

УДК 631.4

МИКРОАГРЕГАТНЫЙ, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ И АГРЕГАТНЫЙ СОСТАВ ГУМУСОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ЗОНАЛЬНОГО РЯДА ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

© 2019 г. О. И. Филиппова¹, В. А. Холодов^{1,2,*}, Н. А. Сафронова^{1,2},
А. В. Юдина^{1,2}, Н. А. Куликова^{1,3}

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

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

³Институт биохимии РАН им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр
“Фундаментальные основы биотехнологии” РАН, Россия, 119071, Москва, Ленинский пр., 33

*e-mail: vkholod@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2018 г.

После доработки 16.07.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Представлены экспериментальные данные по распределению микроагрегатов и гранулометрических частиц, полученные методом лазерной дифракции, для выборки образцов гумусовых горизонтов зональных почв – от дерново-подзолистых до каштановых, как ненарушенных, так и используемых в сельском хозяйстве. Оценены взаимосвязи между показателями распределения по размерам гранулометрических частиц, микро- и макроагрегатов. Показатели распределений (содержание частиц, их средневзвешенный диаметр) сопоставлены с водоустойчивостью агрегатов, содержанием углерода, азота, фосфора, калия и рН. Показана бимодальность распределения элементарных почвенных частиц в гумусовых горизонтах обыкновенных черноземов. Установлено, что положительная связь между содержанием микроагрегатов и углерода начинает проявляться только при содержании последнего больше 2–3%. Предложен показатель распределения микроагрегатов – минимальный размер устойчивых микроагрегатов, инструментально определяемый методом лазерной дифрактометрии на основании точки пересечения дифференциальных кривых микроагрегатного и гранулометрического составов. Для этого показателя установлено существование отрицательной связи с величиной рН почвы и высказано предположение, что наблюдаемая связь может быть обусловлена, прежде всего, коагуляцией коллоидов при скомпенсированности их заряда.

Ключевые слова: структура почв, метод лазерной дифракции, органическое вещество, водоустойчивость, дерново-подзолистые почвы, серые лесные почвы, черноземы, каштановые почвы, Retisols, Phaeozems, Chernozems, Kastanozems

DOI: 10.1134/S0032180X19030031

ВВЕДЕНИЕ

Применение метода лазерной дифракции (ЛД) для оценки распределения частиц (микроагрегатов и гранулометрических составляющих) почв в начале 80-х гг. прошлого века открыло новые возможности для проведения поиска таких зависимостей благодаря экспрессности и высокой воспроизводимости метода [37]. С момента внедрения ЛД в широкую научную практику получаемые с его помощью данные сопоставляются с полученными традиционными методами, основанными на явлении седиментации [25, 28–30, 36, 37]. Выявлены методические несовпадения, связанные с особенностями подходов. Так, для метода ЛД характерны более низкие значения илистой фракции почв. Предполагают, что наблюдаемые расхождения связаны с отличием формы почвенных

частиц от сферической [30, 36], а также неодинаковой плотностью частиц [24, 25]. Для решения указанных методических проблем необходимо, прежде всего, накопление большого фактического материала. Однако в связи с ограниченной доступностью приборной базы, необходимой для проведения исследований методом ЛД, для российских почв количество данных о гранулометрическом и микроагрегатном составе, полученным этим методом недостаточно.

Структура почвы – это ее физическое строение на уровне горизонта, обусловленное размером, формой, количественным соотношением, характером взаимосвязи и расположением, как элементарных почвенных частиц, так и состоящих из них агрегатов. В качестве основных структурных составляющих, прежде всего, выделяют

гранулометрический, минералогический и агрегатный составы [5]. Структура определяет целый ряд важнейших почвенных свойств и, в конечном итоге, является одним из основных факторов почвенного плодородия [17, 23, 39]. Однако установление взаимосвязей между почвенной структурой и физико-химическими свойствами почвы остается одной из ключевых нерешенных проблем почвоведения в связи с тем, что процесс агрегатообразования в почвах возможен для частиц различного размера и зависит от большого количества факторов [27, 33, 38, 41]. Наиболее сложная картина наблюдается в гумусовых горизонтах (органо-аккумулятивной части профиля) почв, характеризующихся динамичным и комплексным характером факторов, влияющих на процессы структурообразования. Еще одну неопределенность вносит вовлечение почвы в сельскохозяйственную деятельность. В связи с тем, что комплексное взаимодействие факторов трудно оценить, возникает необходимость механистического понимания образования почвенных агрегатов [39]. Основой для данного подхода является поиск зависимости показателей почвенной структуры от других почвенных свойств. Благодаря методу ЛД открылась возможность комплексного и относительно экспрессного изучения структуры на широкой выборке почв. Которое включает в себя сравнительный анализ структуры горизонта на разных уровнях организации почвенного вещества: элементарных почвенных частиц, микро- и макроагрегатах и сопоставление этих структурных характеристик с основными почвенными свойствами.

В связи с этими целями работы было получено методом ЛД экспериментальные данные о распределении по размерам гранулометрических частиц и микроагрегатов для широкой выборки гумусовых горизонтов почв зонального ряда и оценить взаимосвязи между их гранулометрическими, микро- и макроагрегатными характеристиками, а также основными физико-химическими свойствами: содержанием углерода, азота, калия фосфора и рН.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов почв проводили из гумусовых горизонтов почв с глубины 0–20 см. Из пяти индивидуальных образцов, отобранных методом конверта на площадке площадью около 1 м² составляли объединенную пробу из которой получали средний образец [2]. Список исследованных почв и местоположение площадок пробоотбора приведены в табл. 1. Всего было отобрано 14 почвенных образцов из пяти разных почвенно-географических зон; из них 6 образцов целинных почв, 5 – освоенных и 3 – залежных.

Характеристику почв на микроуровне проводили методом ЛД. Были определены гранулометрический и микроагрегатный составы. Для определения микроагрегатного состава образцы почв были аккуратно растерты резиновым пестиком и пропущены через сито 1 мм. Затем их суспендировали в дистиллированной воде (40 мг на 15 мл) взбалтывая на орбитальном шейкере OS-20 (Biosan, Латвия) с частотой 150 мин⁻¹ в течение 80 мин [26]. Для гранулометрического анализа пробу суспендировали (20–30 мг почвы в 15 мл дистиллированной воды) и обрабатывали ультразвуком на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со стандартным наконечником при энергии диспергации 500 Дж/мл. Считается, что такой подход обеспечивает разрушение микроагрегатов до гранулометрических частиц, аналогично химическим реагентам [21].

Анализ размеров частиц (микроагрегатов и гранулометрических) проводили на лазерном дифрактометре Microtrac Bluewave (Microtrac, США). Скорость циркуляции пробы в системе была равна 50% от максимальной (~33 мл/с). Расшифровку дифракционной картины проводили при допущении, что почвенные частицы имеют несферическую форму и являются абсорбирующими. Сравнительная характеристика ЛД-данных микроагрегатного и гранулометрического анализов базировалась на следующих предположениях. После стандартной подготовки к микроагрегатному анализу суспензии содержат не только микроагрегаты, но и элементарные почвенные частицы, находящиеся в почве *a priori* или полученные из неустойчивых к данному виду обработки структурных отдельностей. В таком случае суммарная доля устойчивых микроагрегатов ($\Sigma(M-agp)$, %) отражается площадью области между дифференциальными кривыми распределения частиц по размерам в той части общего диапазона (0.01–1000 мкм), где кривая микроагрегатного состава находится над гранулометрической (рис. 1). В первом приближении оценку такой доли можно осуществить по сумме положительных разностей значений содержания частиц для кривых микроагрегатного и гранулометрического анализов по фракциям фиксированных размеров (им соответствовали размеры частиц, для которых определяется содержание в ходе ЛД эксперимента – в нашем случае 66 значений). Точке пересечения дифференциальных кривых был поставлен в соответствие минимальный размер микроагрегатов, устойчивых к стандартной процедуре механического воздействия (растирание резиновым пестиком) при микроагрегатном анализе. Частицы меньших размеров, предполагалось, находятся либо в форме гранулометрических элементов, либо представлены микро- и наноассоциатами, разрушить которые стандартной обработкой невозможно.

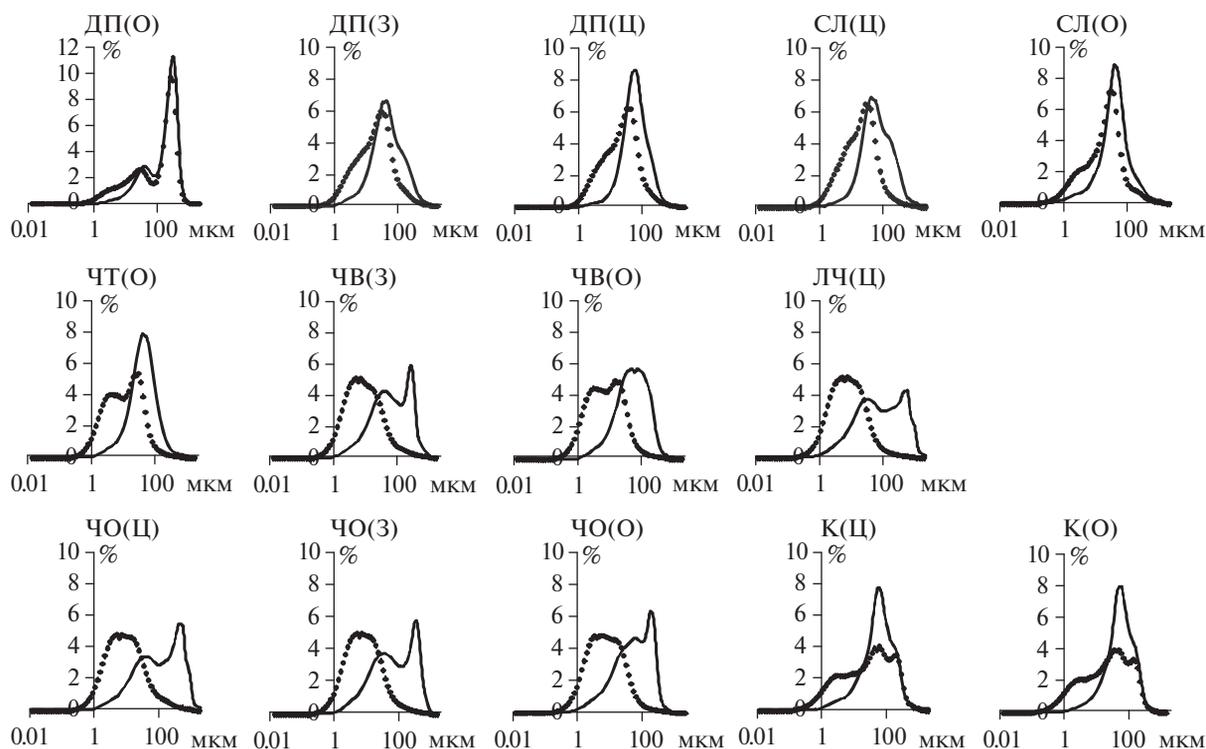


Рис. 1. Распределение микроагрегатов (сплошные линии) и гранулометрических частиц (прерывистые линии) по размерам. Индексы почв даны согласно табл. 1.

Вторым интегральным показателем распределения микроагрегатов был их средневзвешенный диаметр (СВД, мкм), который оценивали по формуле:

$$\text{СВД} = \frac{\sum(a_i m_i)}{\sum m_i},$$

где a_i – диаметр i -фракции (мкм), m_i – ее содержание, %.

Каждой i -фракцией (мкм) при использовании ЛД являлись точки отсчета содержания частиц (всего 66 штук в диапазоне от 0 до 1000 мкм), на основе которых строятся кривые распределения.

Характеристику структуры почвы на макроуровне проводили ситовым анализом (“сухое” и “мокрое” просеивания) согласно общепринятым методикам [4]. Для оценки распределения воздушно-сухих структурных отдельностей естественного сложения их пропускали через сита с диаметрами отверстий 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.25 мм, навески брали 100 г. Для интегральной оценки распределений на основе полученных данных рассчитывали средневзвешенный диаметр агрегатов 0.25–10 мм и содержание агрегатов 0.25–10 мм ($\Sigma(\text{ag})$, %).

Для оценки водоустойчивости использовали подход Хана [20, 22], согласно которому в воде просеивают не весь образец почвы, а агрегаты целевой размерной фракции (обычно 2–1 или 3–1 мм). Целевой фракцией были выбраны агрегаты 2–0.25 мм в связи с тем, что в органогенных гори-

зонтах черноземов во фракции 2–1 мм сосредоточены основные запасы углерода [11]. Более мелкие фракции агрегатов были добавлены для увеличения представительности, в связи с тем, что в дерново-подзолистых и каштановых почвах их содержание было сопоставимо с содержанием фракции 2–1 мм. Методика просеивания в воде в целом была общепринятой [4]. Отличие заключалось в том, что агрегаты предварительно увлажняли для вытеснения из пор воздуха, чтобы избежать разрывов агрегатов при резком погружении в воду сухих отдельностей [23]. Процедура была следующей. Навеску агрегатов помещали на сито, ячейки которого предварительно были увлажнены (для этого сито на 1 мин погружали в дистиллированную воду и доставали, не встряхивая). Дожидались когда вода, удерживаемая между ячейек сита, силами капиллярного поднятия увлажнит навеску агрегатов. Если влаги на ячейках сита было недостаточно, к сетке сита снизу прикладывали переувлажненную фильтровальную бумагу (бумагу погружали в воду, затем давали излишней воде стечь) и достигали увлажнения агрегатов. На основе полученных данных рассчитывали содержание водоустойчивых агрегатов ($\Sigma(\text{водоуст})$, %) и их СВД, мм. Расчет СВД производили аналогично этому показателю для микроагрегатов, только размерность была не микрометры, а миллиметры.

Основные агрохимические характеристики. Кислотность почв определяли согласно методике

Таблица 1. Список отобранных почвенных образцов согласно отечественным и международной классификациям (по [9, 10, 35]) и географические привязки мест пробоотбора

Индекс	Название по [9]	Название по [10]	Название по [35]	Место пробоотбора	Координаты
ДП(О)	Дерново-подзолистая (освоенная) на флювиогляциальных отложениях	Агродерново-подзолистая типичная бескарбонатная малопахотная неглубокоподзолистая супесчаная с средне развитым профилем на флювиогляциальных отложениях	Albic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Differentic, Anthric, Ochric)	Московская обл., Ногинский р-н	55°48.173' N 38°14.908' E
ДП(З)	Дерново-подзолистая (залежь) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Агродерново-подзолистая типичная бескарбонатная малопахотная неглубокоподзолистая среднесуглинистая с средне развитым профилем на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Albic Retisol (Loamic, Agic, Cutanic, Ochric)	Московская обл., Солнечногорский р-н	56°02.058' N 37°09.286' E
ДП(Щ)	Дерново-подзолистая (целинная) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Дерново-подзолистая типичная бескарбонатная мелкая неглубокоподзолистая среднесуглинистая с средне развитым профилем на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Albic Retisol (Loamic, Cutanic, Differentic, Ochric)	Московская обл., Солнечногорский р-н	56°01.893' N 37°09.041' E
СЛ(Щ)	Серая лесная (целинная) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Серая лесная типичная бескарбонатная маломощная среднесуглинистая с глубоко развитым профилем на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Retic Greyzemic Phaeozem (Loamic)	Тульская обл., Щекинский р-н	53°58.439' N 37°09.596' E
СЛ(О)	Серая лесная (освоенная) на покровном суглинке, подстилаемом мореной	Агротерная типичная бескарбонатная среднепахотная среднесуглинистая с глубоко развитым профилем на покровном суглинке, подстилаемом песчаной валунной мореной	Retic Greyzemic Phaeozem (Loamic, Agic)	Тульская обл., Щекинский р-н	53°57.707' N 37°10.077' E
ЧТ(О)	Чернозем типичный (освоенный) на лёссовидном суглинке	Агрочернозем миграционно-мицелиарный карбонатсодержащий мощный глубоко карбонатный тяжелосуглинистый с мощным профилем на лёссовидном суглинке	Нарlic Chernozem (Loamic, Agic, Pachic)	Курская обл., Курский р-н	51°37.046' N 36°15.629' E
ЧВ(Щ)	Чернозем выщелоченный (целинный) на лёссовидном суглинке	Чернозем глинисто-иллювиальный типичный карбонатсодержащий средне-мощный глубоко карбонатный тяжелосуглинистый с глубоко развитым профилем на лёссовидном суглинке	Luvic Chernic Phaeozem (Loamic, Pachic)	Липецкая обл., Данковский р-н	53°29.835' N 38°58.931' E

Таблица 1. Окончание

Индекс	Название по [9]	Название по [10]	Название по [35]	Место пробоотбора	Координаты
ЧВ(О)	Чернозем выщелоченный (освоенный) на лёссовидном суглинке	Агрочернозем глинисто-иллювиальный типичный карбонатсодержащий средне-пахотный глубоко карбонатный тяжелосуглинистый с глубоко развитым профилем на лёссовидном суглинке	Luvic Chernic Phaeozem (Loamic, Aric, Pachic)	Липецкая обл., Данковский р-н	53°28.881' N 38°58.276' E
ЧО(Ц)	Чернозем обыкновенный (целинный) на карбонатном лёссовидном суглинке	Чернозем сегрегационный карбонатсодержащий среднемошный, карбонатный тяжелосуглинистый с мощным профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Endocalcic Chernozem (Loamic, Pachic)	Воронежская обл., Тавловский р-н	51°01.862' N 40°43.565' E
ЧО(З)	Чернозем обыкновенный (залежь) на карбонатном лёссовидном суглинке	Чернозем миграционно-мицелиарный карбонатсодержащий мощный глубоко карбонатный тяжелосуглинистый с мощным профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Endocalcic Chernozem (Loamic, Pachic)	Воронежская обл., Тавловский р-н	51°01.879' N 40°43.708' E
ЧО(О)	Чернозем обыкновенный (освоенный) на карбонатном лёссовидном суглинке	Агрочернозем сегрегационный карбонатсодержащий среднепахотный карбонатный тяжелосуглинистый с мощным профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Endocalcic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)	Воронежская обл., Тавловский р-н	51°01.850' N 40°43.514' E
ЧЛ(Ц)	Лугово-черноземная солонцеватая (целинная) на карбонатном лёссовидном суглинке	Чернозем глубоко-квасиглееватый карбонатсодержащий среднемошный среднекарбонатный легкосуглинистый с мощным профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Haplic Chernozem (Clayic, Protosodic, Stagnic)	Воронежская обл., Бобровский р-н	51°07.344' N 40°22.089' E
К(Ц)	Каштановая (целинная) на карбонатном лёссовидном суглинке	Каштановая типичная карбонатсодержащая маломощная высококарбонатная среднесуглинистая с глубоко развитым профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Haplic Kastanozem (Loamic) (fallow land)	Волгоградская обл., Иловлинский р-н	49°05.445' N 44°08.855' E
К(З)	Каштановая (залежь) на карбонатном лёссовидном суглинке	Каштановая турбированная карбонатсодержащая среднепахотная высококарбонатная среднесуглинистая с глубоко развитым профилем на карбонатном лёссовидном суглинке	Eutric Cambisol (Loamic, Protocalcic)	Волгоградская обл., Иловлинский р-н	49°06.658' N 44°07.307' E

Таблица 2. Основные агрохимические показатели почв (среднее \pm стандартное отклонение, $n = 3$)

Почва	рН	K ₂ O	P ₂ O ₅	C*	N*
		мг/кг почвы		%	
ДП(О)	5.3 \pm 0.1	46 \pm 0.1	175 \pm 2	1.83	0.12
ДП(З)	4.8 \pm 0.1	75 \pm 1	49 \pm 5	2.88	0.21
ДП(Ц)	5.2 \pm 0.1	44 \pm 1	126 \pm 12	3.34	0.22
СЛ(Ц)	5.8 \pm 0.1	198 \pm 2	31 \pm 4	4.07	0.30
СЛ(О)	6.5 \pm 0.04	249 \pm 2	207 \pm 7	1.88	0.13
ЧТ(О)	6.2 \pm 0.1	96 \pm 3	91 \pm 7	3.85	0.30
ЧВ(Ц)	6.2 \pm 0.03	197 \pm 1	612 \pm 29	6.20	0.51
ЧВ(О)	7.5 \pm 0.03	133 \pm 9	41 \pm 3	4.50	0.45
ЧО(Ц)	6.7 \pm 0.04	552 \pm 3	132 \pm 5	7.48	0.57
ЧО(З)	6.7 \pm 0.02	123 \pm 3	55 \pm 6	5.98	0.49
ЧО(О)	7.2 \pm 0.01	209 \pm 3	194 \pm 5	4.72	0.39
ЛЧ(Ц)	6.7 \pm 0.1	90 \pm 7	15 \pm 6	6.16	0.51
К(Ц)	7.6 \pm 0.1	348 \pm 9	289 \pm 4	1.98	0.2
К(З)	8.2 \pm 0.1	125 \pm 9	72 \pm 11	0.88	0.11

* Измерения были проведены без повторов

определения рН водной почвенной суспензии [19]. Измерения проводили на приборе Hanna Microprocessor pH Meter рН 211, электрод HI 1230 (Hanna Instruments Inc., США). Содержание углерода (С) и азота (N) в почве определяли каталитическим сжиганием при 960°C [34] в токе кислорода на элементном анализаторе Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия). Содержание подвижных форм фосфора и калия в образцах дерново-подзолистых почв оценивали методом Кирсанова в модификации ЦИНАО [8]. Определение содержания подвижных форм фосфора и калия в образцах серых лесных почв и черноземов, каштановых почв и черноземно-луговой почвы проводили методом Чирикова в модификации ЦИНАО [7]. При определении фосфора измерения оптической плотности растворов проводили на спектрофотометре 512 UV/Vis Spectrophotometer PortLab (Portlab, Великобритания) при длине волны 710 нм. Содержание подвижных форм калия определяли на пламенном фотометре LEKI FP 640 (LEKI Instruments, Финляндия) при длине волны 766 нм.

Статистическая обработка данных включала расчет среднего и стандартного отклонения. Для установления взаимосвязей между почвенными характеристиками использовали корреляционный анализ. Все расчеты проводили в Excel 2003.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства исследованных почв. Характеристика отобранных почвенных образцов (табл. 2) показала, что основные агрохимические показатели являются типичными для представленных зональных почв [18].

Почвы сформированной выборки характеризуются широким разбросом значений рН (4.8–

8.2) и содержанием подвижного калия (44–552 мг K₂O/кг почвы), доступного фосфора (15–612 мг P₂O₅/кг почвы), С (0.88–6.20%) и N (0.11–0.57%), что обусловлено различным генезисом и видом использования исследуемых почв.

В связи с тем, что до сих пор не существует специально разработанной для метода ЛД классификации почв по гранулометрическому составу, исследованные образцы почв были отнесены к градациям по классификации Качинского с учетом типа почвообразования [4]. Известно, что расхождения между результатами ЛД и методами, основанными на седиментометрии, заключаются в содержании илистой фракции [28–30]. Так как классификация Качинского построена на содержании физической глины (<10 мкм), предполагали, что изменение градации из-за специфики получаемого методом ЛД распределения части по размерам маловероятно [24]. Результаты классификации почв по гранулометрическому у составу приведены в табл. 3.

Как видно из представленных данных, в сформированной выборке почвенных образцов две почвы по гранулометрическому составу представляют собой легкие глины, пять – тяжелые суглинки, шесть – средние суглинки и одна – супесь. Анализ полученных данных показал, что в дерново-подзолистых и серых лесных почвах преобладает фракция крупной пыли (частицы размером 10–50 мкм), и распределения механических элементов в этих почвах мономодальны (рис. 1). Исключение составила дерново-подзолистая супесчаная почва ДП(О), для которой наблюдали второй максимум около 200 мкм (тонкий песок). В случае черноземов распределение гранулометрических частиц было бимодальным с максимумами в области фракции крупной пыли и с дополнительным вторым пиком фракции мелкой пыли (частицы

Таблица 3. Характеристика исследованных почв по гранулометрическому составу (среднее \pm стандартное отклонение, $n = 3$)

Почва	Содержание фракций (мкм), %							Градация по Качинскому
	<1	1–5	5–10	10–50	50–250	250–500	500–1000	
ДП(О)	1.2 \pm 0.2	9.4 \pm 0.9	6.6 \pm 0.6	25.0 \pm 3.4	40.6 \pm 0.8	16.4 \pm 5.6	0.8 \pm 0.3	Супесь
ДП(З)	1.1 \pm 0.3	17.5 \pm 0.3	13.8 \pm 0.1	48.1 \pm 0.1	17.6 \pm 0.1	1.3 \pm 0.1	0.5 \pm 0.0	Средний суглинок
ДП(Ц)	1.4 \pm 0.1	18.1 \pm 1.0	13.7 \pm 0.4	47.4 \pm 0.7	17.4 \pm 0.9	1.4 \pm 0.2	0.5 \pm 0.1	Средний суглинок
СЛ(Ц)	1.1 \pm 0.3	17.9 \pm 0.6	15.7 \pm 0.3	50.2 \pm 0.9	13.4 \pm 0.6	1.2 \pm 0.1	0.4 \pm 0.1	Средний суглинок
СЛ(О)	3.3 \pm 0.2	17.1 \pm 0.4	11.5 \pm 0.1	52.9 \pm 0.5	13.2 \pm 0.4	1.4 \pm 0.4	0.5 \pm 0.2	Средний суглинок
ЧТ(О)	4.2 \pm 0.1	28.8 \pm 0.9	15.3 \pm 0.2	42.0 \pm 0.3	8.8 \pm 0.8	0.7 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	Тяжелый суглинок
ЧВ(Ц)	3.9 \pm 0.1	33.0 \pm 0.5	19.5 \pm 0.2	34.3 \pm 0.2	7.8 \pm 0.4	1.0 \pm 0.1	0.5 \pm 0.0	Тяжелый суглинок
ЧВ(О)	4.6 \pm 0.2	31.8 \pm 0.8	16.9 \pm 0.3	38.5 \pm 0.2	7.2 \pm 0.5	0.7 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	Тяжелый суглинок
ЧО(Ц)	4.1 \pm 0.1	31.4 \pm 0.6	18.4 \pm 0.4	35.0 \pm 0.5	9.3 \pm 0.6	1.2 \pm 0.2	0.5 \pm 0.0	Тяжелый суглинок
ЧО(З)	4.7 \pm 0.1	33.8 \pm 0.1	19.5 \pm 0.1	33.9 \pm 0.3	6.8 \pm 0.1	0.8 \pm 0.0	0.4 \pm 0.0	Тяжелый суглинок
ЧО(О)	6.3 \pm 0.3	35.8 \pm 1.1	18.9 \pm 0.1	33.1 \pm 0.8	5.0 \pm 0.4	0.6 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	Легкая глина
ЛЧ(Ц)	4.9 \pm 0.1	35.3 \pm 0.5	20.4 \pm 0.1	33.5 \pm 0.1	5.0 \pm 0.3	0.6 \pm 0.1	0.3 \pm 0.1	Легкая глина
К(Ц)	5.4 \pm 0.5	17.7 \pm 0.9	9.2 \pm 0.2	28.5 \pm 0.2	31.7 \pm 0.8	6.4 \pm 1.7	1.0 \pm 0.2	Средний суглинок
К(З)	5.4 \pm 0.5	16.5 \pm 1.4	8.9 \pm 0.4	33.8 \pm 3.0	31.9 \pm 0.9	2.9 \pm 1.4	0.6 \pm 0.2	Средний суглинок

1–5 мкм). В каштановых почвах наблюдали мономодальные распределения элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) и преобладание размеров 10–50 и 50–250 мкм, то есть фракций крупной пыли и тонкого песка. Таким образом, во всех почвах было показано преобладающее содержание фракции крупной пыли, что связано с почвообразующими породами. Известно, что преобладание фракции крупной пыли является типичным для почв, образующихся на покровных и лёссовидных суглинках [15].

Анализ гранулометрического состава на основе дифференциальных кривых распределения ЭПЧ по размерам позволил установить, что преобладание фракции крупной пыли для разных почв обусловлено максимальным содержанием частиц различного размера. В случае дерново-подзолистых почв такими частицами с максимальным содержанием являлись частицы с диаметром ~ 31 мкм, тогда как для серых лесных диаметр таких частиц был чуть меньше и составлял ~ 26 мкм. В черноземах диаметр частиц, содержание которых превалировало во фракции крупной пыли, был еще меньше, и преобладающий диаметр варьировал в диапазоне от 6 до 19 мкм. Исключение составил образец чернозема типичного, где средний диаметр частиц, преобладающих во фракции крупной пыли не отличался от такового для дерново-подзолистых почв ~ 31 мкм. Максимальный диаметр частиц, характерный для фракции крупной пыли, наблюдали в каштановых почвах (~ 44 мкм). Таким образом, использование метода ЛД позволило выявить различия во фракции крупной пыли.

Наряду с установлением диаметра преобладающих в гранулометрическом составе частиц, использование метода ЛД позволило выявить принципиальные отличия в дифференциальных кривых

распределения частиц по размеру и их распределения внутри фракций гранулометрического состава (по Качинскому), получаемых путем суммирования содержания частиц по соответствующим интервалам. Согласно распределению по градациям фракций по Качинскому, гранулометрический состав исследованных черноземов обыкновенных можно охарактеризовать как бимодальный с максимумами в диапазоне мелкой (1–5 мкм) и крупной (10–50 мкм) пыли, дифференциальные кривые этих почв демонстрируют слабое раздвоение пика в диапазоне 3–19 мкм, то есть практически мономодальное распределение с максимумом частиц, диаметр которых соответствует фракции средней пыли в градациях Качинского.

Обработка дифференциальных кривых с помощью вероятностного подхода, предложенного Березиным [3], показала следующее. Часть образцов почв, классифицированных по Качинскому как средние суглинки, по показателю Φ_5 (содержание глинных компонентов, частиц < 5 мкм, %) перешла в группы более легкого гранулометрического состава, что обусловлено, скорее всего, делением Березиным частиц на глинные и песчаные компоненты по граничному значению 5 мкм, а не 10 мкм, как это принято у Качинского. Все исследованные почвы характеризовались значительным содержанием фракции средней пыли (5–10 мкм), по верхней границе размера которой в классификации Качинского происходит разделение на песчаные и глинистые компоненты. Диапазон варьирования этой величины для исследуемых почв составил 7–20%, и уменьшения содержания глинных компонентов на эти величины в ряде случаев оказалось достаточно для того, чтобы гранулометрический состав был классифицирован как более легкий.

По дисперсности глинистых компонентов k все исследуемые почвы относятся к группе мелкопылеватых ($k > 0.4$), а сам диапазон этого показателя лежит в пределах 0.97–1.31, что значительно больше обычно указываемых для почв величин [3]. Обнаруженные разногласия, скорее всего, связаны со значительными расхождениями в содержании ила, определяемыми методами ЛД и седиментометрии [24]. Известно, что содержание ила, определенное методом ЛД, может быть в 5 раз меньше, чем содержание ила, определяемого методами седиментометрии. В качестве одной из возможных причин этого явления исследователи указывают неодинаковость отнесения почвенного органического вещества в этих анализах. При проведении анализов методами ЛД органическое вещество определяется как фракции мелкой и средней пыли, а методами седиментометрии – как ил [24]. Принимая во внимание, что разработанные Березиным градации были основаны на седиментометрических методах анализа, на основании наших результатов можно сделать вывод об ограниченной возможности применения показателя k как функции распределения глинистых компонентов, по крайней мере, для гумусовых горизонтов. Обнаруженное обстоятельство требует дальнейшего изучения с целью адаптации показателя k для результатов, полученных методами, не основанными на седиментации.

По показателю зернистости условнопесчаных компонентов α (медианное значение диаметра песчаных компонентов, мкм) все черноземы относятся к группе среднезернистых. Остальные исследованные почвы классифицированы как незернистые или тонкозернистые. По отсортированности песчаных компонентов n почвы принадлежат к группе неотсортированных или слабоотсортированных.

Полученные значения показателей гранулометрического состава k и α обусловлены, по-видимому, суглинистым характером почвообразующих пород исследованных почв, а n – тем, что образцы отобраны из гумусового горизонта, где практически отсутствуют процессы, приводящие к выраженной дифференциации песчаных ЭПЧ.

Минимальные значения медианы диаметра песчаных частиц физического песка по [3] α были характерны для черноземов (16–21 мкм), максимальные – для дерново-подзолистых почв (27–113 мкм). Таким образом, проведение гранулометрического анализа методом ЛД с привлечением оценки по Березину позволило установить, что в исследованных черноземах песчаные компоненты представлены ЭПЧ меньшего размера, чем в дерново-подзолистых почвах. Для установления общности полученной закономерности необходимо накопление дополнительных экспериментальных данных с большим количеством почв.

По показателям Ф5, k и n закономерностей для исследованных почв установлено не было.

Агрегатное состояние почв. Анализ агрегатного состояния почв на макроуровне (табл. 4) показал, что СВД по данным “сухого” просеивания лежат в диапазоне 2.0–6.4 мм, достигая минимального значения для каштановой целинной почвы, а максимального – для чернозема типичного целинного.

СВД воздушно-сухих агрегатов в целом отражали особенности зональных почв и их вида использования. Они были меньше в каштановых и дерново-подзолистых почвах (1.8–3.7 мм) и больше в черноземах и черноземных почвах (2.3–4.4 мм). В большинстве обрабатываемых почвах (за исключением серой лесной) этот показатель был меньше чем в ненарушенных аналогах. Содержание агрономически ценных воздушно-сухих агрегатов было больше в черноземах, по сравнению с другими почвами, однако оно варьировало в более широких пределах – от 45% в обрабатываемом типичном черноземе до 99% в целинном обыкновенном. Низкое значение этого показателя в черноземе пашни, вероятно, объясняется высокой долей глыбистых отдельностей (> 10 мм), что связано с интенсивным использованием и переуплотнением [13]. В целом, показатели сухого ситового анализа соответствуют данным, приведенным в литературе [12–14, 16].

Характеристики водоустойчивых агрегатов отражают особенности использования почв и их зональную принадлежность. СВД водоустойчивых агрегатов больше в черноземах и в ненарушенных почвах по сравнению с обрабатываемыми аналогами. Исключение составил типичный обрабатываемый чернозем, установленные низкие значения СВД водоустойчивых агрегатов для которого, по-видимому, можно объяснить высокими антропогенными нагрузками.

Микроагрегатный анализ показал, что, как и в случае гранулометрического состава, распределение частиц может быть как моно-, так и бимодальным. При этом в отличие от гранулометрического состава для микроагрегатов на выборке исследованных почв была установлена следующая закономерность: в почвах среднесуглинистого состава (по Качинскому) распределение микроагрегатов по размеру всегда мономодальное, а в почвах с более легким или тяжелым составом может быть как моно-, так и бимодальным.

Наибольшее содержание микроагрегатов наблюдали для черноземов и черноземных почв (45–56%), что согласуется с существующими представлениями о высокой микроагрегированности структуры черноземов [14]. Минимальное значение этого показателя наблюдали для дерново-подзолистой освоенной почвы – ДП(О) – 14%, что отражает ее легкий гранулометрический состав (единственная супесь в выборке). Для СВД микроагрегатов, лежа-

Таблица 4. Интегральные характеристики агрегатного и микроагрегатного состояния исследованных почв и взаимосвязи между ними

Почва	Макроагрегаты естественного сложения		Водоустойчивые макроагрегаты во фракции 2–0.25 мм		Микроагрегаты	
	СВД(аг), мм	Σ (аг), %	СВД(водоуст), мм	Σ (водоуст), %	СВД(М-агр), мкм	Σ (М-агр), %
ДП(О)	3.6	44	0.23	31	200	14
ДП(З)	2.9	63		Не опр.	97	29
ДП(Ц)	3.7	70		Не опр.	88	36
СЛ(Ц)	2.9	79	0.65	79	101	39
СЛ(О)	4.0	62	0.31	46	67	25
ЧТ(О)	4.3	45		Не опр.	73	45
ЧВ(Ц)	4.4	74	1.03	88	144	52
ЧВ(О)	2.3	79	0.41	68	91	51
ЧО(Ц)	3.4	99	0.87	89	247	56
ЧО(З)	2.5	88		Не опр.	180	54
ЧО(О)	3.1	82	0.46	70	94	55
ЛЧ(Ц)	3.3	89		Не опр.	211	56
К(Ц)	1.8	69	0.47	67	95	25
К(З)	2.0	63	0.26	40	103	29
Коэффициенты корреляции*						
СВД(аг), мм	1.00					
Σ (аг), %	–0.20	1.00				
СВД(водоуст), мм	0.37	0.78	1.00			
Σ (водоуст), %	0.59	0.59	0.90	1.00		
СВД(М-агр), мкм	0.24	0.65	0.68	0.82	1.00	
Σ (М-агр), %	0.02	0.80	0.40	0.18	0.31	1.00

* Значимые при $\alpha = 0.05$ коэффициенты корреляции для соответствующих рядов выделены жирным шрифтом.

шего в диапазоне 67–247 мкм, можно отметить тенденцию к большему размеру микроагрегатов в необрабатываемых почвах. Корреляционный анализ интегральных показателей агрегатного и микроагрегатного состава позволяют выявить ряд закономерностей. СВД водоустойчивых агрегатов тем больше, чем больше общая сумма агрегатов, оцениваемая воздушно-сухим просеиванием. Этот показатель демонстрирует прямую положительную связь и с суммой водоустойчивых агрегатов и с СВД микроагрегатов. СВД микроагрегатов положительно коррелирует с содержанием агрегатов, определяемых как просеиванием на воздухе, так и в воде. Сумма микроагрегатов (Σ (М-агр)) демонстрирует тесную корреляцию с содержанием воздушно-сухих агрегатов в почве. Наблюдаемую тенденцию можно охарактеризовать так: чем крупнее микроагрегаты и чем их больше, тем лучше структурные показатели почвы на макроуровне. Предположительно, с одной стороны, крупные микроагрегаты, сцепляясь между собой внутри макроагрегатов, формируют пространство, резистентное к разрушающему действию воды, поддерживая таким образом водоустойчивость и, с другой стороны, их размеры связаны со слаборазложившимся органическим веществом и имеют размер больше 50 мкм, которое само по себе является хорошим клеящим агентом для макроагрегатов и, кроме то-

го, оно – субстрат для микроорганизмов, продуцирующих вещества, поддерживающие водоустойчивость макроагрегатов [41].

В исследованной выборке преобладали суглинистые почвы, вероятно, указанные взаимосвязи будут иными в почвах более легкого (супесчаного) и тяжелого (глинистого) составов.

Полученные результаты хорошо согласуются с существующими положениями о важной роли микроагрегатного состава в определении устойчивости структуры гумусовых горизонтов почв на макроуровне [23].

Связь микроагрегатного состава гумусовых горизонтов почв с гранулометрическим составом и некоторыми агрохимическими свойствами. В настоящее время размер частиц, определяющий нижнюю границу размеров микроагрегатов, не определен и различается в разных школах. В российском почвоведении обычно определяют микроагрегаты как агрегаты <250 мкм, что меньше, чем использованная верхняя граница ЛД (1000 мкм); при этом для нижней границы микроагрегатов допускаются размеры вплоть до 1 мкм [5]. Тисдал и Оадес [42] в своей классической работе, посвященной организации почвенной структуры, определяют нижнюю границу микроагрегатов в 20 мкм, привязывая ее к верхней границе выделения илистой фракции, согласно австралийской классификации. На той же

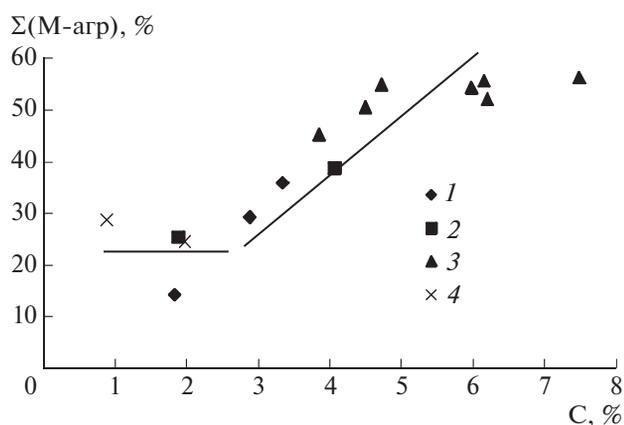


Рис. 2. Зависимость суммы микроагрегатов ($\Sigma(M\text{-агр})$, %) от содержания углерода (С, %) в зональных почвах. Цифрами обозначены: 1 – дерново-подзолистые, 2 – серые лесные, 3 – черноземы, 4 – каштановые почвы.

основе в классификациях США и Франции нижняя граница микроагрегатов определяется как 50 и 53 мкм соответственно, а в Германии – 63 мкм [43]. В последнее время на уровне микроагрегатов предложено различать: связывающие агенты (в том числе и композитные) – меньше 2 мкм, мелкие микроагрегаты 2–20 мкм и крупные микроагрегаты 20–250 мкм [43].

Разночтения при определении нижней границы размера микроагрегатов связаны с трудностью разделения и количественного учета в тонких фракциях почвы микроагрегатов и ЭПЧ. Поэтому нижнюю границу размеров микроагрегатов условно проводят по размерам частиц илистой фракции [43]. Однако верхние границы илистой фракции различны в разных классификациях и научных школах. Это затруднение вызвано массовым применением ранее седиментометрического метода разделения и количественного учета частиц, который в отличие от метода ЛД не позволяет оценивать распределение частиц с должной дискретностью.

Альтернативным подходом установления минимально размера неразрушаемых микроагрегатов может быть предложенное инструментальное определение этого показателя путем нахождения точки пересечения дифференциальных кривых микроагрегатного и гранулометрического анализов.

Для установления связей между микроагрегатным составом и свойствами почв проводили корреляционный анализ представленных данных. Расчеты показали, что на основании полученного блока данных выявляются значимые ожидаемые связи между содержанием микроагрегатов и такими переменными, как содержание С ($r = 0.90$) и N ($r = 0.74$). Также установлена связь содержания микроагрегатов с показателями гранулометрического состава: положительная с содержанием фракций ЭПЧ 5–10 мм ($r = 0.96$) и отрицатель-

ная – с содержанием фракций 50–250 мкм ($r = -0.88$), 250–500 мкм ($r = -0.68$) и 500–1000 мкм ($r = -0.70$). Это согласуется с известными представлениями о роли органического вещества [41, 45] и мелкодисперсных фракций [23] в формировании структуры почвы и указывает на то, что составленная для анализа выборка почв была достаточно представительной и соответствующей цели исследования.

Следует подчеркнуть, что выраженная зависимость содержания микроагрегатов от содержания углерода начинает проявляться только после достижения этим показателем 2–3% (рис. 2). Это хорошо согласуется с существующими представлениями о том, что почвенное органическое вещество и, в частности, гуминовые вещества, начинают действовать как почвенный клей только после того, как его содержание в почве превысит 2–3% [1]. При этом после примерно 5.5% содержания углерода зависимость становится менее выражена. Вероятно, имеет место насыщение: дальнейшее увеличение содержания органического вещества, с одной стороны, не дает выраженного эффекта, с другой, в почвах не может образовываться микроагрегатов больше определенного предела, связанного, по-видимому, с гранулометрическим составом.

Наряду с ожидаемыми зависимостями микроагрегатного состава от почвенных свойств, были обнаружены и другие взаимосвязи, представляющие, на наш взгляд, интерес с точки зрения их дальнейшего изучения для понимания процессов формирования структуры почвы. В частности, для исследуемого ряда почв установлено, что содержание микроагрегатов связано отрицательной линейной взаимосвязью с СВД ЭПЧ ($r = -0.81$) и медианным диаметром частиц физического песка по [3] в виде показателя α ($r = -0.66$). Первая взаимосвязь отражает участие тонкодисперсных компонентов в образовании макроагрегатов: чем меньше размер ЭПЧ, тем большее количество микроагрегатов они могут образовать. Вторая корреляция отражает схожие взаимосвязи: чем крупнее песок, тем меньше микроагрегатов образуется.

Установлена обратная линейная взаимосвязь между рН почв и минимальным размером неразрушаемых микроагрегатов ($r = -0.72$). Ранее взаимосвязь между уровнем рН и показателями почвенной структуры была показана в ряде работ [33, 40]. В частности, Секварис с соавт. [40] показали, что при подщелачивании в гумусовых горизонтах может происходить стабилизация почвенных коллоидов, что приводит к разрушению агрегатов. Ими высказано предположение, что наблюдаемый феномен обусловлен электростатической стабилизацией отрицательно заряженных почвенных первичных частиц (как оксигидроксидов металлов, так и глин) вследствие сорбции на них

почвенного органического вещества. Однако, согласно классическим представлениям о коллоидной стабильности, все коллоидные системы стремятся к уменьшению свободной поверхностной энергии за счет сокращения удельной поверхности коллоидных частиц, что реализуется путем их объединения, то есть коагуляции: чем в более крупные агломераты слипаются коллоидные частицы, тем большего уменьшения свободной энергии достигает система. Поэтому если нет факторов, препятствующих коагуляции частиц (например, электростатической стабилизации), то при коагуляции частиц образуются частицы большого размера, что, в конечном итоге, приводит к седиментации.

С другой стороны, согласно теории агрегативной устойчивости лиофобных дисперсных систем, разработанной Б.В. Дерягиным и Л.Д. Ландау, а позже Е. Фервеем и Дж. Овербеком (теория ДЛФО), коагуляция частиц зависит от соотношения сил отталкивания и притяжения, обусловленных разницей между рН почвенной суспензии и рН, соответствующего точке нулевого заряда на поверхности минералов почвенных частиц [33]. При увеличении этой разницы стабильность почвенных коллоидов возрастает, а при уменьшении, соответственно, становится меньше. Поэтому полагают, что рост стабильности почвенных коллоидов при росте рН почвенной суспензии происходит вследствие усиления сил отталкивания из-за повышения поверхностного отрицательного заряда. Напротив, уменьшение рН почвенной суспензии приводит к возрастанию положительного заряда на поверхности частиц, уменьшению поверхностной потенциальной энергии и, как следствие, к потере стабильности и коагуляции. Результаты, подтверждающие данную теорию, были продемонстрированы на чистых глинистых минералах, их смесях и илистой фракции, выделенной из почвы. Исследование коллоидной стабильности чистых каолинита, иллита и монтмориллонита показало, что при увеличении рН возрастает порог их коагуляции, при этом для каолинита и иллита эта зависимость была выражена сильнее, чем для монтмориллонита [41]. Аналогичная зависимость была установлена для смесей иллит-каолинит и иллит-монтмориллонит [32], а также для выделенных из почв илистых фракций [31]. На основании сравнения коллоидной стабильности индивидуальных глин и илистых фракций почв показано, что стабильность последних определяется поведением иллита, независимо от минералогического состава конкретной илистой фракции [31]. Наконец, потеря коллоидной стабильности также может быть обусловлена следующим. При уменьшении значений рН положительно заряженные оксиды Fe и Al могут начать слипаться с отрицательно заряженными глинистыми частицами [44]. Уменьшение коллоидной стабильности при высоких значениях рН может

происходить в присутствии плохо окристаллизованных оксидов Fe и Al при рН в суспензии больше рН их точек нулевого заряда, то есть при рН больше 7 и 6.5 соответственно. Таким образом, установленная в данной работе отрицательная связь между минимальным размером микроагрегата и кислотностью почвы соответствует представлениям о роли коллоидной устойчивости почвенных минералов в образовании микроагрегатов, так как известно, что необходимым этапом формирования почвенных агрегатов является слипание почвенных минеральных коллоидных частиц. Тем не менее, нельзя отрицать того факта, что образование агрегатов в почве происходит под действием целого ряда факторов, взаимодействующих между собой. На микроуровне такими факторами являются разнообразные почвенные клеи (гуминовые вещества, глины, гидроксиды железа и алюминия, карбонат кальция), а на макроуровне – корневая система растений, почвенная фауна (дождевые черви) и почвенная микрофлора. Поэтому очевидно, что только рассмотрение факторов в полном объеме с использованием большой выборки почв, различающихся по своим свойствам, позволит ранжировать эти по факторы по значимости их влияния на почвенную структуру. Экспериментально установленная зависимость между рН и минимальным размером микроагрегата может послужить отправной точкой в теоретических разработках, направленных на понимание процессов формирования микроагрегатов.

Отметим, что такие взаимосвязи, показанные экспериментально и теоретически, в ходе прямого опытного наблюдения были показаны впервые. Это стало возможным благодаря применению метода ЛД и выявления с его помощью разницы в минимальных размерах микроагрегатов. Во многом это повторяет взгляды Гедройца на структуру почвы [6], согласно которым первичные почвенные агрегаты образуются из скоагулированных коллоидов. Концепция неоднократно подвергалась критике, основным аргументом которой было, что коагуляция весьма затруднена в почвенной массе, где подвижность коллоидов, по сравнению с суспензией, сильно ограничена и что агрегаты крупнее 50 мкм в процессе коагуляции образоваться не могут [23]. Основной причиной критики было то, что теория не конкретизировала локализацию процесса на уровне структурной организации почвы. Представленные в работе данные на уровне опытного наблюдения подтверждают теорию, предложенную Гедройцем и развитую Антиповым-Каратаевым [1, 6], на уровне нижней границы микроагрегатов.

ВЫВОДЫ

1. С использованием метода лазерной дифракции на примере выборки почв различных почвен-

но-географических зон показано, что диаметр частиц, преобладающих во фракции крупной пыли в гумусовых горизонтах, уменьшается в ряду: каштановые почвы (~44 мкм) > дерново-подзолистые почвы (~31 мкм) > серые лесные почвы (~26 мкм) > черноземы (~6–19 мкм).

2. Для гумусовых горизонтов черноземов обыкновенных с использованием метода лазерной дифрактометрии показано наличие бимодального распределения ЭПЧ с максимумами в диапазоне мелкой и крупной пыли.

3. С использованием метода лазерной дифрактометрии на примере исследованных почв установлено, что для гумусовых горизонтов черноземов характерны более высокие значения медианы диаметра условно песчаных частиц α по Березину, чем для дерново-подзолистых почв.

4. Выявленная положительная связь между содержанием микроагрегатов в исследованных гумусовых горизонтах почв и содержанием углерода начинает проявляться только при значениях последнего больше 2–3%.

5. Предложен инструментально определяемый параметр распределения микроагрегатов — минимальный размер микроагрегатов, для которого на примере выборки почв различных почвенно-географических зон установлено существование отрицательной связи с величиной рН почвы.

6. Чем крупнее микроагрегаты и больше их количество, тем лучше структурные показатели почвы на макроуровне.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом, грант 16-14-00167 и с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов-Каратаев И.Н., Келлерман В.В., Хан Д.В. О почвенном агрегате и методах его исследования. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 83 с.
2. Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
3. Березин П.Н. Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород // Почвоведение. 1983. № 2. С. 64–73.
4. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
5. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
6. Гедройц К.К. К вопросу о почвенной структуре и сельскохозяйственном ее значении. Избр. научн. тр. / Под ред. А.А. Роде. М.: Наука, 1975. С. 172–183.
7. ГОСТ 26204 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО.
8. ГОСТ 26207 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
9. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
11. Козут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А. Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–562.
12. Кузнецова И.В. Изменения физического состояния черноземов типичных и выщелоченных курской области за 40 лет // Почвоведение. 2013. № 4. С. 434–441.
13. Кузнецова И.В., Азовцева Н.А., Бондарев А.Г. Нормативы изменения физических свойств почв степной, сухостепной, полупустынной зон европейской территории России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2011. № 67. С. 3–19.
14. Кузнецова И.В., Бондарев А.Г. Проблема деградации физических свойств почв России и пути ее решения // Почвоведение. 1999. № 9. С. 1126–1131.
15. Макеев А.О. Пермские палеопочвы в свете общей проблематики палеопочвоведения // Почвоведение. 2012. № 1. С. 111–125.
16. Медведев В.В. Механизмы образования макроагрегатов черноземов // Почвоведение. 1994. № 11. С. 24–30.
17. Медведев В.В. Физические свойства и характер залегания плужной подошвы в разных типах почв // Почвоведение. 2011. № 12. С. 1487–1496.
18. Почвоведение. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.
19. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
20. Хан Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 140 с.
21. Харитонова Г.В., Шеин Е.В., Шестеркин В.П., Юдина А.В., Дембовецкий А.В., Остроухов А.В., Бердников Н.В., Якубовская А.Я. Гранулометрический состав донных отложений р. Буреи района Нижне-Бурейской ГЭС // Вестник Моск. ун-та. 2017. Сер. 17. Почвоведение. № 1. С. 24–34.
22. 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.
23. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
24. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Молов А.З. Гранулометрический состав: роль органического вещества в различиях данных седиментометрического и лазерно-дифракционного методов // Докл. по экологическому почвоведению. 2006. Т. 1. № 1. С. 17–30.
25. Шинкарев А.А., Корнилова А.Г., Трофимова Ф.А., Гордеев А.С., Гиниятуллин К.Г., Лыгина Т.З. Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифракции в анализе гранулометрического состава глинистой фракции почв // Уч. зап. Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2010. Т. 152. № 2. С. 251–260.
26. Юдина А.В., Милановский Е.Ю. Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации ре-

- зультатов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. № 89. С. 3–20.
27. *Asano M., Wagai R.* Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in allophonic Andisol // *Geoderma*. 2014. V. 216. P. 62–74.
 28. *Beuselinck L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L.* Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method // *Catena*. 1998. V. 32(3–4). P. 193–208.
 29. *Buurman P., de Boer K., Pape T.* Laser diffraction grain-size characteristics of Andisols in perhumid Costa Rica: the aggregate size of allophane // *Geoderma*. 1997. V. 78(1–2). P. 71–91.
 30. *Eshel G., Levy G.J., Mingelgrin U., Singer M.J.* Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. V. 68. P. 736–743.
 31. *Goldberg S., Forster H.S.* Flocculation of reference clays and arid-zone soil clays // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1990. V. 54. P. 714–718.
 32. *Goldberg S., Forster H.S., Heick E.L.* Flocculation of illite / kaolinite and illite / montmorillonite mixtures as affected by sodium adsorption ratio and pH // *Clays and Clay Minerals*. 1991. V. 39(4). P. 375–380.
 33. *Huang L.-M., Zhang X.-H., Shao M.-A., Rossiter D., Zhang G.-L.* Pedogenesis significantly decreases the stability of water-dispersible soil colloids in a humid tropical region // *Geoderma*. 2016. V. 274. P. 45–53.
 34. ISO 10694:1995 Soil quality – Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).
 35. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps // FAO. World Soil Resources Reports. 2014. V. 106. 203 p.
 36. *Konert M., Vandenberghe J.* Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction // *Sedimentology*. 1997. V. 44. P. 523–535.
 37. *Loizeau J., Arbouille D., Santiago S., Vernet J.* Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments // *Sedimentology*. 1994. V. 41. P. 353–361.
 38. *Oades J.M., Waters A.G.* Aggregate hierarchy in soils // *Aust. J. Soil Res.* 1991. V. 29. P. 815–828.
 39. *Regelink I.C., Stoof C.R., Rousseva S., Weng L., Lair G.J., Kram P., Nikolaidis N.P., Kercheva M., Banwart S., Comans R.N.J.* Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties // *Geoderma*. 2015. V. 247–248. P. 24–37.
 40. *Séguaris J.-M., Klumpp E., Vereecken H.* Colloidal properties and potential release of water-dispersible colloids in an agricultural soil depth profile // *Geoderma*. 2013. V. 193–194. P. 94–101.
 41. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Tillage Res.* 2004. V. 79. P. 7–31.
 42. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic matter and water-stable aggregates in soils // *J. Soil Sci.* 1982. V. 62. P. 141–163.
 43. *Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehndorff E., Mikutta R., Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I.* Microaggregates in soils // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2018. V. 181(1). P. 104–136.
 44. *Van Olphen van H.* An introduction to clay colloid chemistry. New York: Wiley, 1977. 318 p.
 45. *Yu X., Fu Y., Lu S.* Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy // *European J. Soil Sci.* 2017. V. 68. P. 66–79.

Microaggregate, Primary Particle and Aggregate Size Distribution in the Humus Horizons in Soils of the Zonal Sequence in European Russia

O. I. Filippova^a, V. A. Kholodov^{a, b, *}, N. A. Safronova^{a, b}, A. V. Yudina^{a, b}, and N. A. Kulikova^{a, c}

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

^c*Federal Research Center “Fundamentals of Biotechnology”, Bakh Institute of Biochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

^{*}*e-mail: vkholod@mail.ru*

The paper presents experimental data on the microaggregates and primary particles of granulometric fractions distribution obtained by laser diffraction analysis of the samples taken from humus horizons of zonal soils ranging from Retisols to Kastanozems, both undisturbed and used in agriculture. The relationships between the parameters of the size distribution of aggregates, microaggregates and primary particles have been evaluated. The parameters of the size distribution (content of the particles and mean-weight diameter) and contents of water-stable aggregates, organic carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, and pH were used for correlation analysis. The bimodality of the primary particles distribution in the humus horizons of Endocalcic Chernozems has been demonstrated. A positive linear correlation between the content of microaggregates and that of organic carbon was found to occur only when the latter exceeded 2–3%. An index of the size distribution of microaggregates reflecting the minimum size of microaggregates has been proposed; it can be determined as an intersection point of differential curves of size distribution of microaggregates and primary particles. For this index, a negative correlation with soil pH was discovered; the observed correlation was suggested to be due to colloids coagulation when their electric charge is compensated.

Keywords: soil texture, laser diffraction analysis, soil organic matter, water stability, Retisols, Phaeozems, Chernozems, Kastanozems