

СЕДИМЕНТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЛАЗЕРНАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ ПОЧВ: ПОДХОДЫ К УСТРАНЕНИЮ РАЗЛИЧИЙ В ОПРЕДЕЛЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ГЛИНЫ

Г.Н. Федотов^{1✉}, И.В. Горепекин^{1,2}, О.А. Салимгареева¹,
А.И. Сухарев¹, Ю.П. Батырев³

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения МГУ

²Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

³ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Целью работы являлась разработка высокопроизводительного метода определения гранулометрических фракций, составляющих физическую глину. Предложен подход, основанный на замене данных по илстой фракции, полученных методом лазерной дифрактометрии, на результаты седиментометрического анализа, что, при проверке на литературных данных, позволило повысить коэффициент детерминации при определении содержания физической глины с 0,71 до 0,85. Установлено, что обработка почвенной суспензии ультразвуком в 0,2 н аммиачной воде с последующим центрифугированием обеспечивает эффективное отделение илсто-коллоидной фракции (почвенных гелей) от пылевато-песчаных частиц. Выявлено совпадение количественного содержания илстой фракции (по методу Качинского) и выделенных гелей для различных типов почв, что в сочетании с единым принципом выделения (фракционирование по плотности) позволило идентифицировать их как один почвенный компонент. Предложен комбинированный экспресс-метод, в котором илсто-коллоидная фракция (гели) определяется гравиметрически после ультразвуковой обработки и центрифугирования, а пылевато-песчаная — на лазерном дифрактометре с последующим пересчетом. Рекомендуется использовать предложенный подход для ускоренного определения текстурного класса почв с точностью, сопоставимой с классическим седиментометрическим методом.

Ключевые слова: метод Качинского, лазерная дифрактометрия, илстая фракция почв, текстурный класс почв, почвенные гели

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Салимгареева О.А., Сухарев А.И., Батырев Ю.П. Седиментометрический анализ и лазерная дифрактометрия почв: подходы к устранению различий в определении содержания физической глины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 63–73. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-63-73

Почва имеет многоуровневую структурную организацию и состоит из отдельных почвенных агрегатов размером менее 0,25 мм [1–3], т. е. из обломков пород, частиц песка, глинистых минералов и органического вещества.

Наличие в твердой фазе почв частиц различного размера оценивается по гранулометрическому составу почв [2, 4], т. е. по уровню «базовой структуры». От того, в каком соотношении в почве содержатся крупные и мелкие частицы, зависят ее основные свойства [2, 4–6].

В российской классификации приняты следующие границы размеров фракций [2]:

≤ 1 мкм — ил;

1...5 мкм — мелкая пыль;

5...10 мкм — средняя пыль;

10...50 мкм — крупная пыль;

50...250 мкм — мелкий песок;

250...500 мкм — средний песок;

0,5...1 мм — песок крупный;

≥ 1 мм — гравий.

Частицы размером менее 10 мкм объединены во фракцию физической глины, более 10 мкм — во фракцию физического песка [4]. Эти фракции используются для определения текстурного класса почвы [7]. Выделение фракций гранулометрических элементов позволяет сравнивать и оценивать почвы по гранулометрическому составу.

При разработке высокопроизводительной методики определения гранулометрического состава почв был применен седиментометрический метод [7–10], позволяющий выявить

большой массив данных и связанный с созданием классификации текстурных классов почв [10]. Однако со временем продолжительность и трудоемкость проводимых с его помощью опытов, побудила исследователей к поиску более производительного метода.

В качестве альтернативы была выбран лазерно-дифрактометрический метод, давший возможность значительно повысить скорость определения гранулометрического состава почв [11–16]. Он основан на физическом принципе флуктуации электромагнитных волн [17, 18]. Луч лазера преломляется твердофазными частицами и отклоняется на фиксированные углы, которые зависят от размера и оптических свойств этих частиц. Поскольку индивидуальный размер частиц локализует определенный угол рассеивания, по дифракционной картине можно рассчитать содержание частиц разного размера (в процентах), т. е. определить гранулометрический состав почв. Сходящиеся в одной точке линзы фокусируют рассеянный свет в кольцо на центральной панели, где он фиксируется детектором. Распределение частиц по размерам вычисляется в соответствии с теорией Фраунгофера по единой расчетной процедуре (может также использоваться теория Ми) [18]. Данный метод обладает очень высокой производительностью по сравнению с седиментометрическим методом.

При этом результаты, получаемые с помощью седиментометрического и лазерно-дифрактометрического методов заметно отличаются, особенно по илистой фракции [9, 14], что связано с разными подходами: седиментометрический метод исходит из скорости осаждения частиц, а лазерно-дифрактометрический — из законов оптики. В силу приборных ограничений частицы размером менее 0,3 мкм не фиксируются лазерным дифрактометром [19], а размеры более крупных несферических частиц завышаются, что приводит к увеличению содержания фракции мелкой и средней пыли [8, 20]. Содержание илистой фракции, как следствие, занижается [16].

В работе [21] показано, что большое влияние на определение гранулометрического состава может оказывать гелевая составляющая почв, которая влияет на оба параметра, определяющих седиментацию, — размер частиц и их плотность. В результате частицы, в десятки и сотни раз более крупные, могут оседать со скоростью мелких частиц и попадать в илистую фракцию. Таким образом, лазерно-дифрактометрический метод может занижать количество частиц илистой фракции, а седиментометрический — завышать [14].

Однако седиментометрический метод дает истинные результаты, а лазерно-дифрактометрический — смещенную оценку. Исследователи отмечают [17, 22], что в почвах не соблюдаются базовые критерии, по закону Стокса: плотность частиц неодинакова, а форма не всегда близка к сферической. Если принять, что оценка гранулометрического состава с помощью седиментометрического метода также является смещенной, о чем ранее в литературе было высказано предположение [14], то возможны два варианта действий. Первый — основывается на определении истинного гранулометрического состава и повторном определении всех ранее полученных седиментометрическим методом данных, что практически неосуществимо. Второй вариант заключается в разработке высокопроизводительного метода, позволяющего получать такую же смещенную оценку, как и седиментометрический метод. Этот подход, на наш взгляд, предпочтительнее.

Цель работы

Цель работы — разработка высокопроизводительного метода определения гранулометрических фракций, которые в сумме составляют физическую глину.

Объекты и методы исследования

В работе использовали образцы почв, классификация которых приведена в таблице. Также использовали образцы из гумусоаккумулятивных горизонтов чернозема выщелоченного (Орловская обл.), серой лесной почвы (Тульская обл.) и дерново-подзолистой почвы (Московская обл.).

Седиментометрический анализ. При подготовке образцов к определению гранулометрического состава почв седиментометрическим методом в целях разрушения микроагрегатов до элементарных почвенных частиц использовали 4%-й раствор пиррофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), а также механическое растирание. Навеску почвы 10...20 г помещали в фарфоровую ступку, наливали в стеклянный стаканчик 25 мл 4%-го раствора пиррофосфата натрия. Из него по каплям переносили 10 г раствора в ступку с почвой, растирали почву резиновым наконечником пестика в течение 10 мин. до образования пасты. В пасту доливали оставшийся раствор и растирали до получения однородной массы. Затем добавляли воду до половины объема ступки и оставляли на 10 мин. Готовили цилиндр объемом 1 л, в который сверху устанавливали большую (диаметром около 10 см)

Образцы почв из различных горизонтов, отобранные для исследования

Soil samples from various horizons collected for analysis

Номер образца	Почва	Горизонт	Регион отбора
1	Серая лесная	AU	Тульская область
2		AEL	
3		BEL	
4		BT	
5		BC	
6	Чернозем типичный (пар)	AU	Курская область
7	Чернозем типичный (целина)	AU	
8	Чернозем выщелоченный	AU ₁	Воронежская область
9		AU ₂	
10		BI	
11	Чернозем обыкновенный	0...30	Курская область
12		30...60	
13		60...120	
14	Каштановая почва	AJ	Волгоградская область
15		BMK	
16		CAT	
17		BC	
18	Дерново-подзолистая почва	AU	Московская область
19	Серая лесная почва	AU	Тульская область
20	Чернозем выщелоченный	AU	Орловская область

стеклянную воронку, в воронку помещали сито с размером ячеек 250 мкм. Через 10 мин. суспензию перемешивали стеклянной палочкой, затем переносили в стеклянный цилиндр объемом 1 л, фильтруя через сито с размером ячеек 250 мкм. Ступку над ситом обмывали дистиллированной водой. Готовили тарированные бюксы. Оставшиеся на сите частицы размером более 250 мкм переносили в один из бюксов. Бюкс с частицами выпаривали на песчаной бане с последующей сушкой при температуре 105 °С.

Перенесенную в цилиндр суспензию дополняли дистиллированной водой до объема 1 л, тщательно перемешивали и проводили седиментометрический анализ в соответствии с общепринятой методикой [23].

Лазерно-дифрактометрический анализ.

Поскольку сравнивали стандартные методы определения гранулометрического состава, подготовку образцов к его определению на лазерном дифрактометре осуществляли известным в литературе методом [18]: Ультразвуковая обработка на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D со стандартным наконечником (standard horn tip). Суспензии почв (объемом 15 мл) обрабатывались в течение 2,5 мин.

После этого с помощью лазерного дифрактометра Mastersizer 3000 определяли распределение частиц в суспензии по размерам.

Концентрация суспензии была такой, чтобы светопропускание находилось в диапазоне 10...15 %. Скорость циркуляции растворителя в системе составляла 50 % относительно максимальной, как рекомендует производитель.

Выделение органоминеральных гелей из почв. Для выделения почвенных гелей к 10 г воздушно-сухой почвы добавляли 30 мл 0,2 н раствора аммиачной воды. После этого 1 мин. проводили ультразвуковую обработку. Использовали ультразвуковой диспергатор зондового типа МОД МЭФ 91.1 (Россия). Интенсивность ультразвуковой обработки составляла до 250 Вт/см² при частоте 22 кГц и амплитуде 45 мкм. Затем на центрифуге Eppendorf 5804 с ротором А-4-44 при 1000 об./мин. в пробирках объемом 50 мл осаждали минеральные неколоидные частицы в течение 5 мин.

Результаты и обсуждение

Для проверки предположения о мешающем влиянии илистой фракции на корректное определение гранулометрического состава лазерно-дифрактометрическим методом пересчитали полученные данные, заменив илистую фракцию, полученную на лазерном дифрактометре, на илистую фракцию, полученную седиментометрическим методом. После замены илистой

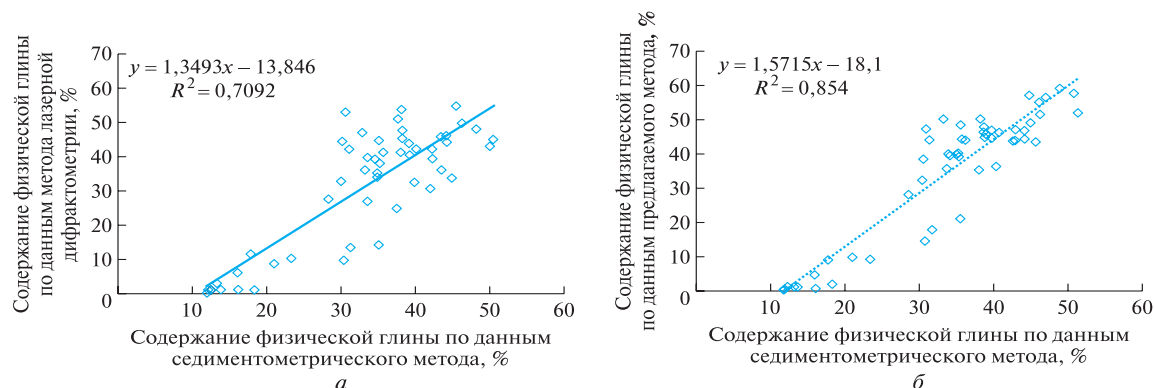


Рис. 1. Содержание физической глины, определенной с помощью лазерного дифрактометра и седиментометрического метода (а), и содержание физической глины, определенное по предлагаемому в работе и седиментометрическому методам (б) (данные по гранулометрическому составу взяты из работ [17, 24–26])

Fig. 1. Content of physical clay determined by laser diffractometry and the sedimentometric method (a), and content of physical clay determined by the proposed method and the sedimentometric method (b) (particle-size distribution data taken from [17, 24–26])

фракции провели пересчет пылевато-песчаных фракций:

1) для перехода от определения объема (в процентах) с помощью лазерно-дифрактометрического метода к расчету массы (в процентах), содержание каждой пылевато-песчаной фракции, полученной этим методом, умножили на среднюю плотность минеральных частиц [2] — 2,65 г/см³;

2) полученные значения содержания пылевато-песчаной фракции для каждого почвенного образца суммировали и приравнивали к доле пылевато-песчаной фракции, которую рассчитывали, вычитая из 100 % долю илистой фракции, полученной седиментометрическим методом;

3) для получения доли каждой фракции в образце почв проводили пересчет по формуле:

выбранная фракция / сумма всех фракций × суммарная доля пылевато-песчаной фракции в образце (%).

В ходе расчетов получали новое распределение частиц, при котором ил был взят из определенного методом седиментации, а каждая пылевато-песчаная фракция, полученная методом лазерной дифрактометрии, пересчитана на основе ила, полученного с помощью седиментометрического метода.

Для проверки корректности предлагаемого пересчета для разных почвенных образцов использовали зависимость содержания физической глины в образцах, определенного седиментометрическим методом от содержания физической глины в образцах, определенного лазерно-дифрактометрическим методом с предлагаемым пересчетом результатов. Данные для

обсчета были взяты из литературных источников [17, 24–26]. Таким образом, предложенный пересчет улучшает корреляцию между значениями содержания физической глины, определенного разными методами, а коэффициент детерминации возрастает с 0,71 до 0,85 (рис. 1). Это означает, что при наличии данных о содержании в почвах илистой фракции, полученных методом, близким к седиментометрическому, можно скорректировать результаты, полученные на лазерном дифрактометре. Как следствие, возникла необходимость производственного метода выделения илистой фракции.

Как отмечено выше, частицы могут попадать в илистую фракцию не только благодаря своим размерам (< 1 мкм), но и из-за плотности, близкой к плотности воды. Об этом, в частности, свидетельствуют данные работы [27], в которой показано, что илистая фракция почв может иметь размеры, исчисляемые десятками микрометров, а их средняя плотность при этом может быть оценена как 1,02 г/см³, т. е. близко к плотности воды. Такие твердообразные системы, возникающие за счет желирования воды при взаимодействии коллоидных частиц или крупных молекул органического вещества, называют гелями [28]. Причем почвенные гели, могут быть армированы неорганическими минеральными частицами [29]. Было показано [30–32], что гели в виде пленок могут размещаться на поверхности минеральных частиц, покрывать и связывать их между собой.

Для отделения илистой фракции (гелей) от поверхности неколлоидных частиц, на которых они находятся, целесообразно использовать ультразвук, который применяют при подготовке

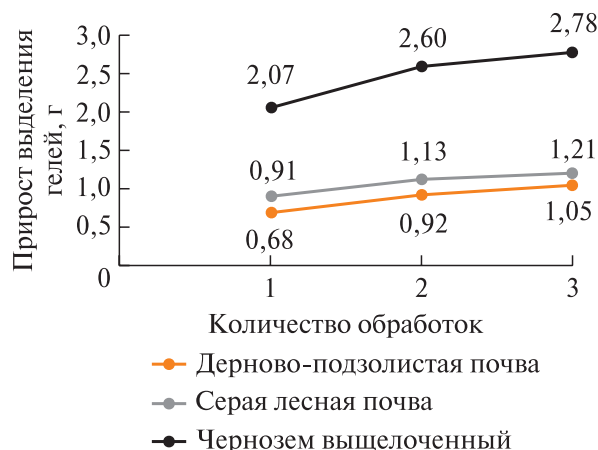


Рис. 2. Влияние количества обработок почвы ультразвуком в аммиачной воде на прирост выделения илистой фракции

Fig. 2. Effect of the number of ultrasonic treatments of soil in aqueous ammonia on the yield of the clay fraction

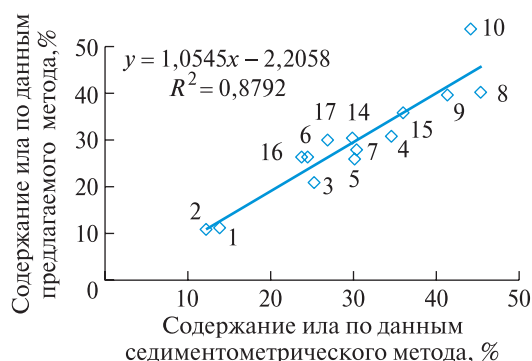


Рис. 3. Корреляция количества ила в почвах, определяемого седиментометрическим методом, и количества гелей, выделяемых по предлагаемому методу (нумерация точек дана в соответствии с таблицей)

Fig. 3. Correlation between the amount of silt in soils determined by the sedimentometric method and the amount of gel extracted by the proposed method (point numbering corresponds to the table)

образцов почв к дифрактометрическому анализу [33–35]. Отметим, что в случае применения седиментометрического метода при подготовке почв к анализу их обрабатывают пирофосфатом натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) [23], который улучшает распад агрегатов частиц и отделение от поверхности частиц гелей за счет увеличения отрицательного заряда поверхности гуминовых веществ и глинистых минералов. Однако пирофосфат натрия создает некоторые сложности при проведении химического анализа фракций, поэтому целесообразно использовать соединение, производные которого разлагаются при

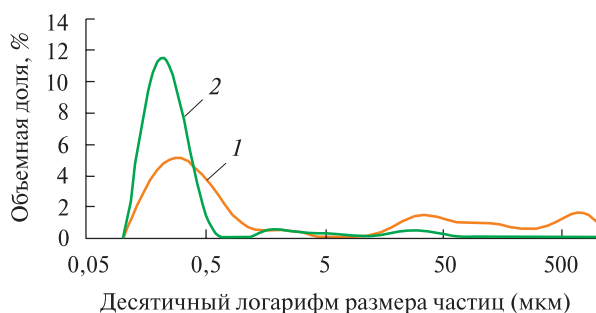


Рис. 4. Распределение частиц по размерам в суспензиях из дерново-подзолистой и серой лесной почв, выделенных предлагаемым методом: 1 — дерново-подзолистая почва; 2 — серая лесная почва

Fig. 4. Particle size distribution in suspensions from sod-podzolic and gray forest soils obtained using the proposed method: 1 — sod-podzolic soil; 2 — gray forest soil

высушивании образцов при нагреве, например, гидроксид аммония (NH_4OH). Отметим, что аммиачную воду используют для диспергации почв наряду с пирофосфатом [4]

В ходе проведенных экспериментов был разработан метод выделения илистой фракции почв (почвенных гелей). Навеску воздушно-сухого почвенного образца помещали в центрифужную пробирку с раствором гидроксида аммония (NH_4OH) и обрабатывали ультразвуком. После этого для отделения пылевато-песчаных фракций от гелевой фракции, находящейся в суспензии, проводили центрифугирование с последующим сливом надосадочной жидкости. Для тщательного удаления илистой фракции с поверхности частиц пылевато-песчаной фракции еще 2 раза доливали в пробирки раствор гидроксида аммония (NH_4OH), проводили обработку ультразвуком и центрифугирование. Три полученные объема суспензии с гелевой фракцией сливали вместе и удаляли воду на песчаной бане с досушкой в термостате при температуре 105°C . Взвешивая стеклянную емкость, в которой оказалась гелевая фракция, по разнице с пустой стеклянной емкостью определяли процентное содержание фракции в 10 г почвы.

Из представленных данных можно сделать вывод о том (рис. 2), что при увеличении количества ультразвуковых обработок — центрифугирований прирост выделяемого ила (гелей) снижается.

Например, если на черноземе, выщелоченном при первой обработке выделяется 2,06 г ила, то при второй — уже 0,53 г (в сумме 2,6 г), а при третьей — 0,28 г, т. е. порядка 90 % ила выделяется уже при двукратной обработке, что позволяет ограничиться двумя выделениями.

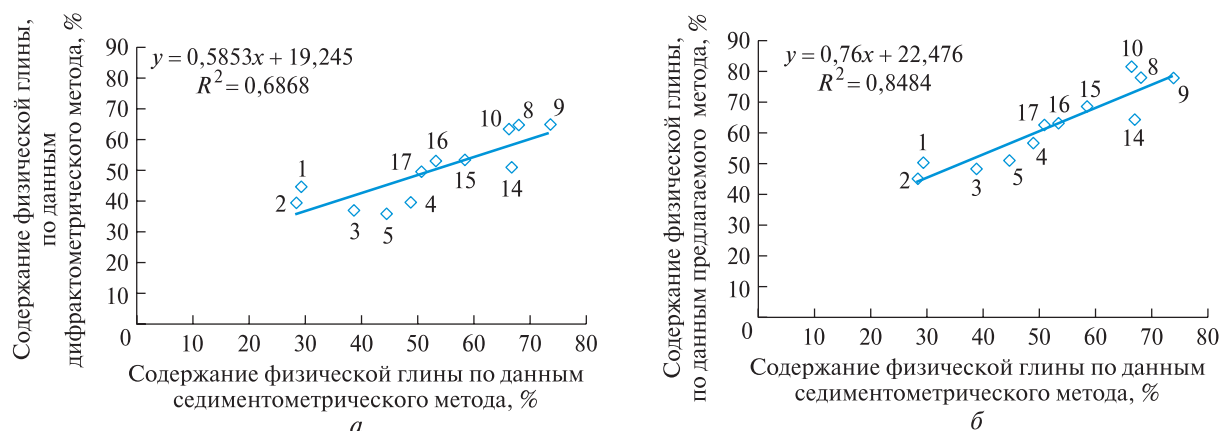


Рис. 5. Содержание физической глины в почвах, определенное седиментометрическим и лазерно-дифрактометрическим методами (а), а также седиментометрическим и предлагаемым методом (б) (нумерация точек дана в соответствии с таблицей)

Fig. 5. Content of physical clay in soils determined by sedimentometric and laser-diffractometric methods (a), and by sedimentometric and the proposed method (b) (point numbering corresponds to the table)

Предложенный метод выделения илистой фракции требовал проверки, которую провели на 14 образцах почв различных типов и горизонтов. Было установлено (рис. 3), что корреляция между количеством ила, выделяемого по предлагаемому методу, и количеством илистой фракции, выделенной седиментометрическим методом, превышает 90 %, а коэффициент детерминации составляет 88 %.

При этом результаты исследования на дифрактометре показывают, что частицы, выделенные из дерново-подзолистой почв и серой лесной, имеют размер десятки и сотни микрон (рис. 4), что на порядки превышает известный размер частиц илистой фракции 1 мкм. То есть фракционирование по плотности, принятое в седиментометрическом методе, не всегда гарантирует выделение частиц нужного размера, что согласуется с данными [27, 31].

Экспресс-метод выделения из почв илистой фракции позволяет разделять почвы на две фракции: илесто-коллоидную и пылевато-песчаную, что дает возможность создать комбинированный высокопроизводительный метод определения содержания физической глины в образцах почв:

1) илесто-коллоидную фракцию определяют в соответствии с предложенным методом, а пылевато-песчаную — на лазерном дифрактометре;

2) данные по илистой фракции, полученные по методу лазерной дифрактометрии, заменяют на данные по илистой фракции, определенные по предложенному методу с поправкой на коэффициенты в уравнении;

3) для перехода от расчета объема в лазерно-дифрактометрическом методе к расчету массы, содержание каждого типа пылевато-песчаной фракции умножают на среднюю плотность минеральных частиц [2] — 2,65 г/см³;

4) полученные значения содержания пылевато-песчаной фракции для каждого почвенного образца суммируют и приравнивают к доле пылевато-песчаной фракции, которую рассчитывают, вычитая из 100 % долю илесто-коллоидной фракции, полученной предлагаемым методом;

5) для получения доли каждой фракции в образце почв проводится пересчет по формуле: выбранная фракция / сумму всех фракций × суммарная доля (%) пылевато-песчаной фракции в образце.

Верификация предложенного метода показала, что наблюдается хорошее совпадение содержания физической глины в образцах почв, определяемое методом седиментации и комбинированным методом (рис. 5). Коэффициент детерминации по сравнению с лазерно-дифрактометрическим методом увеличивается с 0,69 до 0,85. Расширение объемов и размаха выборки позволит с помощью полученной корреляции использовать комбинированный метод для определения текстурных классов, созданных на основе метода седиментации.

Выводы

На основе массива литературных данных по гранулометрическому составу почв показано, что замена значений илистой фракции, полученных методом лазерной дифрактометрии,

на результаты седиментометрического анализа позволяет значительно повысить корреляцию при определении содержания физической глины, а коэффициент детерминации возрастает с 0,71 до 0,85.

Для практической реализации такого подхода предложен экспресс-метод выделения илистой фракции (почвенных гелей), основанный на ультразвуковой обработке почвенной суспензии в 0,2 н растворе аммиачной воды с последующим центрифугированием. Применительно к 14 образцам почв разных типов и горизонтов установлена высокая корреляция между количеством выделенных данным методом гелей и содержанием илистой фракции по классической седиментометрии (коэффициент детерминации превышает 0,88).

На основе предложенного метода выделения илистой фракции разработан комбинированный высокопроизводительный метод: илистая фракция определяется гравиметрически после ультразвуковой обработки и центрифугирования, а пылевато-песчаные фракции — на лазерном дифрактометре с последующим пересчетом объемных процентов в весовые с использованием средней плотности минеральных частиц. Верификация такого подхода на почвенных образцах показала, что содержание физической глины, рассчитанное комбинированным методом, хорошо согласуется с седиментометрическим эталоном (коэффициент детерминации 0,85), что подтверждает его пригодность для практического использования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ст. науч. сотр. Факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова канд. биол. наук З.Н. Тюгай за предоставление почвенных образцов и данных по их гранулометрическому составу.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ № 122011800459-3 «Почвенные биомаркеры: идентификация, устойчивость, активность, возможность использования для мониторинга».

Список литературы

- [1] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils // J. of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [2] Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- [3] Lehdorff E., Rodionov A., Plümer L., Rottmann P., Spiering B., Dultz S., Amelung W. Spatial organization of soil microaggregates // Geoderma, 2021, v. 386, p. 114915.
- [4] Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review // Eurasian soil science, 2018, v. 51, pp. 1326–1347.
- [5] 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, v. 415, p. 115771.
- [6] Шеин Е.В., Мади А.И. Гранулометрический состав почв: методы лазерной дифракции и седиментометрии, их сравнение и использование // Агрохимический вестник, 2018. № 1. С. 9–11.
- [7] Dembovetsky A.V., Tyugai Z.N., Shein E.V. The Granulometric Composition of Soils: History, Development of Methods, Current State, and Prospects // Moscow University Soil Science Bulletin, 2024, v. 79, no. 4, pp. 387–392.
- [8] Taubner H., Roth B., Tippkötter R. Determination of soil texture: Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis // J. of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, v. 172, no. 2, pp. 161–171.
- [9] Yang X., Zhang Q., Li X., Jia X., We X., Shao M.A. Determination of soil texture by laser diffraction method // Soil Science Society of America J., 2015, v. 79, no. 6, pp. 1556–1566.
- [10] Yudina A.V., Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Churilin N.A., Aleksandrova M.S., Golovleva Y.A., Milanovskiy E.Y. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method // Eurasian Soil Science, 2020, v. 53, pp. 1579–1595.
- [11] 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 // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2010. Т. 152. № 2. С. 251–260.
- [12] Arriaga F.J., Lowery B., Mays M.D. A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument // Soil Science, 2006, v. 171, no. 9, pp. 663–674.
- [13] Faé G.S., Montes F., Bazilevskaya E., Año R.M., Kemanian A.R. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods // Soil Science Society of America J., 2019, v. 83, no. 4, pp. 1244–1252.
- [14] Fisher P., Aumann C., Chia K., O'Halloran N., Chandra S. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis // PloS one, 2017, v. 12, no. 5, p. e0176510.
- [15] Šinkovičová M., Igaz, D., Kondrlová E., Jarošová M. Soil particle size analysis by laser diffractometry: Result comparison with pipette method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2017, v. 245, no. 7, p. 072025.
- [16] Tomášová G., Paseka S., Bajer A. Comparison of laser diffractometry and pipetting methods for particle size determination: A pilot study on the implications of result discrepancies on soil classification // Soil Science Society of America J., 2025, v. 89, no. 1, p. e20791.

- [17] Блохин А.Н., Кулижский С.П. Оценка применения метода лазерной дифрактометрии в определении гранулометрического состава почв // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2009. № 1. С. 37–43.
- [18] Юдина А.В. Лазерная дифрактометрия в почвоведении: методические аспекты и диагностическое значение: дис. ... канд. биол. наук, 2018, 251 с.
- [19] Трофимов В.Т., Королев В.А., Николаева С.К. К вопросу об определении гранулометрического состава грунтов с использованием лазерных анализаторов // Инженерные изыскания, 2014. № 5–6. С. 29–37.
- [20] Campbell J.R. Limitations in the laser particle sizing of soils // *Advances in Regolith*, 2003, v. 1, pp. 38–42.
- [21] Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Путляев В.И. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // Почвоведение, 2007. № 3. С. 310–317.
- [22] Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Быкова Г.С., Юдина А.А., Честнова В.В., Ключева В.В. Современные приборные методы исследования гранулометрического состава, реологических характеристик и свойств поверхности твердой фазы почв // Вестник Оренбургского государственного университета, 2015. № 6 (181). С. 151–156.
- [23] Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / под ред. Е.В. Шеина М.: Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
- [24] Кулижский С.П., Коронатова Н.Г., Артымук С.Ю., Соколов Д.А., Новокрещенных Т.А. Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифрактометрии при определении гранулометрического состава почв естественных и техногенных ландшафтов // Вестник Томского государственного университета. Биология, 2010. № 4 (12). С. 21–31.
- [25] Мухаметова Н.В., Абакумов Е.В., Рюмин А.Г. Гранулометрический состав антарктических почв по данным седиментометрии и лазерной дифрактометрии // Агрофизика, 2013. № 3 (11). С. 1–6.
- [26] 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. № 120. С. 107–135.
- [27] Laird D. Nature of clay–humic complexes in an agricultural soil: II. Scanning electron microscopy analysis // *Soil Science Society of America J.*, 2001, v. 65, no. 5, pp. 1419–1425.
- [28] Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 512 с.
- [29] Федотов Г.Н., Добровольский Г.В., Путляев В.И., Гаршев А.В., Иванов В.К., Пахомов Е.И. Гелевые структуры в почвах // Почвоведение, 2006. № 7. С. 824–835.
- [30] Тюлин А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.
- [31] Citeau L., Gaboriaud F., Elsass F., Thomas F., Lamy I. Investigation of physico-chemical features of soil colloidal suspensions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, v. 287, no. 1–3, pp. 94–105.
- [32] Sullivan L.A., Koppi A.J. In-situ soil organic matter studies using scanning electron microscopy and low temperature ashing // *Geoderma*, 1987, v. 40, no. 3–4, pp. 317–332.
- [33] Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Молов А.З. Гранулометрический состав: роль органического вещества в различиях данных седиментометрического и лазерно-дифракционного методов // Доклады по экологическому почвоведению, 2006. Т. 1. № 1. С. 17–30.
- [34] Ryżak M., Bieganski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method // *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, v. 174, no. 4, pp. 624–633.
- [35] Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryżak M., Zaleski T., Beczek M., Bieganski A. Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis // *Geoderma*, 2023, v. 430, p. 116358.

Сведения об авторах

Федотов Геннадий Николаевич✉ — д-р биол. наук, вед. науч. сотр., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», gennadiy.fedotov@gmail.com

Горепекин Иван Владимирович — канд. биол. наук, науч. сотр. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», науч. сотр. Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ, decembrist96@yandex.ru

Салимгареева Ольга Алексеевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», tavtava@yandex.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Сухарев Алексей Игоревич — студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», suharevai@my.msu.ru

Поступила в редакцию 09.09.2025.

Одобрено после рецензирования 06.05.2026.

Принята к публикации 20.08.2026.

SEDIMENTOMETRIC ANALYSIS AND LASER DIFFRACTOMETRY OF SOILS: APPROACHES TO ELIMINATE DIFFERENCES IN DETERMINING PHYSICAL CLAY CONTENT

G.N. Fedotov^{1✉}, I.V. Gorepekin^{1,2}, O.A. Salimgareeva¹,
A.I. Sukharev¹, Yu.P. Batyrev³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

²Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

³BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

When developing new methods for determining particle size distribution in soil, the sedimentometric method is applied as the standard method. They are trying to replace it with a more efficient method of laser diffractometry. It was found that the results obtained by sedimentometric method and laser diffractometry differ markedly from each other, especially in the clay fraction. The aim of the study was to develop a high-performance method for the determining granulometric fractions, which together make up physical clay. Experimentally, it was found that replacing the amount of clay fraction obtained by the laser diffractometry method with a clay fraction determined by sedimentometric method significantly increases the accuracy in determining the textural class of soils. At the same time, it was found that ultrasound treatment of a soil suspension in 0.2 n ammonia water followed by centrifugation leads to the separation of gels from the soil particles that they cover and bind together, and to the separation of the soil into two fractions: a gel suspension and a silty-sandy fraction that settles to the bottom of a centrifuge tube in as a sediment. For different soil samples, the amount of clay fraction and soil gels in the soils coincided. This led to the conclusion that it is a single soil component with different names. Replacing the clay fraction determined by the laser diffractometry method with the amount of isolated soil gels significantly accelerates the process of determining the textural class of soil samples.

Keywords: Kachinskii method, laser diffractometry, clay fraction of soils, textural class of soils, soil gels

Suggested citation: Fedotov G.N., Gorepekin I.V., Salimgareeva O.A., Sukharev A.I., Batyrev Yu.P. *Sedimentometricheskii analiz i lazernaya difraktometriya pochv: podkhody k ustraneniyu razlichiy v opredelenii soderzhaniya fizicheskoy gliny* [Sedimentometric analysis and laser diffractometry of soils: approaches to eliminate differences in determining physical clay content]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 63–73. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-63-73

References

- [1] Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, v. 181, no. 1, pp. 104–136.
- [2] Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [Soil Physics Course]. M.: MSU, 2005. - 432 p.
- [3] Lehdorff E., Rodionov A., Plümer L., Rottmann P., Spiering B., Dultz S., Amelung W. Spatial organization of soil microaggregates. *Geoderma*, 2021, v. 386, p. 114915.
- [4] Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review. *Eurasian soil science*, 2018, v. 51, pp. 1326–1347.
- [5] 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, v. 415, p. 115771.
- [6] Shein Ye.V., Madi A.I. *Granulometricheskii sostav pochv: metody lazernoy difraktsii i sedimentometrii, ikh sravneniye i ispol'zovaniye* [Granulometric composition of soils: methods of laser diffraction and sedimentometry, their comparison and use]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], 2018, no. 1, pp. 9–11.
- [7] Dembovetsky A.V., Tyugai Z.N., Shein E.V. The Granulometric Composition of Soils: History, Development of Methods, Current State, and Prospects. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2024, v. 79, no. 4, pp. 387–392.
- [8] Taubner H., Roth B., Tippkötter R. Determination of soil texture: Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, v. 172, no. 2, pp. 161–171.
- [9] Yang X., Zhang Q., Li X., Jia X., We X., Shao M.A. Determination of soil texture by laser diffraction method. *Soil Science Society of America J.*, 2015, v. 79, no. 6, pp. 1556–1566.
- [10] Yudina A.V., Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Churilin N.A., Aleksandrova M.S., Golovleva Y.A., Milanovskii E.Y. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method. *Eurasian Soil Science*, 2020, v. 53, pp. 1579–1595.

- [11] Shinkarev A.A., Kornilova A.G., Trofimova F.A., Gordeyev A.S., Giniyatullin K.G., Lygina T.Z. *Sravneniye metodov sedimentometrii i lazernoy difraktsii v analize granulometricheskogo sostava glinistoy fraktsii pochv* [Comparison of sedimentometry and laser diffraction methods in the analysis of the granulometric composition of the clay fraction of soils]. *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Yestestvennyye nauki* [Scientific Notes of Kazan University. Series Natural Sciences], 2010, v. 152, no. 2, pp. 251–260.
- [12] Arriaga F.J., Lowery B., Mays M.D. A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument. *Soil Science*, 2006, v. 171, no. 9, pp. 663–674.
- [13] Faé G.S., Montes F., Bazilevskaya E., Año R.M., Kemanian A.R. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods. *Soil Science Society of America J.*, 2019, v. 83, no. 4, pp. 1244–1252.
- [14] Fisher P., Aumann C., Chia K., O'Halloran N., Chandra S. Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. *PloS one*, 2017, v. 12, no. 5, p. e0176510.
- [15] Šinkovičová M., Igaz, D., Kondrlová E., Jarošová M. Soil particle size analysis by laser diffractometry: Result comparison with pipette method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017, v. 245, no. 7, p. 072025.
- [16] Tomášová G., Paseka S., Bajer A. Comparison of laser diffractometry and pipetting methods for particle size determination: A pilot study on the implications of result discrepancies on soil classification. *Soil Science Society of America J.*, 2025, v. 89, no. 1, p. e20791.
- [17] Blokhin A.N., Kulizhskiy S.P. *Otsenka primeneniya metoda lazernoy difraktometrii v opredelenii granulometricheskogo sostava pochv* [Evaluation of the application of laser diffractometry in determining the particle size distribution of soils]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of Tomsk State University. Biology], 2009, no. 1, pp. 37–43.
- [18] Yudina A.V. *Lazernaya difraktometriya v pochvovedenii: metodicheskiye aspekty i dagnosticheskoye znachenie* [Laser diffractometry in soil science: methodological aspects and diagnostic value]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*, 2018, 251 p.
- [19] Trofimov V.T., Korolev V.A., Nikolayeva S.K. *K voprosu ob opredelenii granulometricheskogo sostava gruntov s ispol'zovaniyem lazernykh analizatorov* [On the issue of determining the particle size distribution of soils using laser analyzers]. *Inzhenernyye izyskaniya* [Engineering Surveys], 2014, no. 5–6, pp. 29–37.
- [20] Campbell J.R. Limitations in the laser particle sizing of soils. *Advances in Regolith*, 2003, v. 1, pp. 38–42.
- [21] Fedotov G.N., Shein Ye.V., Putlyayev V.I. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razlichiy sedimentometricheskogo i lazerno-difraktsionnogo metodov opredeleniya granulometricheskogo sostava pochv* [Physicochemical Basis for the Differences between Sedimentometric and Laser Diffraction Methods for Determining the Particle Size Distribution of Soils]. *Pochvovedeniye* [Soil Science], 2007, no. 3, pp. 310–317.
- [22] Shein Ye.V., Milanovskiy Ye.YU., Khaydapova D.D., Bykova G.S., Yudina A.A., Chestnova V.V., Klyuyeva V.V. *Sovremennyye pribornyye metody issledovaniya granulometricheskogo sostava, reologicheskikh kharakteristik i svoystv poverkhnosti tverday fazy pochv* [Modern Instrumental Methods for Studying the Particle Size Distribution, Rheological Characteristics, and Surface Properties of the Solid Phase of Soils]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University], 2015, no. 6 (181), pp. 151–156.
- [23] *Polevyye i laboratornyye metody issledovaniya fizicheskikh svoystv i rezhimov pochv: Metodicheskoye rukovodstvo* [Field and Laboratory Methods for Studying the Physical Properties and Regimes of Soils: Methodological Guide]. Ed. E.V. Shein. Moscow: Moscow State University Publishing House, 2001, 200 p.
- [24] Kulizhskiy S.P., Koronatova N.G., Artymuk S.YU., Sokolov D.A., Novokreshchennykh T.A. *Sravneniye metodov sedimentometrii i lazernoy difraktometrii pri opredelenii granulometricheskogo sostava pochv yestestvennykh i tekhnogennykh landshaftov* [Comparison of sedimentometry and laser diffractometry methods in determining the particle size distribution of soils in natural and man-made landscapes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of Tomsk State University. Biology], 2010, no. 4 (12), pp. 21–31.
- [25] Mukhametova N.V., Abakumov Ye.V., Ryumin A.G. *Granulometricheskoy sostav antarkticheskikh pochv po dannym sedimentometrii i lazernoy difraktometrii* [Particle size distribution of Antarctic soils according to sedimentometry and laser diffractometry data]. *Agrofizika* [Agrophysics], 2013, no. 3 (11), pp. 1–6.
- [26] Khirk A.V., Khaydapova D.D., Karpova D.V., Petrosyan R.D. *Agregatnaya struktura agroserykh pochv Vladimirskego Opol'ya: sostav i prochnost'* [Aggregate structure of agro-gray soils of Vladimir Opolye: composition and strength]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchayeva* [Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute], 2024, no. 120, pp. 107–135.
- [27] Laird D. Nature of clay–humic complexes in an agricultural soil: II. Scanning electron microscopy analysis. *Soil Science Society of America J.*, 2001, v. 65, no. 5, pp. 1419–1425.
- [28] Voyutskiy S.S. *Kurs kolloidnoy khimii* [Course in Colloid Chemistry]. Moscow: Chemistry, 1975, 512 p.
- [29] Fedotov G.N., Dobrovol'skiy G.V., Putlyayev V.I., Garshchikov A.V., Ivanov V.K., Pakhomov Ye.I. *Gelevyye struktury v pochvakh* [Gel structures in soils]. *Pochvovedeniye* [Soil Science], 2006, no. 7, pp. 824–835.
- [30] Tyulin A.F. *Organo-mineral'nyye kolloidy v pochve, ikh genesis i znachenie dlya kornevogo pitaniya rasteniy* [Organo-mineral colloids in soil, their genesis and importance for plant root nutrition]. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1958, 52 p.
- [31] Citeau L., Gaboriaud F., Elsass F., Thomas F., Lamy I. Investigation of physico-chemical features of soil colloidal suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, v. 287, no. 1–3, pp. 94–105.
- [32] Sullivan L.A., Koppi A.J. In-situ soil organic matter studies using scanning electron microscopy and low temperature ashing. *Geoderma*, 1987, v. 40, no. 3–4, pp. 317–332.

- [33] Shein Ye.V., Milanovskiy Ye.YU., Molov A.Z. *Granulometricheskij sostav: rol' organicheskogo veshchestva v razlichnykh dannykh sedimentometricheskogo i lazerno-difraktsionnogo metodov* [Granulometric composition: the role of organic matter in the differences between sedimentometric and laser diffraction data]. *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu* [Reports on environmental soil science], 2006, v. 1, no. 1, pp. 17–30.
- [34] Ryżak M., Bieganowski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, v. 174, no. 4, pp. 624–633.
- [35] Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryżak M., Zaleski T., Beczek M., Bieganowski A. Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis. *Geoderma*, 2023, v. 430, p. 116358.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Z.N. Tyugay, Candidate of Biological Sciences and Senior Researcher at the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, for providing soil samples and data on their particle-size distribution.

This work was carried out within the framework of the MSU state assignment No. 122011800459-3, «Soil biomarkers: identification, stability, activity, and potential for monitoring».

Authors' information

Fedotov Gennadiy Nikolaevich✉ — Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

Salimgareyeva Ol'ga Alekseevna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, tavgava@yandex.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@bmstu.ru

Sukharev Aleksey Igorevich — student of the Lomonosov Moscow State University, suharevai@my.msu.ru

Received 09.09.2025.

Approved after review 06.05.2026.

Accepted for publication 20.08.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest