гумусового горизонта встречается и на блоках, и в межблочьях, и на склонах блоков. Макеев А.Д. и Дубровина И.В. также считают второй гумусовый горизонт реликтом мерзлотно-гидроморфной стадии почвообразования позднеледниковой эпохи, а формирование палеокриогенных западинных комплексов связывают с заключительными этапами лёссового осадконакопления. И, следовательно, положение второго гумусового горизонта в профиле они объясняют погребением в процессе финального осадконакопления (Макеев, 2006). Во времена атлантического оптимума голоцена, когда уже был сформирован второй гумусовый горизонт, в профиле серых лесных почв наиболее сильно проявился процесс оподзоливания. Причем интенсивность процессов оподзоливания, по данным Шеина Е.В., максимальна в почвах со вторым гумусовым горизонтом и постепенно снижается при удалении от центров занятых ими участков (Шейн, 2002). Таким образом, палеокриогенез как экологический фактор изменил направление почвообразовательного процесса на уровне типа и сформировал комплексную структуру почвенного покрова центральной России (Овчинникова, 2020).

В настоящее время на возделываемых сельскохозяйственных полях микрорельеф, благодаря которому сформировался сложный комплекс опольных почв, выровнен. Существующие различия по рельефу в содержании водопрочных агрегатов в серых лесных почвах Владимирского Ополья рассмотрены в работе И.Ю. Винокурова (Винокуров и др., 2019). Верхняя часть катены соответствует зональным серым лесным почвам, а нижняя – серым лесным полугидроморфным. Показано, что минимум содер-

жания гумуса наблюдали на водоразделе. Локальные максимумы содержания водопрочных почвенных агрегатов совпадали с максимумами величин pH_{KCl} почвы. На агрегатное состояние пахотного горизонта влияет интенсивное механическое рыхление почвы в агроэкосистемах с помощью вспашки, которое приводит к разрушению агрономически ценных агрегатов: коэффициент структурности серой лесной почвы в слое 0–30 см снижается на 10–20% по сравнению с почвой, подвергавшейся безотвальной обработке (Зинченко, 2020). Также при обработке ухудшаются условия формирования водопрочных агрегатов. Однако при ежегодном безотвальном рыхлении на глубину 6–8 см условия для формирования водопрочных агрегатов наиболее благоприятные (Зинченко, 2019). Тем не менее механические обработки могут по-разному воздействовать на почвы, входящие в комплекс. Поэтому цель данной работы состояла в исследовании особенностей агрегатной структуры агросерой почвы, сформированной на разных элементах микрорельефа. Для этого были проведены определения гранулометрического, микроагрегатного, агрегатного составов, определена водопрочность и механическая прочность агрегатов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования находятся на поле в нижней части склона к реке Каменка (ФГБНУ “Верхневолжский ФАНЦ”). На момент исследования поле находилось под чистым паром, и поверхность почвы представляла собой чередование темно-серых и светло-серых пятен 10–15 м в диаметре, что соответствует приведенным выше описаниям особенностей почвенного покрова Владимирского Ополья с чередованием почв, сформированных в микрозападинах и на микроповышениях. На поле были заложены три разреза в характерных точках (рис. 1): первый разрез находился в верхней части склона в темном пятне пашни, второй – в 50 м от него в светлом пятне пашни, и третий – в ложбине в 100 м от первого. Превышение между первым и третьим разрезами составляет 2 м. В таблице 1 представлены некоторые характеристики почв, схема строения почв показана рисунке 1.

В первом разрезе агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва имеет гумусированный горизонт мощно-

стью 42 см, который отличается очень темно-серой окраской и комковато-зернистой структурой, горизонт мягкий, структурно рыхлый. Можно предположить, что в нижней части гумусированной толщи был второй гумусовый горизонт. Кроме мощности об этом свидетельствует структура и темный цвет. Горизонт BEL (42–60 см) коричневато-охристый с белесой (светло-серой) присыпкой, призматически-плитчатой структурой в белесых языках и ореховатой между ними, уплотненный горизонт с присыпкой и кутанами по граням структурных отдельностей (ГСО). Граница горизонта BEL волнисто-языковатая. Горизонт ВТ (60–85 см) коричневато-охристый, средний суглинок, структура столбчато-ореховатая, уплотненный, сложение плотное структурное, кутаны по ГСО, кутаны коричневые, агрегаты охристые внутри.

Во втором разрезе агрозем языковатый имел гумусированный горизонт мощностью 30 см, комковато-зернисто-порошистую структуру, и горизонт уплотненный, но мягкий, с рыхлым структурным сложением. Горизонт BEL не выделялся и находился в виде языков отбеленного мягкого материала в горизонте ВТу. Горизонт ВТ (30–85 см) неоднородной окраски: на коричневато-охристом фоне серые прожилки, тяжелый суглинок, структура столбчато-мелкоореховатая (столбик делится на мелкие (квадраты) орехи), сложение плотное структурное, агрегаты твердоватые, обильные коричневые кутаны по ГСО (агрегаты внутри светло-охристые). В верхней части 30–45 см языки отбеленного мягкого материала (BEL) в виде белесой присыпки по ГСО.

В третьем разрезе, в ложбине, агросерая глееватая почва имела пахотный горизонт (0–20 см) однородной темно-серой окраски, комковато-зернистой структуры, уплотненный, мягкий, с рыхлым структурным сложением.

Горизонт BELg (20–38 см) неоднородной окраски, на темно-сером сизоватом фоне светло-охристые маленькие пятна и светло-серио-оливковые примазки-прослои (сложены легким пылеватым материалом), среднесуглинистый, структура глыбисто-ореховатая, сложение структурное.

Таблица 1. Характеристика почв

Table 1. Soil characteristics

Координаты	Положение	Название (Классификация почв России, 2004)	Горизонт	Гумус*, %	Плотность, г/см ³
56.416723, 40390007	Верх склона	постлитогенная текстурно- дифференцированная агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках	Р 0–42 см	3.57	1.29 ± 0.01
			BEL 42–60 см	0.51	1.51 ± 0.01
			BT 60–85 см	0.85	1.50 ± 0.01
56.417041, 40392407	Середина склона	постлитогенный агрозем текстурно-дифференцированный языковатый среднепахотный среднесуглинистый на лёссовидных суглинках	Р 0–30 см	2.04	1.37 ± 0.02
			BTy 30–85 см	0.68	1.50 ± 0.02
56.417361, 40394844	Ложбина	постлитогенная текстурно- дифференцированная агросерая глеватая мелкопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках	Р 0–20 см	2.55	1.39 ± 0.02
			BELg 20–38 см	2.21	1.48 ± 0.01
			BTg 38–75 см	0.34	1.49 ± 0.02

Примечание. * Содержание органического вещества определялось по методу Тюрина (ГОСТ 26213-91).

Note. * The content of organic matter was determined by the Tyurin method (GOST 26213-91).

Горизонт ВТ отличается неоднородной, мраморовидной окраской, на светло-рыже-охристом фоне прожилки и затеки темно-серого цвета по ходам корней и трещинам, сизоватость, структура столбчато-призмовидная, горизонт уплотненный, ближе к плотному, сложение плотное структурное, также в горизонте встречаются редкие железистые стяжения.

Таким образом описан характерный для Владимирского Ополья комплекс: почвы, сформированные в микропонижении, с мощным темноокрашенным гумусовым горизонтом и оподзоливанием, слабооподзоленные почвы, сформированные на микроповышении, и почвы ложбины с грунтовым оглеением.

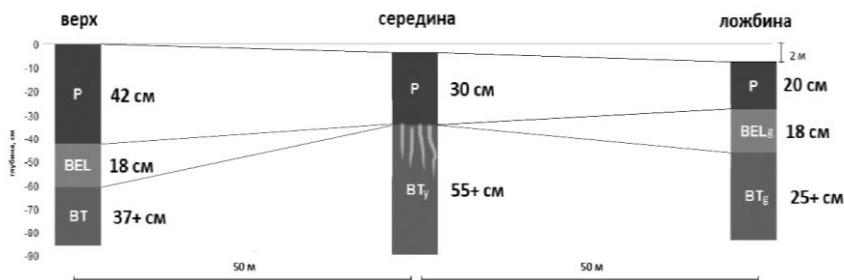


Рис. 1. Схема расположения и строения разрезов.

Fig. 1. Scheme of the soils location and structure.

Гранулометрический состав был определен двумя методами – седиментрическим методом пипетки (Полевые и лабораторные методы, 2001) и методом лазерной дифракции (ЛД) частиц на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) (Юдина и др., 2017). Для определения гранулометрического и микроагрегатного состава образцы были растерты резиновым пестиком и просеяны через сито 1 мм. Для определения гранулометрического состава пипет-методом почва была диспергирована 4%-ным раствором пирофосфата натрия. Для определения гранулометрического состава методом лазерной дифракции пробу суспендировали (20 мг почвы в 15 мл дистиллированной воды) и обрабатывали ультразвуком на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со стан-

дартным наконечником при энергии диспергации 500 Дж/мл. Для микроагрегатного анализа пробы суспендировали в дистиллированной воде и встряхивали на вортексе (Yudina et al., 2022).

Просеивание воздушно-сухих агрегатов было проведено на виброгрохоте Anallysette 3 Spartan (Фомин и др., 2019) в шести повторностях, размер одной пробы 500 г. Водопрочность определяли просеиванием в стоячей воде по методу Саввинова в трехкратной повторности. Агрегаты перед просеиванием в воде капиллярно насыщались сутки на фильтровальной бумаге.

Определение прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов проводилось на коническом пластометре П.А. Ребиндера (Хайдапова и др., 2022). Анализировалась прочность агрегатов размером 3–5 мм каждого горизонта. Агрегаты этой фракции являются наиболее удобными для определения механической прочности среди агрономически ценных агрегатов. Агрегаты исследовались в воздушно-сухом и капиллярно-насыщенном состоянии. Для капиллярного насыщения агрегаты увлажнялись на фильтровальной бумаге в течение восьми часов. Анализ проводился в десятикратной повторности. После разрушения определялась влажность агрегатов термостатно-весовым методом. Предельное напряжение сдвига $P_m \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right)$ рассчитывается по формуле (1), где K_α – коэффициент площади соприкосновения конуса с агрегатом, для воздушно-сухих – 4.4, для насыщенных – 1.108, F (кг) – нагрузка на конус, h (см) – глубина погружения конуса, в данном случае средний диаметр агрегатов:

$$P_m = K_\alpha \frac{F}{h^2}. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав исследованных почв методом седиментометрии (рис. 2.) типичен для почв Владимирского Ополья. Содержание крупной пыли составляет более 40%, средней пыли – 10–20%, илистой фракции – от 10 до 30%. Полученные результаты близки к данным, опубликованным в работе В.В. Окоркова (Окорков, 2010). В соответствии с классификацией

Н.А. Качинского пахотные горизонты среднесуглинистые крупно-пылеватые, горизонты ВТ тяжелосуглинистые крупнопылеватые. Горизонт BELg агросерой глееватой почвы среднесуглинистый, а BELg агросерой типичной глубокопахотной – тяжелосуглинистый. Во всех трех почвах количество физической глины увеличивается вниз по профилю, а содержание ила в горизонтах ВТ примерно в два-три раза выше, чем в горизонтах Р и BEL.

Дифференциальное распределение элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) и микроагрегатов представлено на рисунке 3, на котором видно, что кроме крупной пыли, наблюдается высокое содержание мелкой пыли.

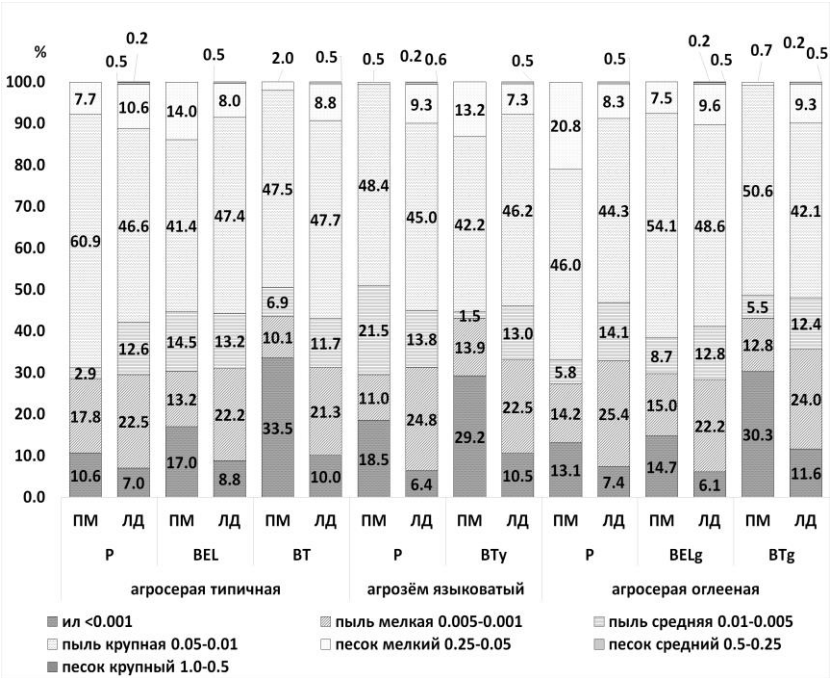


Рис. 2. Гранулометрический состав; ПМ – метод седиментометрии, ЛД – метод лазерной дифракции.

Fig. 2. Particle size distribution studied by sedimentometry and laser diffraction methods.

Содержание физической глины при определении ЛД больше, чем в седиментрическом анализе, а содержание илистой фракции – меньше. Это различие определяется особенностями методов. Легкие органические частицы медленно оседают и при определении пипет-методом попадают в категорию ила, однако при определении лазерным дифрактометром органические частицы оказываются крупнее и определяются во фракциях пыли. Поэтому при поиске зависимостей прочности агрегатов от свойств использовались данные пипет-метода. Подобные результаты при использовании классификации Н.А. Качинского к результатам ЛД были показаны в работе ряда авторов (Юдина и др., 2020). При определении методом ЛД гранулометрический состав исследованных почв получился однородным, без существенных различий по горизонтам, в отличие от результатов, полученных методом седиментометрии.

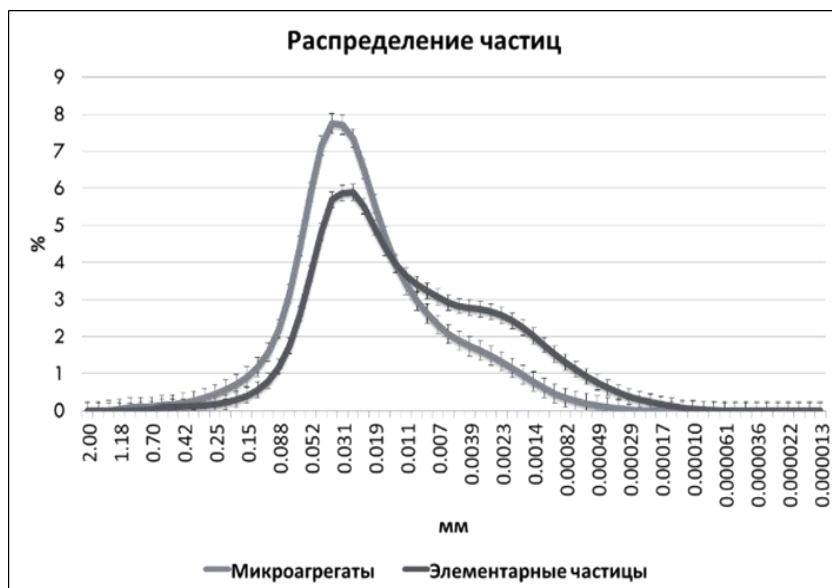


Рис. 3. Дифференциальное распределение ЭПЧ и микроагрегатов.
Fig. 3. Differential distribution of elementary soil particles and microaggregates.

В таблице 2 показаны средневзвешенные диаметры микроагрегатов (СВД), их процентное содержание и коэффициент дисперсности. Средневзвешенный диаметр микроагрегатов составляет от 170.9 до 244.0 мкм. Содержание микроагрегатов в пахотных горизонтах выше, чем в подпахотных. Наиболее крупные микроагрегаты отмечены в пахотном горизонте агросерой типичной глубокопахотной почвы. По содержанию микроагрегатов наиболее контрастной является почва в ложбине. В горизонте BELg микроагрегаты имеют максимальный СВД, но их содержание минимально. Был вычислен коэффициент дисперсности (Кд): отношение частиц <0.001 мм при гранулометрическом анализе к частицам <0.001 мм при микроагрегатном анализе в процентах. Наиболее дисперсным является горизонт Р агрозема, а горизонт Р агросерой глееватой почвы, наоборот, высоко оструктуренный, горизонты BEL и BT хорошо оструктуренны.

Таблица 2. Характеристика микроагрегатного состава
Table 2. Characteristics of the microaggregate composition

Почва	Агросерая типичная глубокопахотная			Агрозем языкова- тый		Агросерая глевая мелкопахотная		
	Р	BEL	BT	Р	BTy	Р	BELg	BTg
СВД, мкм	201	196	214	190	171	183	244	189
Содержа- ние	20%	19%	20%	21%	22%	23%	18%	20%
Кд	18%	23%	22%	32%	19%	12%	15%	21%

Сравнение с почвами пахотных горизонтов зонального ряда в Европейской России показало, что СВД микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополья в два раза выше, чем у серых лесных почв Тульской области (СВД = 67–101 мкм). СВД

микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополя близки к черноземам Курской области (90–250 мкм). Содержание микроагрегатов в исследованных пахотных горизонтах почв составляет около 20%, что немного ниже, чем в пахотных серых лесных почвах Тульской области (25%), и значительно ниже, чем в пахотных горизонтах черноземов, где содержание микроагрегатов составляет примерно 50% (Филиппова и др., 2019).

Результаты определения агрегатного состава и водостойчивости агрегатов представлены в таблице 3. В качестве показателей использованы: содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА), т.е. сумма содержаний фракций от 0.25 мм до 10 мм; коэффициент структурности ($K_{стр.}$), т.е. отношение АЦА к сумме фракций >10 мм и <0.25 мм и коэффициент водопрочности ($K_{в-пр.}$), т.е. сумма содержания фракций >0.25 мм. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной ($K_{стр.} = 7.2$), также он обладает высокой водостойчивостью и имеет самое большое содержание агрономически ценных агрегатов. Пахотный горизонт агрозема языковатого имеет меньшую оструктуренность. Но при этом интересно, что горизонт ВТу агрозема имеет самую отличную водопрочную структуру. Почва агросерая глееватая содержит меньше агрономически ценных агрегатов и водопрочность ее не удовлетворительная.

Пахотный горизонт почвы агросерой типичной глубокопахотной имеет наименьший СВД агрегатов (таблица 4), однако он имеет самое высокое содержание АЦА и высокое содержание водостойчивых агрегатов. У агросерой глееватой СВД агрегатов пахотного горизонта значительно больше (6.1 мм против 4.8 и 3.3 мм), также содержание АЦА ниже на 10%, чем у других пахотных горизонтов. Агросерая глееватая почва содержит меньше 50% водостойчивых агрегатов и диаметр их меньше, чем у других почв. Выявлена взаимосвязь между средневзвешенным диаметром и содержанием АЦА и водостойчивых агрегатов (-0.9), чем крупнее агрегаты, тем меньше процент АЦА и водостойчивых агрегатов, что характерно для агросерой глееватой почвы ложбины.

Таблица 3. Агрегатный состав и водоустойчивость
Таблица 3. Aggregate composition and water resistance

Горизонт		Агрегаты	Размер (мм)									Содер- дер- жание АЦА	K _{стр}	K _{в-пр}
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25			
агросерая типичная глубокопахотная	Р	естественные	0.05	0.07	0.10	0.14	0.13	0.20	0.16	0.09	0.07	90%	7.2	55%
		водоустойчивые			—	—	—	—	—	—	—			
	ВЕР	естественные	0.24	0.15	0.05	0.09	0.11	0.16	0.09	0.09	0.41	67%	2.3	60%
		водоустойчивые			0.37	0.16	0.11	0.12	0.05	0.03	0.15			
	ВТ	естественные	0.28	0.19	0.17	0.14	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01	71%	2.4	24%
		водоустойчивые			0.45	0.16	0.09	0.07	0.03	0.03	0.17			
агрозем эзл- коватый	Р	естественные	0.15	0.11	0.12	0.14	0.12	0.15	0.12	0.05	0.05	80%	4.0	49%
		водоустойчивые			—	—	—	—	—	—	—			
	ВТу	естественные	0.06	0.13	0.12	0.15	0.12	0.17	0.10	0.06	0.29	91%	10.8	62%
		водоустойчивые			0.40	0.25	0.10	0.10	0.05	0.04	0.07			

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

Горизонт		Агрегаты	Размер (мм)									Содер- дер- жание АЦА	K _{стр}	K _{в-пр}
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25			
агросерая глееватая мелкопашотная	Р	естественные	0.28	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12	0.08	0.04	0.05	67%	2.0	28%
		водоустойчивые			— 0.11	— 0.05	— 0.13	— 0.07	— 0.09	— 0.12	— 0.43			
	BEL g	естественные	0.20	0.14	0.16	0.15	0.11	0.10	0.05	0.03	0.06	74%	2.8	42%
		водоустойчивые			— 0.30	— 0.15	— 0.10	— 0.09	— 0.05	— 0.06	— 0.23			
	BTg	естественные	0.48	0.16	0.13	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02	50%	1.0	29%
		водоустойчивые			— 0.60	— 0.14	— 0.06	— 0.05	— 0.03	— 0.03	— 0.10			

Таблица 4. Таблица интегральных показателей структуры
Таблица 4. Table of integral indicators of the structure

Положение	Горизонт	Агрегаты естественного сложения		Водоустойчивые агрегаты (5-0.25 мм)		Микроагрегаты	
		СВД, мм	АЦА, %	СВД, мм	Содержание, %	СВД, мкм	Содержание, %
агросерая типичная глубокопахотная	P	3.3	90	1.0	54	200.9	20.1
	BEL	6.2	70	1.2	48	195.9	18.8
	BT	7.2	71	1.0	37	213.4	19.6
агрозем языковатый	P	4.8	81	0.9	59	189.6	20.5
	BT	4.8	92	1.5	54	170.9	21.6
агросерая глееватая мелкопахотная	P	6.1	67	0.8	46	183.2	22.6
	BELg	5.9	74	1.1	47	244.0	17.8
	BTg	8.9	50	0.8	30	188.8	19.7
Корреляции, * - достоверные значения							
агрегаты естественного сложения	СВД, мм						
	АЦА, %	-0.92*					
водоустойчивые агрегаты (5-0.25 мм)	СВД, мм	-0.34	0.60				
	Содержание, %	-0.91	0.85	0.36			
микроагрегаты	СВД, мкм	0.07	-0.10	-0.08	-0.17		
	Содержание, %	-0.22	0.20	-0.11	0.22	-0.80	

Большему содержанию АЦА, соответствует большее количество водоустойчивых агрегатов (0.85). СВД микроагрегатов отрицательно коррелирует с содержанием микроагрегатов (-0.8).

Анализ агрегатного состава методом главных компонент

Анализ агрегатного состава методом главных компонент (МГК) позволяет оценить структурное состояние не только по отдельным соотношениям (коэффициенты структурности, водопрочности), но и сравнить соотношение всех фракций агрегатов и оценить их вклад в различия между почвами и горизонтами (Холодов, 2016; Мешалкина, 2008).

Результаты анализа МГК содержания воздушно-сухих агрегатов представлены на рисунке 4, коэффициент собственного вектора – в таблице 5. Наибольший разброс наблюдается в содержании агрегатов размером >10 мм. Первая компонента описывает 62.8% варьирования агрегатного состава. Для нее значимы все фракции агрегатов кроме 7–5 и 5–3 мм, которые значимы для второй компоненты, описывающей 30.3% варьирования. Все горизонты разделились на факторной плоскости на группы пахотных, элювиальных и иллювиальных. На координатной плоскости видно, что наиболее отличный агрегатный состав у горизонта ВТ агрозема языковатого, где больше всего агрегатов размером 7–5, 5–3 мм.

Результаты анализа МГК содержания водоустойчивых агрегатов представлены на рисунке 5, в таблице 6 – коэффициент собственного вектора. Распределение водопрочных агрегатов имеет два максимума >5, агрегаты не распавшиеся, и <0.25мм – остатки распавшихся агрегатов. У второго фактора вклад 18.78% и одна значимая фракция 2–1 мм. На координатной плоскости видно, что пахотные горизонты отличаются по содержанию водопрочных агрегатов от горизонтов ВЕЛ и ВТ. В подпахотных горизонтах крупные агрегаты (>5 мм) в основном сохранились и не распались на более мелкие.

Таким образом, МГК позволил оценить различия агрегатного состава и содержания водоустойчивых агрегатов.

Таблица 5. Коэффициент собственного вектора агрегатов естественного сложения

Таблица 5. Eigenvector coefficient of natural addition aggregates

	вклад, %	>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
1	62.8%	0.8	0.9	0.4	-0.2	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.8
2	30.3%	0.6	-0.2	-0.9	-1.0	-0.6	0.0	0.2	0.2	0.2

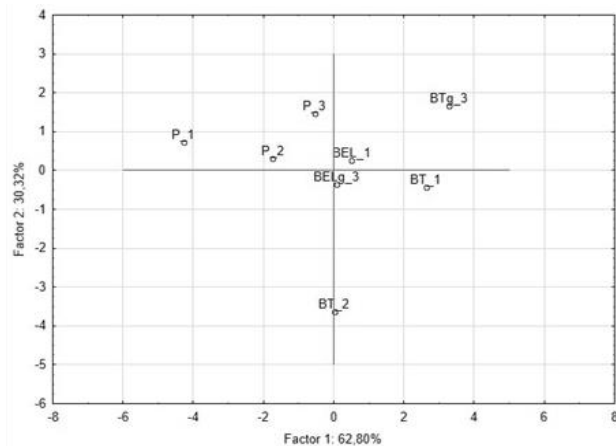
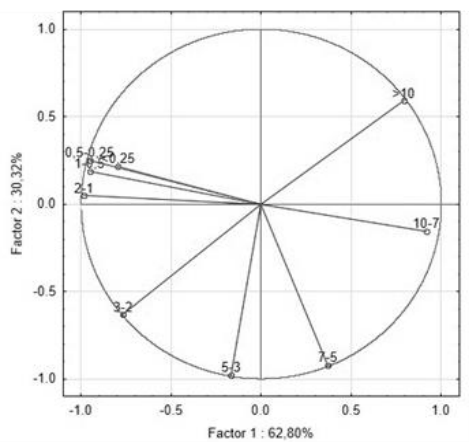


Рис. 4. Результаты анализа методом главных компонент содержания агрегатов; P_1, BEL_1, BT_1– горизонты агросерой типичной глубокопахотной, P_2, BT_2– горизонты агрозема языковатого, P_3, BELg_3, BTg_3 – горизонты агросерой глееватой мелкопахотной.

Fig. 4. Results of principal component analysis of aggregate content; P_1, BEL_1, BT_1 – top soil horizons, P_2, BT_2 – middle soil horizons, P_3, BELg_3, BTg_3 – soil horizons in the hollow.

Таблица 6. Коэффициент собственного вектора водоустойчивых агрегатов

Таблица 6. Eigenvector coefficient of water-resistant aggregates

	вклад, %	>5	5–3	3–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25	<0.25
1	72.50%	1.0	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.9	-1.0
2	18.78%	0.2	-0.6	-0.3	-0.8	-0.2	0.4	0.3

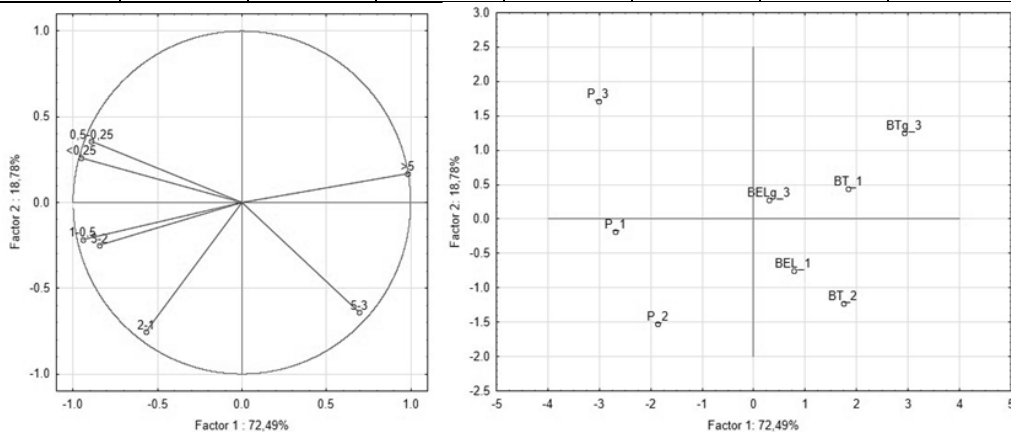


Рис. 5. Результаты анализа методом главных компонент содержания водоустойчивых агрегатов; P_1, BEL_1, BT_1– горизонты агросерой типичной глубокопахотной, P_2, BT_2– горизонты агрозема языковатого, P_3, BELg_3, BTg_3 – горизонты агросерой глееватой мелкопахотной.

Fig. 5. Results of principal component analysis of the content of water-stable aggregates; P_1, BELg_1, BTg_1 – top soil horizons, P_2, BTg_2 – middle soil horizons, P_3, BELg_3, BTg_3 – soil horizons in the hollow.

Наиболее однородной по агрегатному составу является агрозем языковатый, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны, они близки по содержанию микроагрегатов и агрономически ценных агрегатов. Также эта почва отличается высокой водоустойчивостью. Гумусированный горизонт агросерой типичной глубокопахотной отличается от агрозема меньшим диаметром агрегатов. Пахотный горизонт агросерой глееватой отличается большим количеством глыб >10 мм и мелких агрегатов <0.25 мм, а водоустойчивость агрегатов несколько ниже, чем у почв выше по склону.

Прочность почвенных агрегатов, как способность оказывать сопротивление внешнему механическому воздействию, показывает особенности межчастичного взаимодействия в агрегатах. Прочность агрегатов изменяется при увлажнении и иссушении. Рассмотрены два крайних случая: воздушно-сухие агрегаты (4–7%) и капиллярно-насыщенные (24–27%). В первом случае агрегаты являются упруго-хрупкими телами с конденсационными контактами между частицами. Между частицами капиллярно-насыщенных агрегатов находятся пленки воды, и контакты между частицами имеют коагуляционный характер. Прочность агрегатов зависит от содержания влаги, гранулометрического состава и содержания органического вещества (Хайдапова, 2007). Большое содержание мелкодисперсных фракций обеспечивает рост числа межчастичных контактов, особенно в воздушно-сухих агрегатах. Органическое вещество способствует формированию большего числа микроагрегатов, что приводит к уменьшению плотности агрегатов. В срединных горизонтах с малым содержанием органического вещества происходит непосредственное взаимодействие почвенных частиц. Это приводит к формированию агрегатов с низкой пористостью и высокой прочностью (Пестонова, 2007).

Результаты анализа прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов агросерых почв, а также их корреляции с содержанием ила, физической глины и гумуса представлены в таблице 7.

Таблица 7. Прочностные характеристики агрегатов, гранулометрический состав, содержание органического вещества и корреляции между ними

Таблица 7. Strength characteristics of aggregates, particle size distribution, content of organic matter and correlations between them

Почва	Горизонт	C _{орг} , %	Гранулометрич. состав (седиментометрия)		Воздушно-сухие		Капиллярно-насыщенные	
			<0.001мм	<0.01мм	W%	Pm, кг/см ²	W%	Pm, кг/см ²
Агросерая типичная глубокопахотная	Р (0–42 см)	3.57	10.60	31.34	4.71	13.48	28.09	0.45
	BEL (42–60 см)	0.51	16.99	44.66	3.75	23.93	24.37	0.31
	BT (60–85 см)	0.85	33.53	50.53	4.69	27.50	21.43	0.81
Агрозем языковатый	Р (0–30 см)	2.04	18.54	18.08	3.95	24.61	27.59	0.35
	BTy (30–85 см)	0.68	29.21	44.56	7.14	29.15	24.44	0.68
Агросерая глееватая мелкопахотная	Р (0–20 см)	2.55	13.06	33.14	4.17	18.40	29.41	0.28
	BELg (20–38 см)	2.21	14.72	38.37	4.00	19.11	26.89	0.60
	BTg (38–75 см)	0.34	30.34	48.71	7.14	21.86	24.51	0.52
Корреляции								
Возд.-сух.	Pm, кг/см ²	-0.80	0.78	0.38	0.33			
Кап. нас.	Pm, кг/см ²	-0.34	0.71	0.59	0.44	0.47	-0.71	

Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет разброс от 13.48 кг/см² в пахотном горизонте агросерой типичной глубокопахотной, до 29.15 кг/см² в горизонте ВТу агрозема языковатого. Прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв в соответствии с увеличением количества илистых частиц, между которыми формируются прочные конденсационные межчастичные связи при отсутствии пленок органического вещества. Чем больше содержание илистой фракции, тем прочнее агрегаты как в воздушно-сухом, так и в капиллярно-насыщенном состоянии. Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет прямую зависимость с содержанием илистой фракции (коэффициент корреляции 0.78) и обратную – с содержанием гумуса (коэффициент корреляции -0.80). Прочность горизонтов ВТ выше, чем горизонтов Р, так как в горизонтах ВТ выше содержание илистой фракции и значительно меньше гумуса.

При капиллярном насыщении значительно снижается прочность агрегатов. Значения снижаются с десятков до десятых долей килограмма на квадратный сантиметр. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов обратно зависит от влажности (-0.71). Органическое вещество аккумулирует большое количество воды, вследствие чего влажность пахотных горизонтов выше, чем у ВТ горизонтов. Пленки воды расклинивают микроагрегаты и частицы, и в результате прочность капиллярно-насыщенных агрегатов гумусированных горизонтов в два-три раза ниже, чем у нижележащих горизонтов. Меньшую прочность при капиллярном насыщении агрегатов ВЕL агросерой типичной, чем агрегатов горизонта Р, можно объяснить процессом оподзоливания. Однако прочность агрегатов ВЕLg агросерой глееватой в три раза выше, чем в горизонте Р, что, вероятно, может быть обусловлено повышенным содержанием гумуса и образованием железо-органических соединений, которые увеличивают прочность агрегатов.

Таким образом, на механическую прочность агрегатов в значительной степени влияет их увлажненность. Капиллярно-насыщенные агрегаты на два порядка менее прочные, чем воздушно-сухие агрегаты. Прочность агрегатов как в сухом, так и в увлажненном состоянии зависит от содержания илистых частиц. Для сухих агрегатов важным фактором является содержание гу-

муса. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов зависит от влажности агрегатов, которая в свою очередь тоже связана с содержанием гумуса. Прочность насыщенных агрегатов пахотных горизонтов уменьшается вниз по склону.

ВЫВОДЫ

В агрегатной структуре пахотных горизонтов обнаружены зависимости от положения в рельефе: вниз по склону уменьшается содержание агрономически ценных агрегатов, увеличивается средневзвешенный диаметр агрегатов, уменьшается водоустойчивость агрегатов и механическая прочность агрегатов при капиллярном насыщении. Однако распределение и размер микроагрегатов, а также прочность агрегатов в воздушно-сухом состоянии отражает сложный генезис ландшафта и сохраняет влияние палеорельефа с западинами и повышениями.

Гранулометрический состав исследованных почв методом седиментометрии типичен для почв Владимирского Ополя. Преобладает фракция крупной пыли. Содержание физической глины при определении методом лазерной дифрактометрии больше, чем в седиментрическом анализе, а содержание илистой фракции – меньше.

СВД микроагрегатов пахотных горизонтов почв Владимирского Ополя близки к черноземам Курской области. Содержание микроагрегатов в исследованных пахотных горизонтах почв немного ниже, чем в пахотных серых лесных почвах Тульской области, и значительно ниже, чем в пахотных горизонтах черноземов.

Почвы Владимирского Ополя обладают отличным структурным состоянием и высокими водоустойчивостью и механической прочностью агрегатов. Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной почвы, также он обладает высокой водоустойчивостью и имеет самое большое содержание агрономически ценных агрегатов. Наиболее однородной по агрегатному составу почвой является агрозем, средний диаметр агрегатов и микроагрегатов у пахотного и подпахотного горизонтов равны, эти горизонты имеют близкое содержание агрономически ценных агрегатов и микроагрегатов. Также данная почва отличается высокой водоустойчивостью. Пахотный гори-

зонт в агросерой глееватой почве содержит меньше агрономически ценных агрегатов, а его водопрочность неудовлетворительная. Механическая прочность агрегатов зависит от увлаженности. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов на два порядка ниже, чем у воздушно-сухих агрегатов. Прочность агрегатов как в сухом, так и в увлажненном состоянии зависит от содержания илистых частиц и гумуса. Прочность агрегатов горизонтов ВТ выше, чем в горизонтах Р и ВЕL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Л.А Гугалинская, Овчинникова А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины. М.: ГЕОС, 2010. 160 с.
2. Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского Ополя // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 80–86.
3. Величко А.А., Морозова Т.Д., Бердников В.В., Губонина З.П., Халчева Т.А., Маркова А.К. Эволюция природы в перигляциальной зоне Европы в четвертичное время // Геоморфология и палеогеография. Матлы VI съезда Географ. о-ва СССР. М.: Ин-т географии АН СССР, 1975. С. 41–44.
4. Винокуров И.Ю., Окорков В.В., Чернов О.С. Влияние рельефа на содержание гумуса, элементов питания и водопрочных агрегатов в серых лесных почвах Владимирского Ополя // Успехи современного естествознания. 2019. № 1. С. 30–38.
5. Зинченко С.И. Влияние приемов основной обработки на структуру серой лесной почвы в агроэкосистемах при возделывании озимой ржи // Владимирский земледелец. 2019. № 3. С. 4–7.
6. Зинченко С.И., Щукин И.М. Оценка антропогенного влияния на структуру почвенного покрова агроэкосистем Верхневолжья // Агрофизика. 2020. № 1. С. 16–23.
7. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. № 3. Вып. 4. С. 24–68.
8. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 84 с.
9. Овчинников А.Ю., Алифанов В.М., Худяков О.И. Влияние палеокриогенеза на формирование серых лесных почв Центральной России // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1170–1181.

10. *Окорков В.В.* Гранулометрический состав почв и его роль в устойчивости к водной эрозии // *Владимирский Земледелец*. 2010. № 3. С. 17–19.
11. *Пестонова Е.А.* Механическая прочность почвенной структуры взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 060103. М., 2007. 28 с.
12. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. *Е.В. Шеина*. М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
13. Теории и методы физики почв. Коллективная монография под общей редакцией *Шеина Е.В.* и *Карпачевского Л.О.* М.: Гриф и К. 2007. 616 с.
14. *Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л.* Ополья Центральной России и их почвы. М.: Наука, 1971. 239 с.
15. *Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А.* Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // *Почвоведение*. 2019. № 3. С. 335–347. DOI: [10.1134/S0032180X19030031](https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031).
16. *Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В.* Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического рассева // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2019. Вып. 96. С. 149–177. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177).
17. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Бутылкина М.А., Шейн Е.В., Дембовецкий А.В.* Практикум по физике твердой фазы почв. М.: “Буки Веди”, 2022. 132 с.
18. *Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А.* Прочность структурных связей в почвенных пастах и агрегатах в зависимости от влажности // *Почвоведение*. 2007. № 11. С. 1330–1335.
19. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Интерпретация данных агрегатного состава Типичных черноземов разного вида использования Методами кластерного анализа и главных компонент // *Почвоведение*. 2016. № 9. С. 1093–1100.
20. *Шейн Е.В., Кириченко А.В., Бутылкина М.А., Буева Ю.Н.* Закономерности распределения почвенно-генетических и физических свойств комплекса серых лесных почв Владимирского ополья // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2002. № 4. С. 17–24.
21. *Шейн Е.В., Кирюшин В.И., Корчагин А.А., Мазиров М.А., Дембовецкий А.В., Ильин Л.И.* Оценка агрономической однородности и

совместимости почвенного покрова Владимирского Ополя // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1208–1215.

22. Юдина А.В., Милановский Е.Ю. Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 3–20. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-3-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-3-20).

23. Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлев Ю.А., Филиппов Н.В., Ковда И.В., Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371.

24. Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S. Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability // Geoderma. 2022. Vol. 415. P. 115–177.

REFERENCES

1. Alifanov V.M., Gugalinskaya L.A., Ovchinnikova A.Yu., *Paleokriogenez i raznoobrazie pochv tsentra Vostochno-Evropeiskoi ravniny* (Paleocryogenesis and diversity of soils in the center of the East European Plain), Moscow: GEOS, 2010, 160 p.
2. Arkhangel'skaya T.A., Prokhorov M.V., Mazirov M.A., Godovaya dinamika temperatury pakhotnykh pochv paleokriogennykh kompleksov Vladimirsogo Opol'ya (Annual temperature dynamics of arable soils of Vladimir Opolye paleocryogenic complexes), *Kriosfera Zemli*, 2008, Vol. XII, No. 3, pp. 80–86.
3. Velichko A.A., Morozova T.D., Berdnikov V.V., Gubonina Z.P., Khalcheva T.A., Markova A.K., *Evolutsiya prirody v periglyatsial'noi zone Evropy v chetvertichnoe vremya, Geomorfologiya i paleogeografiya* (Evolution of nature in the periglacial zone of Europe in the Quaternary), Matly VI S'ezda Geograf. o-va SSSR, Moscow: In-t geografii AN SSSR, 1975, pp. 41–44.
4. Vinokurov I.Yu., Okorkov V.V., Chernov O.S., Vliyanie re'efa na sodержanie gumusa, elementov pitaniya i vodoprochnykh agregatov v serykh lesnykh pochvakh Vladimirsogo Opo'ya (Relief impact on content of humus, nutrients and water stable aggregates in gray forest soils of Vladimir Opolye), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, No. 1, pp. 30–38.
5. Zinchenko S.I., Vliyanie priemov osnovnoi obrabotki na strukturu seroi lesnoi pochvy v agroekosistemakh pri vozdeleyvanii ozimoi rzhii (The influence of primary tillage techniques on the structure of gray forest soil in

agroecosystems during winter rye cultivation), *Vladimirskii zemledelets*, 2019, No. 3, pp. 4–7.

6. Zinchenko S.I., Shchukin I.M., Otsenka antropogennogo vliyaniya na strukturu pochvennogo pokrova agroekosistem Verkhnevolzh'ya (Assessment of anthropogenic impact on the structure of soil cover of upper volga region agroecosystems), *Agrofizika*, 2020, No. 1, pp. 16–23.

7. Makeev A.O., Poverkhnostnye paleopochvy lessovykh vodorazdelov Russkoi ravniny, (Surface paleosols of loess areas in the center of russian plain), *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu*, 2006, Vol. 4, No. 3, pp. 2–468.

8. Meshalkina Yu.L., Samsonova V.P., *Matematicheskaya statistika v pochvovedenii* (Mathematical statistics in soil science.), Moscow: Izd-vo MGU, 200, 84 p.

9. Ovchinnikov A.Yu., Alifanov V.M., Khudyakov O.I., Vliyanie paleokriogeneza na formirovanie serykh lesnykh pochv Tsentral'noi Rossii (The impact of paleocryogenesis on the formation of gray forest soils in central Russia), *Pochvovedenie*, 2020, No. 10, pp. 1170–1181.

10. Okorkov V.V., Granulometricheskii sostav pochv i ego rol' v ustoichivosti k vodnoi erozii (Particle size distribution of soils and its role in resistance to water erosion), *Vladimirskii Zemledelets*, 2010, No. 3, pp. 17–19.

11. Pestonova E.A., *Mekhanicheskaya prochnost' pochvennoi struktury vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoistvami i osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristikoi: Avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Mechanical strength of soil structure relationship with physical properties and main hydrophysical characteristics, Extended abstract of cand. agric. sci. thesis), Moscow, 2007, 28 p.

12. Shein. E.V. (Ed.), *Polevye i laboratornye metody issledovaniya fizicheskikh svoistv i rezhimov pochv: Metodicheskoe rukovodstvo* (Field and laboratory methods for studying the physical properties and regimes of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 200 p.

13. Shein E.V., Karpachevski L.O. (Eds), *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and practices of soils physics), Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.

14. Tyuryukanov A.N., Bystritskaya T.L., *Opol'ya Tsentral'noi Rossii i ikh pochvy* (Opoles of central Russia and their soils), Moscow: Nauka, 1971, 239 p.

15. Filippova O.I., Kholodov V.A., Safronova N.A., Yudina A.V., Kulikova N.A., Mikroagregatnyi, granulometricheskii i agregatnyi sostav gumusovykh gorizontov zonal'nogo ryada pochv evropeiskoi rossii (Particle-Size, Microaggregate-Size, and Aggregate-Size Distributions in Humus Horizons of the Zonal Sequence of Soils in European Russia), *Pochvovedenie*, 2019, No 3, pp. 335–347, DOI: [10.1134/S1064229319030037](https://doi.org/10.1134/S1064229319030037).

16. Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Holub A.P., Yudina A.V., Dry sieving

analysis of soil by vibratory sieve shaker: modification and optimization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 96, pp. 149–177, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177).

17. Khaidapova D.D., Milanovskii E.Yu., Tyugai Z.N., Butylkina M.A., Shein E.V., Dembovetskii A.V., *Praktikum po fizike tverdoi fazy pochv* (Practical course on solid phase physics of soil), Moscow: Buki Vedi, 2022, 132 p.

18. Khaidapova D.D., Pestonova E.A., Prochnost' strukturnykh svyazei v pochvennykh pastakh i agregatakh v zavisimosti ot vlazhnosti (Strength of structural bonds in soil pastes and aggregates depending on moisture content), *Pochvovedenie*, 2007, No. 11, pp. 1330–1335.

19. Kholodov V.A., Yaroslavtseva N.V., Lazarev V.I., Frid A.S., Interpretatsiya dannykh agregatnogo sostava Tipichnykh chernozemov raznogo vida ispol'zovaniya Metodami klasternogo analiza i glavnykh component (Interpretation of data on the aggregate composition of typical chernozems of different types of use using cluster analysis and principal component methods), *Pochvovedenie*, 2016, No. 9, pp. 1093–1100.

20. Shein E.V., Kirichenko A.V., Butylkina M.A., Bueva Ju.N., Zakonomernosti raspredeleniya pochvenno-geneticheskikh i fizicheskikh svoystv kompleksa seryh lesnykh pochv Vladimirskego opol'ya (Patterns of distribution of soil-genetic and physical properties of the gray forest soil complex of Vladimir Opolye), *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2002, No. 4, pp. 17–24.

21. Shein E.V., Kiryushin V.I., Korchagin A.A., Mazirov M.A., Dembovetskii A.V., Il'in L.I., Otsenka agronomicheskoi odnorodnosti i sovmestimosti pochvennogo pokrova Vladimirskego Opol'ya (Evaluation of agronomic homogeneity and compatibility of soil cover of Vladimir Opolye), *Pochvovedenie*, 2017, No. 10, pp. 1208–1215.

22. Yudina A.V., Milanovskiy Ye.Yu., The microaggregate analysis of soils by the method of laser diffraction: the specificities of sample preparation and result interpretation, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, Vol. 89, pp. 3–20, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-3-20](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-3-20).

23. Yudina A.V., Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Churilina N.A., Aleksandrova M.S., Golovlev Yu.A., Filippov N.V., Kovda I.V., Dymov A.A., Milanovskii E.Yu., Puti sozdaniya klassifikatsii pochv po granulometricheskomu sostavu na osnove metoda lazernoi difraktsii, *Pochvovedenie*, 2020, No. 11, pp. 1353–1371.

24. Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S., Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability, *Geoderma*, 2022, Vol. 415, pp. 115–177.