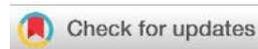


УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260>

Сравнительная оценка методов седиментометрии при определении гранулометрического состава почв

© 2024 А. К. Ходжаева ¹, С. В. Масликова ², Н. С. Горбунова ²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», ул. Институтская, д. 2, корпус 2, г. Пушкино, Московская обл., 142290, Россия.

E-mail: khodzhaeva@pbcras.ru

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия. E-mail: sveta.maslikova.01@mail.ru

Цель исследования. Провести сравнительный анализ результатов определений гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO, с использованием расширенного метода определения интегрального давления суспензии (далее – ISP+).

Место и время проведения. Работа выполнена в ЦКП «Физико-химические методы исследования почв и экосистем» и отделе «Криологии почв» Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

Методы. Определение гранулометрического состава почв проводили пипет-методом и ISP+. Статистическую обработку результатов анализов выполнили с помощью Microsoft Excel и Statistica 12.

Основные результаты. Определение степени расхождения результатов повторных определений гранулометрического состава почв, полученных пипет-методом и ISP+ показало, что для разных фракций коэффициенты вариации различны. Высокая воспроизводимость результатов определений при использовании обоих сравниваемых методов получена для глинистой фракции. Для фракций крупной и средней пыли значения коэффициентов вариации не превышали 10–20%. Самый большой разброс значений повторных определений при использовании обоих методов получен для фракции тонкой пыли. Проведённая оценка значимости различий между средними для фракций тонкой пыли и глины пипет-методом и ISP+ показала, что значимых расхождений нет. Для крупной и средней пыли такая оценка показала значимые различия. 14 из 17-ти исследованных почвенных образцов по результатам определений гранулометрического состава сравниваемыми методами получили одинаковую классификационную принадлежность.

Заключение. Использование измерительной системы почвенных частиц PARIO для определения гранулометрического состава почв позволяет исключить механическое вмешательство в процесс осаждения, отслеживание точности глубины и времени отборов проб, а также значительно сокращает время, затрачиваемое на проведение анализа. Метод ISP+, используемый в работе системы PARIO, даёт возможность получить непрерывную кривую распределения элементарных почвенных частиц по размеру. Проведённое сравнение результатов определения содержания гранулометрических фракций в разных типах почв выявило необходимость принимать во внимание конкретные методы, так как результаты могут расходиться, особенно для фракций крупной и средней пыли, и это может влиять на классификацию почв.

Ключевые слова: гранулометрический состав почвы; пипет-метод; расширенный метод определения интегрального давления суспензии (ISP+); измерительная система почвенных частиц PARIO.

Цитирование: Ходжаева А.К., Масликова С.В., Горбунова Н.С. Сравнительная оценка методов седиментометрии при определении гранулометрического состава почв // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e260. DOI: [10.31251/pos.v7i2.260](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260).

ВВЕДЕНИЕ

Гранулометрический состав почв – важная характеристика, определяющая их плотность, порозность, водопроницаемость, фильтрацию, влагоемкость, а также водный, тепловой режимы и плодородие. Это одна из базовых количественных характеристик почв при проведении их описания и оценки (Руководство по описанию почв, 2012; Богатырев и др., 2017). Для определения гранулометрического состава используют ряд методов, основанных на разных подходах (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; Vuurman et al., 1997; Soil Survey ..., 2014; ISO 13320:2020). Методы отмучивания почвенных частиц в стоячей воде (методы седиментометрии), получившие широкое распространение в XX веке, основаны на использовании уравнения Стокса, связывающего радиус частиц и скорость их оседания в жидкости (Вадюнина, Корчагина, 1986; Soil Survey ..., 2014).

Количественное определение **элементарных почвенных частиц (ЭПЧ)** разного размера при использовании методов седиментометрии можно осуществлять, отбирая пробы суспензии с определенной глубины, через рассчитанные промежутки времени – пипет-метод, измеряя изменение плотности суспензии по мере осаждения ЭПЧ разного размера с помощью ареометров или седиграфов (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; ГОСТ 12536-2014; ISO 11277:2020). Диапазон определяемых этими методами ЭПЧ составляет от $> 0,001$ до $< 0,25$ мм. Содержание фракций песка устанавливают отсеиванием на ситах. В англоязычной научной литературе такой комбинированный подход получил название «sieve-pipette method» (Теории и методы ..., 2007). Сравнение методов седиментометрии и метода лазерной дифрактометрии, в котором размер ЭПЧ определяют не по косвенным признакам, а непосредственно фиксируя датчиками, говорят не в пользу первых (Федотов и др., 2007; Кулижский и др., 2010; Юдина и др., 2018, 2020; Болдырева и др., 2019; Shein et al., 2006). Тем не менее, методы седиментометрии до сих пор остаются востребованными, что объясняется их простотой, невысокими материальными затратами и, самое важное, существующими классификационными и методическими подходами, разработанными на их основе (ГОСТ 12536-2014; ISO 11277:2020; Болдырева и др., 2019). Однако простота, например, пипет-метода, относительна. Анализ очень трудоёмок: его продолжительность может занимать до 30-ти часов, в процессе необходимо задействовать много стеклянной посуды, на точность получаемых результатов оказывают влияние колебания температуры, вибрация, человеческий фактор и др. Возможность значительно снизить трудоёмкость анализов и влияние субъективного фактора на получаемые результаты даёт разработанная компанией METTER Group AG (Мюнхен, Германия) измерительная система почвенных частиц PARIO, в работе которой использован метод интегрального давления суспензии (ISP). В этом методе по измерению падения давления на датчике давления, погруженного в суспензию на определенную глубину, получают распределение частиц по размерам. Давление суспензии измеряется непрерывно, а распределение частиц по размерам определяют путём обратного моделирования (Durner et al., 2017; Durner, Iden, 2021). Проведение сравнения результатов определений гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO, позволит оценить сходства и расхождения между ними и выявить особенности использования системы для изучения гранулометрического состава почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сравнения методов выбрали образцы 12-ти типов почв, отобранных в полевых экспедициях сотрудниками Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Для классификации почв использовали российскую классификацию 2004 года (Классификация ..., 2004). Всего проанализировано 17 почвенных образцов (табл. 1).

Органическое вещество, карбонаты, легкорастворимые соли, гипс и др. оказывают агрегирующее действие и могут препятствовать разделению почвенной массы на ЭПЧ (Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы ..., 2007; ISO 11277:2020), поэтому перед определением гранулометрического состава в почвенных образцах определяли содержание общего органического углерода ($C_{орг}$, %) методом мокрого сжигания по Тюрину; гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, %) солянокислым методом; величину актуальной кислотности (pH_{H_2O}) – потенциометрически, измеряя pH водных почвенных суспензий при соотношении массы почвы и объема воды равном 1:2,5 (Теория и практика ..., 2004) и удельной электропроводности (ЕС, См/м) по ГОСТ 26423-85. Повторность выполняемых анализов двукратная. По результатам этих определений образцы разделили на две группы: не требующие дополнительной обработки для нейтрализации связующих элементарные почвенные частицы агентов (с содержанием гумуса $< 1,5\%$, ЕС $< 0,04$ См/м, $pH_{H_2O} < 6,8$) и требующие. Для удаления органического вещества почвенные пробы обрабатывали 30%-ным раствором H_2O_2 при активном перемешивании и слабом нагреве ($40^\circ C$). Для удаления карбонатов пробы обрабатывали 1 М раствором HCl. Для удаления легкорастворимых солей пробы промывали порциями дистиллированной воды, контроль осуществляли измеряя ЕС ($< 0,04$ См/м) (ISO 11277:2020). Плотность твёрдой фазы (ρ_s , г/см³) в образцах обеих групп определяли методом водных пикнометров (Теории и методы ..., 2007); повторность двукратная. Полученные величины плотности твёрдой фазы использовали для расчетов времени отбора проб суспензий при проведении анализа пипет-методом (Теории и методы ..., 2007) и ввода данных о почвенном образце через экран управления PARIO Control перед началом анализа измерительной системой.

Таблица 1

Химические, физико-химические и физические характеристики почв

Почва	Глубина (см)	pH _{H2O}	ЕС (См/м)	C _{орг} (%)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (%)	ρ _s (г/см ³)
Дерново-подбур (1)*	0–10	5,53	0,01	2,95±0,05	–	2,55
Серая (2)	0–20	5,51	0,01	0,98±0,10	–	2,67
Чернозем глинисто-иллювиальный (3–4)	20–30	6,83	0,01	1,29±0,19	–	2,70
	30–40	6,72	0,01	1,55±0,01	–	2,69
Стратозем темногумусовый (5–6)	20–30	7,56	0,01	1,25±0,03	–	2,58
	30–40	7,77	0,01	1,26±0,02	–	2,66
Чернозем текстурно-карбонатный (7–8)	20–30	7,90	0,02	1,94±0,07	–	2,62
	30–40	8,12	0,02	1,55±0,07	–	2,58
Дерново-карбонатная (9)	1,5–8	7,20	0,01	12,28±0,11	–	2,22
Темная слитая (10)	0–10	7,60	0,02	2,54±0,04	–	2,49
Желтозем (11)	0–25	6,28	0,01	1,61±0,02	–	2,63
Краснозем (12)	0–25	5,62	0,00	1,44±0,02	–	2,72
Каштановая (13–14)	0–10	6,97	0,01	0,76±0,03	–	2,65
	10–20	7,23	0,00	0,56±0,02	–	2,65
Солонец светлый (15)	5–20	8,30	0,06	1,72±0,07	0,01±0,00	2,51
Солончак (16–17)	0–10	7,49	2,52	0,86±0,02	13,93±0,01	2,56
	10–20	8,05	0,76	0,70±0,02	8,56±0,02	2,62

Примечание.

* – номер образца (здесь и далее в табл. 2). Представлены такие характеристики почв как актуальная кислотность (pH_{H2O}); удельная электропроводность (ЕС); содержание общего органического углерода (C_{орг}) и гипса (CaSO₄·2H₂O) в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения (M±s); плотность твёрдой фазы (ρ_s). Прочерк означает, что гипс отсутствует.

Анализ гранулометрического состава включал два этапа: диспергирование почвенной массы и определение содержания элементарных почвенных частиц установленных размеров. Первый этап выполняли одинаково для обоих методов. Навески воздушно-сухих почвенных образцов (для песчаных почв – 20 г абсолютно сухого образца (методом ISP+ – 40 г), для суглинистых и глинистых – 10 г (методом ISP+ – не менее 25 г) помещали в стеклянные флаконы, добавляли 200 мл деаэрированной дистиллированной воды и 25 мл 4% раствора Na₄P₂O₇ (PARIO Manual, 2024). Затем почвенная проба во флаконе с водой и пиродифосфатом натрия подвергалась обработке **ультразвуком (УЗ)**, для чего использовали ультразвуковой диспергатор МЭФ93.Т компании МЭЛФИЗ (Россия). Уровень энергии диспергации УЗ составлял 450 Дж/мл. Далее приступали ко второму этапу. Определение гранулометрического состава с использованием измерительной системы PARIO проводили методом измерения интегрального давления суспензии (ISP). Оценку данных измерений осуществляли, используя программное обеспечение PARIO Control, в котором реализованы два метода: PARIO Classic (ISP) и PARIO Plus (ISP+). В методе PARIO Classic измерение полностью автоматизировано, в PARIO Plus – частично. В данной работе использовали метод ISP+, который имеет более высокую точность получения кривой гранулометрического состава (особенно для глинистой фракции), меньшую продолжительность измерения (2,5 часа по сравнению с 8-ю часами для ISP); ошибки, возникающие из-за неточностей в результатах предварительных анализов почвенных образцов или отклонений от неидеальных условий измерений, в меньшей степени влияют на результаты измерений (Durner, Iden, 2021). Определение содержания фракций песка выполняли просеиванием на ситах после завершения работы измерительной системы PARIO, пропуская весь объем почвенной суспензии через набор сит с ячейками 500, 250 и 50 мкм и тщательно промывая осадок дистиллированной водой. Анализ и

необходимые расчёты для определения гранулометрического состава почв пипет-методом проводили согласно методике, описанной в коллективной монографии «Теории и методы физики почв» (2007). Результаты содержания фракций крупного и среднего песка, полученные просеиванием при выполнении измерений системой PARIO, использовали и для пипет-метода. Содержание фракции мелкого песка при использовании пипет-метода находили по разности 100% и суммы определенных фракций (Теории и методы ..., 2007); повторность трёхкратная. В программном обеспечении PARIO Control реализована возможность использования двух классификаций ЭПЧ Германии и Министерства сельского хозяйства США (Keys to Soil Taxonomy, 2014). В работе использовали классификацию Министерства сельского хозяйства США (фракция крупного песка – 500–2000 мкм; среднего песка – 250–500 мкм; мелкого песка – 50–250 мкм; крупной пыли – 20–50 мкм; средней пыли – 5–20 мкм; тонкой пыли – 2–5 мкм; глины – <2 мкм). Статистическую обработку результатов определений гранулометрического состава разных типов почв, полученных пипет-методом и ISP+, проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и Statistica 12.

Определение степени расхождения результатов повторных определений содержания фракций гранулометрических частиц в образцах разных типов почв, полученных пипет-методом и ISP+ показало, что для разных фракций **коэффициенты вариации (CV)** различны. Высокая воспроизводимость результатов при использовании обоих методов получена для глинистой фракции (<2 мкм), для которой значения CV не превышали 10% и лишь при анализе образцов серой, каштановой (10–20 см) почв и дерново-подбура пипет-методом увеличились до 12, 14 и 20%, соответственно. Для фракций крупного (500–2000 мкм) и среднего песка (250–500 мкм) величины CV в большинстве случаев, не превышали 20%, однако при анализе образцов чернозема глинисто-иллювиального (30–40 см) получены высокие значения коэффициента вариации (>33%). Средняя воспроизводимость результатов, полученных расчетным методом и мокрым ситовым просеиванием определена для фракции мелкого песка (50–250 мкм), где величины CV не превышали 10–20%, за исключением расчётных величин для темной слитой почвы (CV >33%). Для фракций крупной (20–50 мкм) и средней пыли (5–20 мкм) воспроизводимость результатов была средняя (CV не превышал 10–20%); лишь при анализе образцов каштановой почвы (10–20 см) и солончака (10–20 см), выполненном методом ISP+, величины CV для фракции средней пыли были высокие (>33%). Самый большой разброс значений повторных определений получен для фракции тонкой пыли (2–5 мкм) образцов дерново-подбура, чернозема текстурно-карбонатного (30–40 см), солончака (0–10 см) и каштановой почвы (10–20 см) при использовании пипет-метода, а образцов чернозема глинисто-иллювиального (30–40 см), краснозема и солончака (10–20 см) – при использовании метода ISP+.

Средние значения содержания фракций средней, тонкой пыли и глины в большинстве случаев были выше при использовании пипет-метода по сравнению с методом ISP+. Средние значения содержания фракции крупной пыли во всех исследуемых почвенных образцах выше при анализе методом ISP+ (табл. 2). На рисунках 1–3 представлены кумулятивные кривые и треугольники Ферре для классификации почв по гранулометрическому составу. Метод интегрального давления суспензии, используемый в работе системы PARIO, даёт возможность получить непрерывную кривую распределения ЭПЧ по размеру. По кумулятивным кривым серой (2), чернозема глинисто-иллювиального (3–4), чернозема текстурно-карбонатного (7–8), краснозема (12), каштановой почвы (13–14) и солонца (15) хорошо видны расхождения в результатах определений фракций гранулометрических частиц сравниваемыми методами. Наибольшие расхождения получены во фракциях пыли и глины для серой почвы, мелкого песка, пыли и глины для краснозема и каштановой почвы. Гранулометрический состав серой почвы, определенный пипет-методом, представляет пылеватый оглиненный суглинок (пылеватую глину – согласно российской номенклатуре (Теории и методы ..., 2007)), а методом ISP+ – пылеватый суглинок (тяжёлый суглинок). Гранулометрический состав краснозема, определенный пипет-методом, глинистый, а методом ISP+ – илистый суглинок. Гранулометрический состав каштановой почвы (0–10 см), определенный пипет-методом, суглинистый, а методом ISP+ – опесчаненный суглинок (лёгкий суглинок). Сопоставление результатов анализа гранулометрического состава, полученные сравниваемыми методами, для дерново-подбура, чернозема глинисто-иллювиального, стратозема темногумусового, чернозема текстурно-карбонатного, дерново-карбонатной почвы, темной слитой, желтозема, каштановой (10–20 см), солонца и солончака показало, что в обоих случаях почвы получают одинаковую классификационную принадлежность, несмотря на некоторые расхождения в содержании фракций (табл. 2; рис. 1–3). Таким образом, 14 из 17-ти исследованных почвенных образцов по результатам определений гранулометрического состава пипет-методом и ISP+ получили одинаковую классификационную принадлежность.

Таблица 2

Гранулометрический состав разных типов почв при определении пипет-методом (I) и ISP+ (II)

Почва	Глубина (см)	Метод	Содержание фракций (%) с размером частиц (мкм)						
			Песок (sand)*			Пыль (silt)			Глина (clay)
			500–2000	250–500	50–250	20–50	5–20	2–5	< 2
Дерново-подбур (1)	0–10	I	38,34	37,35	13,78	1,84	2,92	1,58	4,19
		II			11,54	4,37	3,52	1,13	3,75
Серая (2)	0–20	I	0,18	0,48	12,48	26,49	28,61	5,13	26,63
		II			13,71	34,06	23,34	6,19	22,04
Чернозем глинисто-иллювиальный (3–4)	20–30	I	0,34	0,37	16,07	21,81	20,37	6,40	34,64
		II			17,76	30,19	13,85	4,24	33,25
	30–40	I	0,22	0,12	13,29	27,45	18,94	5,00	34,98
		II			17,02	32,36	19,00	0,00	31,29
Стратозем темногумусовый (5–6)	20–30	I	1,80	22,21	35,84	8,66	6,37	3,16	21,96
		II			31,27	17,30	4,05	2,06	21,31
	30–40	I	2,36	27,58	35,07	10,40	4,38	2,75	17,46
		II			32,65	17,85	2,33	3,14	15,09
Чернозем текстурно-карбонатный (7–8)	20–30	I	1,19	4,39	4,39	10,33	18,23	11,35	50,12
		II			7,18	18,53	9,73	6,98	52,00
	30–40	I	1,31	4,12	4,01	9,77	18,12	7,01	55,66
		II			6,61	16,28	10,16	8,51	53,01
Дерново-карбонатная (9)	1,5–8	I	2,32	0,82	9,08	7,96	17,01	10,57	52,24
		II			3,50	9,40	19,21	11,38	53,35
Темная слитая (10)	0–10	I	5,97	2,18	1,11	10,72	10,15	5,37	64,50
		II			4,75	11,63	7,48	7,44	60,55
Желтозем (11)	0–25	I	6,15	4,24	11,47	7,39	28,62	15,51	26,62
		II			10,44	12,49	23,93	14,37	28,38
Краснозем (12)	0–25	I	14,23	5,70	5,13	10,87	15,61	2,73	45,72
		II			12,38	18,75	15,92	0,05	32,97
Каштановая (13–14)	0–10	I	1,54	13,91	33,38	12,85	11,56	4,21	22,55
		II			41,22	22,60	3,07	1,87	15,79
	10–20	I	2,00	12,24	44,43	10,56	11,03	5,01	14,73
		II			40,41	20,92	3,84	3,00	17,59
Солонец светлый (15)	5–20	I	0,21	1,41	12,68	21,83	20,29	6,70	36,88
		II			12,43	32,85	9,84	7,26	36,00
Солончак (16–17)	0–10	I	1,09	5,86	66,26	6,74	3,30	1,46	15,29
		II			61,02	10,81	4,38	4,98	11,86
	10–20	I	0,98	6,72	68,31	5,22	3,49	2,54	12,74
		II			64,66	12,59	0,00	0,03	15,02

Примечание.

ISP+ – расширенный метод определения интегрального давления суспензии с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO. * – определение содержания фракций крупного и среднего песка выполняли просеиванием на ситах и использовали в методах I и II.

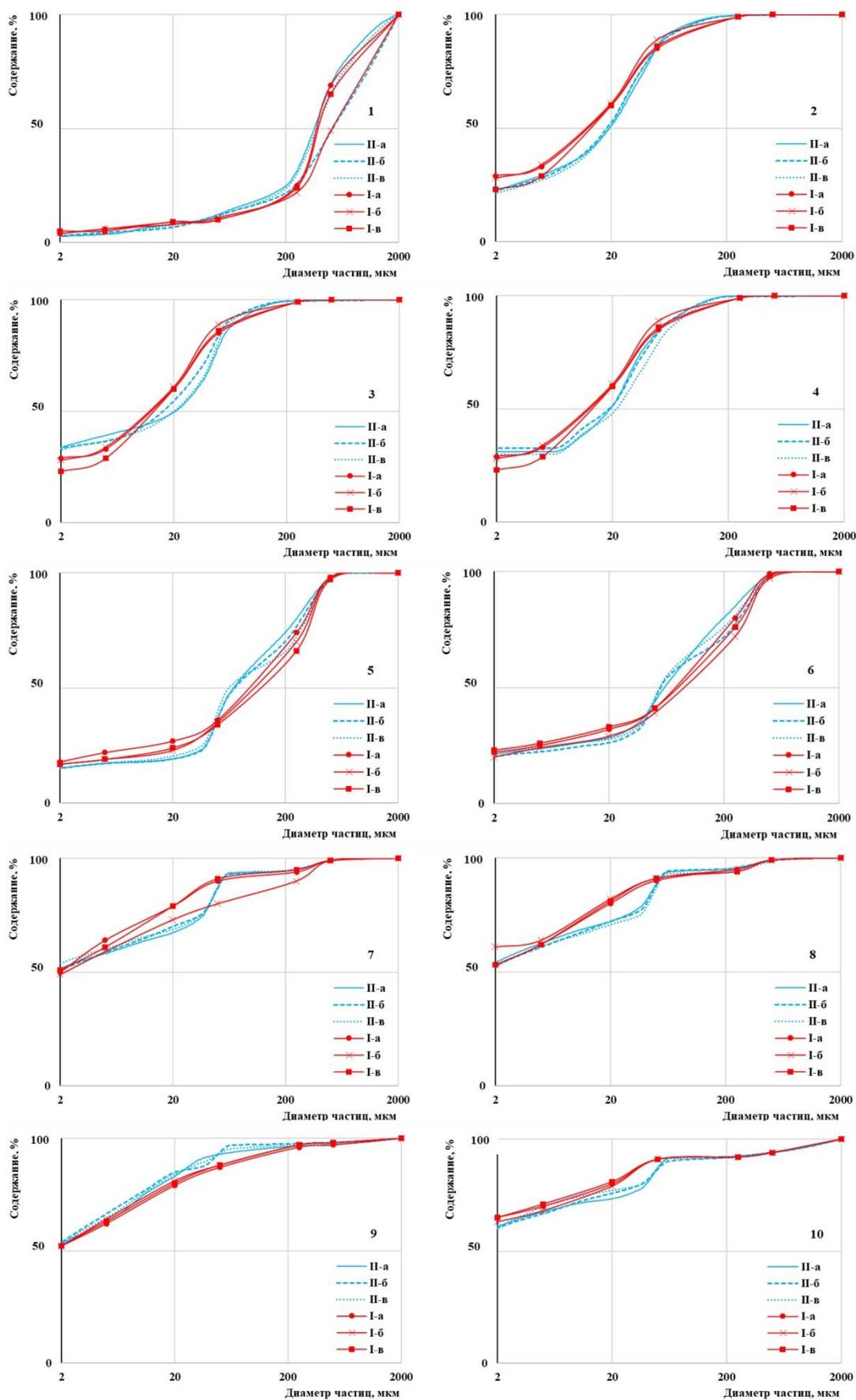


Рисунок 1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава разных типов почв (1–10), полученных пипет-методом (I-а, I-б, I-в) и методом ISP+ (II-а, II-б, II-в) с определением интегрального давления суспензии с помощью измерительной системы почвенных частиц PARIO (здесь и далее на рис. 2–3).

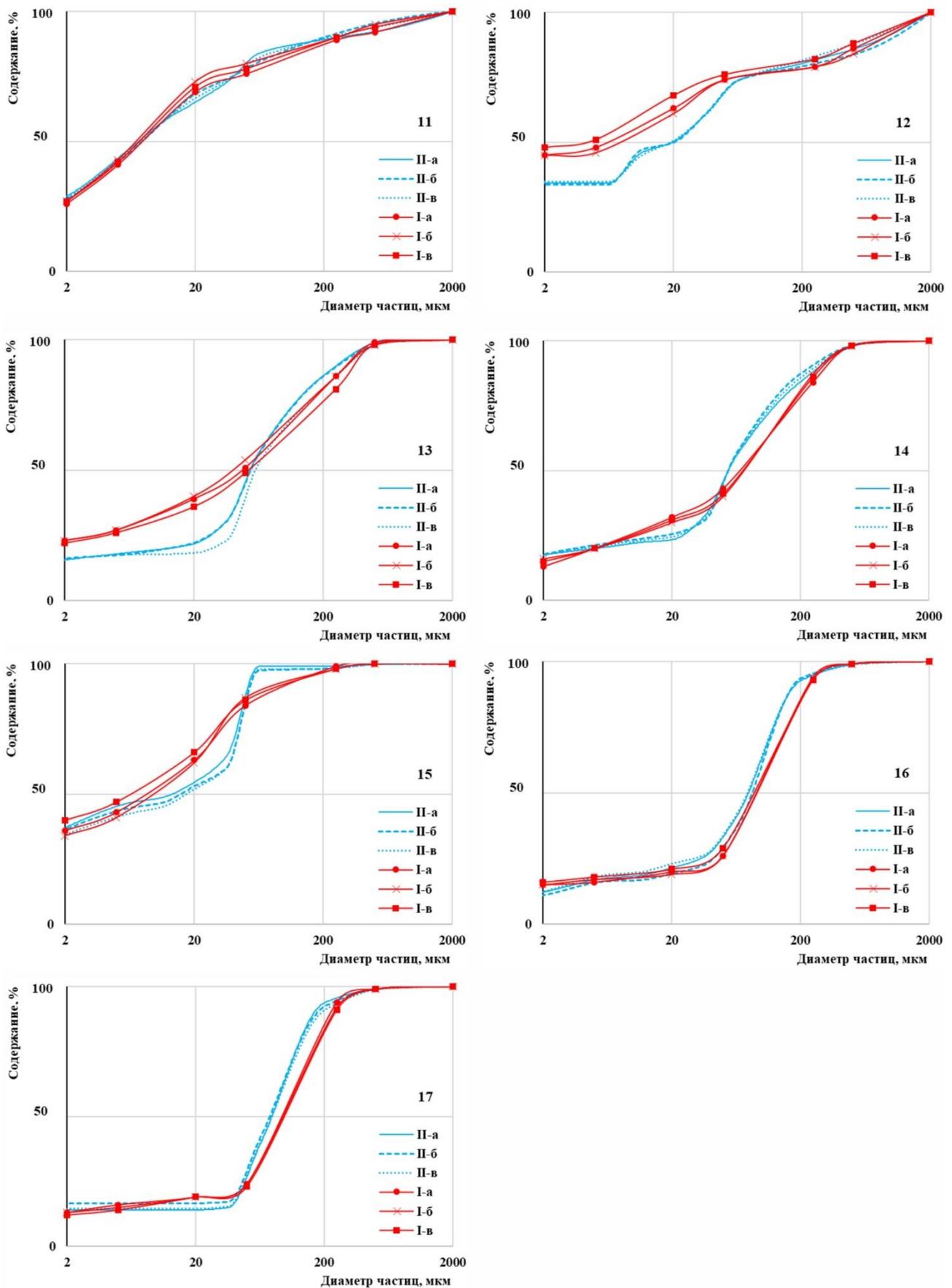


Рисунок 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава разных типов почв (11–17), полученных пипет-методом (I-а, I-б, I-в) и методом ISP+ (II-а, II-б, II-в)

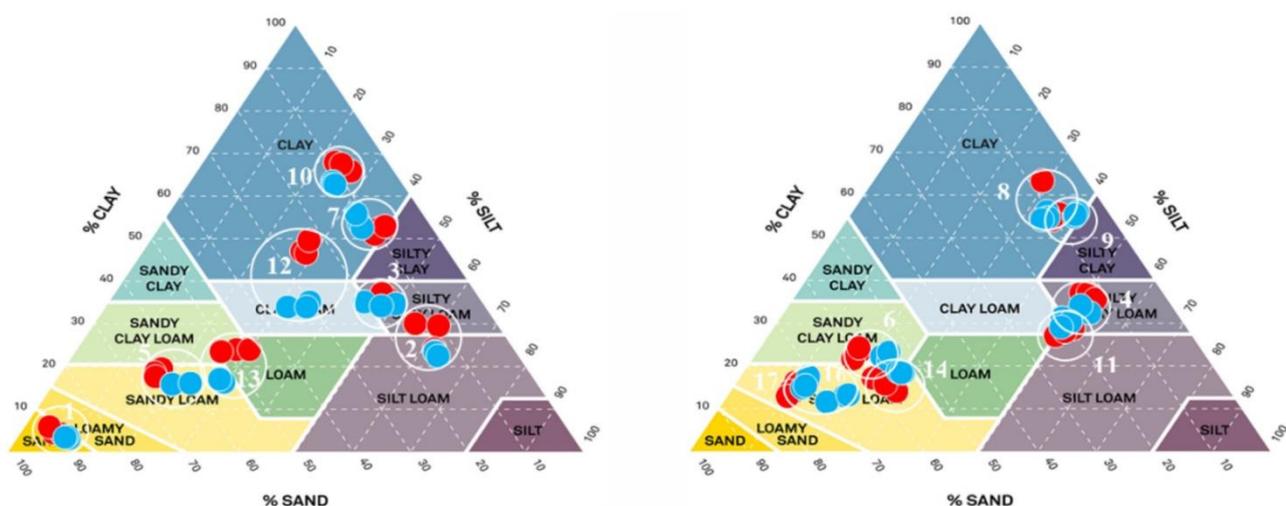


Рисунок 3. Треугольники Ферре для классификации почв (1–17) по гранулометрическому составу по результатам пипет-метода (обозначено красным цветом) и методом ISP+ (голубым цветом).

Величины коэффициентов корреляции между результатами определений содержания гранулометрических фракций пипет-методом и ISP+ составили 0,95; 0,88; 0,84; 0,97 для крупной, средней, тонкой пыли и глины, соответственно, что указывает на тесную связь между ними ($p < 0,05$). Результаты определений фракции мелкого песка расчетным методом и мокрым просеиванием также тесно коррелировали друг с другом (0,98; $p < 0,05$). Проведённая оценка разности средних для результатов определений фракций мелкого песка, тонкой пыли и глины показала отсутствие значимых расхождений между методами ($p < 0,05$). Для крупной и средней пыли такая оценка показала значимые различия (табл. 3).

Таблица 3

Оценка разности средних

Фракции	Размер частиц (мкм)	ν	d	s_d	t	$t_{0,05}$
Мелкий песок	50–250	16	-0,10	1,02	-0,10	2,12
Крупная пыль	20–50	16	-6,59	0,73	-9,05	
Средняя пыль	5–20		3,84	0,95	4,05	
Тонкая пыль	2–5		0,88	0,55	1,58	
Пыль	2–50	47	0,40	0,87	0,46	2,01
Глина	< 2	16	1,98	0,94	2,10	2,12

Примечание.

ν – число степеней свободы; d – разность средних; s_d – ошибка разности средних; t – критерий Стьюдента; $t_{0,05}$ – критические значения критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05.

ОБСУЖДЕНИЕ

Использование измерительной системы PARIO, в работе которой применили расширенный метод интегрального давления суспензии (ISP+), имело как ряд преимуществ перед пипет-методом, так и недостатки. К преимуществам, в первую очередь, относится то, что метод ISP+ является полуавтоматическим, непрерывным и основан на моделировании процессов (Durner, Iden, 2021). При использовании системы PARIO отсутствует механическое вмешательство в процесс осаждения и значительно сокращается время, затрачиваемое на проведение анализа (~ 2,5 часа), не нужно следить за точностью глубины и времени отборов проб, имеется автоматический контроль температуры, колебания которой не должны превышать 1,5°C. Программное обеспечение PARIO Control даёт расширенные возможности для визуализации полученных данных: графики, таблицы и др. К недостаткам можно отнести большее количество массы образца, требующегося для проведения анализа по сравнению с пипет-методом, необходимость использования стеклянной посуды и ряда дополнительных манипуляций при определении песчаных и илистой фракций методом ISP+. Что касается материальных затрат, то пипет-метод остаётся самым малозатратным.

Колебание температуры почвенной суспензии является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на точность результатов, получаемых пипет-методом из-за изменения скоростей осаждения частиц (Вадюнина, Корчагина, 1986). При выполнении анализа с помощью измерительной системы PARIO нужно исключить термическое влияние на точность показаний давления, поэтому рекомендуется перед началом анализа уравновесить температуру между PARIO и почвенной суспензией и работать в помещении с постоянной температурой (Durner, Iden, 2021). Другим важным фактором, способным оказать влияние на работу датчика давления системы PARIO, является образование газовых пузырьков в почвенной суспензии. На точность результатов анализов методом ISP+ также влияет точность определений песчаных фракций, сухой массы образца, диспергирующего агента, плотности твёрдой фазы (Durner et al., 2017).

Возникновение систематических ошибок при определении содержания почвенных гранулометрических фракций методами седиментометрии может быть обусловлено принятыми допущениями о сферической форме частиц для использования уравнения Стокса, связывающего их радиус и скорость оседания в жидкости, отсутствием турбулентных явлений в воде и взаимодействий между частицами, одинаковой плотностью (Кулижский и др., 2010). Оценка воспроизводимости результатов повторных определений содержания фракций глины, крупной и средней пыли пипет-методом и ISP+ позволяет считать их удовлетворительными. В ранее опубликованной работе (Durner, Iden, 2021) показана высокая воспроизводимость результатов определений методом ISP+. Большой разброс значений повторных определений во фракции тонкой пыли при использовании обоих сравниваемых методов можно объяснить как перечисленными выше причинами, так и обеднением образцов дерново-подбуря (1,58%), чернозема глинисто-иллювиального (4,24%), каштановой почвы (5,01%), краснозема (0,05%), солончака (1,46 и 0,03%) фракцией тонкой пыли. Для фракций крупного и среднего песка большой разброс значений повторных определений при анализе чернозема глинисто-иллювиального также может быть объяснен малым их содержанием в образцах ($\leq 1\%$). Следует отметить, что ошибки просеивания при определении песчаных фракций будут линейно распространяться в сторону более мелких фракций при использовании метода ISP+ (Durner et al., 2017) и на расчётную фракцию при анализе пипет-методом.

О возможных расхождениях между результатами определений фракции средней пыли при анализе образцов тяжело суглинистых почв пипет-методом и ISP+ говорилось в работе В. Дюрнера и С.К. Иден (Durner, Iden, 2021). Несмотря на то, что оценка значимости различий средних для крупной и средней пыли показала существенные расхождения между сравниваемыми методами, такая оценка для фракций пыли, включающей частицы размером от 2 до 50 мкм, существенных различий не показала (табл. 3). Поэтому, несмотря на значимые расхождения в содержании фракций крупной и средней пыли при определении пипет-методом и ISP+, большинство исследуемых почв по гранулометрическому составу получили одинаковую классификационную принадлежность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов определения гранулометрического состава разных типов почв пипет-методом и расширенным методом определения интегрального давления суспензии (ISP+) с использованием измерительной системы почвенных частиц PARIO позволяет сделать заключение о том, что каждый из методов обладает определёнными преимуществами и недостатками. Определение степени расхождения результатов повторных определений показало различную вариабельность для разных фракций при использовании обоих методов. При сравнении результатов пипет-метода и ISP+, полученных на образцах различных типов почв, установлена существенная разница в содержании фракций крупной и средней пыли; для фракций тонкой пыли и глины оба метода дали сходные результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны научным сотрудникам Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН д-ру геол.-минерал. наук Т.В. Алексеевой, канд. геол. наук О.Г. Заниной, канд. биол. наук Д.В. Сапронову, канд. геол.-минерал. наук П.И. Калинину, канд. биол. наук Д.А. Хорошаеву за предоставление почвенных образцов; д-ру биол. наук Е.Ю. Милановскому и д-ру биол. наук В.М. Семенову за критические замечания и предложения при подготовке статьи к публикации.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков

парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

ЛИТЕРАТУРА

Богатырев Л.Г., Маслов М.Н., Бенедиктова А.И., Макаров М.И. Оценка почв и земель (основные показатели и критерии) / Науч. ред. Г.С. Куст. Москва: МАКС Пресс, 2017. 192 с.

Болдырева В.Э., Безуглова О.С., Морозов И.В. К вопросу об определении гранулометрического состава почв с использованием метода лазерной дифракции // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 1 (33). С. 184–194. <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2019-1-184-194>

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

ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2011. 19 с.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. Москва: Стандартинформ. 2011. 7 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

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.

Руководство по описанию почв. Четвертое издание, исправленное и дополненное. Рим: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций (ФАО), 2012. 101 с.

Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.

Федотов Г.Н., Шейн В.Е., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // Почвоведение. 2007. № 3. С. 310–317.

Юдина А.В., Фомин Д.С., Котельникова А.Д., Милановский Е.Ю. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1340–1362. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18110096>

Юдина А.В., Фомин Д.С., Валдес-Коровкина И.А., Чурилина Н.А., Александрова М.С., Головлева Ю.А., Филиппов Р.В., Ковда И.В., А. А. Дымов А.А., Е. Ю. Милановский Е.Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110143>

Buurman P., Pape Th., Muggler C.C. Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems // Soil Science. 1997. Vol. 162. No. 3. P. 211–218.

Durner W., Iden S.C., von Unold G. The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation // Water Resources Research. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 33–48. <https://doi.org/10.1002/2016WR019830>

Durner W., Iden S.C. The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials // Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 213. P. 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>

ISO 11277:2020. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. International Standard published [60.60], 2020. Edition 3. 38 p.

ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. International Standard published [60.60], 2020. Edition 2. 59 p.

PARIO Manual [Electronic resource]. URL: https://library.metergroup.com/Manuals/20780_PARIO_Manual_Web.pdf (accessed on 01.09.2023).

Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Science. 2006. Vol. 39. No. Suppl. 1. P. S84–S90. <https://doi.org/10.1134/S106422930613014X>

Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0 / R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Keys to Soil Taxonomy, 12th edition. Soil Survey Staff. USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Поступила в редакцию 27.03.2024

Принята 10.07.2024

Опубликована 10.07.2024

Сведения об авторах:

Ходжаева Анна Каримовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела криологии почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленного подразделения ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН», (г. Пушкино, Россия); khodzhaeva@pbcra.ru

Масликова Светлана Васильевна – бакалавр кафедры экологии и земельных ресурсов медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (г. Воронеж, Россия); sveta.maslikova.01@mail.ru

Горбунова Надежда Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и земельных ресурсов медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (г. Воронеж, Россия); vilian@list.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Comparative assessment of gravitational sedimentation methods for the evaluation of particle-size distribution in soils

© 2024 A. K. Khodzhaeva ¹, S. V. Maslikova ², N. S. Gorbunova ²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya Street, 2, Pushchino, Moscow region, Russia. E-mail: khodzhaeva@pbcra.ru

²Voronezh State University, University Square, 1, Voronezh, Russia. E-mail: sveta.maslikova.01@mail.ru

The aim of the study was to carry out a comparative analysis of the results by determining of the particle-size distribution in different soil types by the 1) pipette method and 2) measurement device PARIO, using Integral Suspension Pressure plus method (ISP+).

Location and time of the study. The study was performed in the Core Research Facility "Physico-chemical Methods of Soil and Ecosystem Research" and in the Department of Soil Cryology of the Institute of Physical-Chemical and Biological Problems of Soil Science the Russian Academy of Sciences.

Methods. The determination of the particle-size distribution in soils was carried out by the pipette method and ISP+. Statistical processing of the analytical data was performed by Microsoft Excel and Statistica 12.

Results. The determination of the degree of discrepancy between the results of repeated determinations of the particle-size distribution in soils obtained by the pipette method and ISP+ showed that the coefficients of variation (CV) were different for different fractions. High reproducibility of the results was obtained for the clay fraction. For fractions of the coarse and middle silt, the CV values did not exceed 10-20%. The largest variation in the between repeated measurements using both methods was obtained for the fine silt fraction. The assessment of the average difference and its significance for fine silt and clay fractions by the pipette method and ISP+ showed that there were no significant discrepancies. For the coarse and middle silt, such assessment showed significant differences. Most of the studied soils (14 out of 17) obtained the same classification according to the determinations of the soil particle-size distribution by the compared methods.

Conclusions. The use of the PARIO measurement device for determining soil particle-size distribution allows to exclude disturbance of the suspension during the test run, to track the time and depth of sampling and to reduce measurement time significantly. This study showed the importance of taking into consideration the method of soil granulometry assessment, as results may be quite different, especially for the fractions of coarse and medium silt, thus affecting soil taxonomic attribution.

Keywords: soil particle-size distribution; pipette method; Integral Suspension Pressure plus method (ISP+); PARIO measurement device.

How to cite: Khodzhaeva A.K., Maslikova S.V., Gorbunova N.S. Comparative evaluation of gravitational sedimentation methods for particle-size distribution in soils. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e260. DOI: [10.31251/pos.v7i2.260](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.260). (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the researchers of the Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Geological and Mineralogical Sciences T.V. Alekseeva, Candidate of Geographical Sciences O.G. Zanina, Candidate of Biological Sciences D.V. Saprionov, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences P.I. Kalinin, Candidate of Biological Sciences D.A. Khoroshaev for providing soil samples; Dr. of Biological Sciences E.Y. Milanovsky and Dr. of Biological Sciences V.M. Semenov for their critical comments and suggestions in preparing the article for publication.

FUNDING

The study was carried out as part of the innovative project of national importance "Development of a system for terrestrial and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system for recording data on flows of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems" (reg. No. 123030300031-6).

REFERENCES

- Bogatyrev L.G., Maslov M.N., Benediktova A.I., Makarov M.I. Assessment of soils and lands (main indicators and criteria) / G.S. Kust (ed.). Moscow: MAKS Press, 2017. 192 p. (in Russian).
- Boldyreva V. E., Bezuglova O. S., Morozov I. V. On the question on determination of particle-size distribution of soil using the laser diffraction method. *Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2019. No. 1 (33). P. 184–194. (in Russian). <https://doi.org/10.31774/2222-1816-2019-1-184-194>
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods of research of physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
- GOST 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform, 2011. 19 p. (in Russian).
- GOST 26423-85. Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract. Moscow: Standardinform, 2011. 19 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils in Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kulizhskiy S.P., Koronatova N.G., Artymuk S.Yu., Sokolov D.A., Novokreshchennykh T.A. Comparison of the sedimentation method and the laser-diffraction analysis during determination of soil texture of natural and technogenic landscapes. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*. 2010. No. 4 (12). P. 21–31. (in Russian).
- Guidelines for soil description. Fourth edition, revised and expanded. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012. 101 p. (in Russian).
- Theory and practice of the physics of soils / E.V. Shein, L.O. Karpachevsky (ed.). Moscow: "Grif and K", 2007. 616 p. (in Russian).
- Theory and practice of the chemical analysis of soils / L.A. Vorob'eva (ed.). Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Fedotov G.N., Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A., Milanovskii E.Yu., Putlyaev V.I., Eliseev A.V. Physicochemical bases of differences between the sedimentometric and laser-diffraction techniques of soil particle-size analysis. *Eurasian Soil Science*. 2007. Vol. 40. No. 3. P. 281–288. <https://doi.org/10.1134/S1064229307030064>
- Yudina A. V., Fomin D. S., Kotelnikova A. D., Milanovskii E. Yu. From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: a review. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 11. P. 1326–1347. <https://doi.org/10.1134/S1064229318110091>
- Yudina A. V., Fomin D. S., Valdes-Korovkin I. A., Churilin N. A., Kovda I. V., Milanovskiy E. Y., Aleksandrova M. S., Golovleva Y. A., Phillipov N. V., Dymov A. A. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53. No. 11. P. 1579–1595. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110149>

Buurman P., Pape Th., Muggler C.C. Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. Soil Science. 1997. Vol. 162. No. 3. P. 211–218.

Durner W., Iden S.C., von Unold G. The integral suspension pressure method (ISP) for precise particle-size analysis by gravitational sedimentation. Water Resources Research. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 33–48. <https://doi.org/10.1002/2016WR019830>

Durner W., Iden S.C. The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials. Soil and Tillage Research. 2021. Vol. 213. P. 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>

ISO 11277:2020. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. International Standard published [60.60], 2020. Edition 3. 38 p.

ISO 13320:2020. Particle size analysis – Laser diffraction methods. International Standard published [60.60], 2020. Edition 2. 59 p.

PARIO Manual [Electronic resource]. URL: https://library.metergroup.com/Manuals/20780_PARIO_Manual_Web.pdf (accessed on 01.09.2023).

Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Molov A.Z. The effect of organic matter on the difference between particle-size distribution data obtained by the sedimentometric and laser diffraction methods // Eurasian Soil Science. 2006. Vol. 39. No. Suppl. 1. P. S84–S90. <https://doi.org/10.1134/S106422930613014X>

Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0 / R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Keys to Soil Taxonomy, 12th edition. Soil Survey Staff. USDA-Natural Resources Conservation Service. 2014.

Received 27 March 2024

Accepted 10 July 2024

Published 10 July 2024

About the authors:

Anna K. Khodzhaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Soil Cryology Department in the Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); khodzhaeva@pbcras.ru

Svetlana V. Maslikova – Bachelor of the Department of Ecology and Land Resources, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University (Voronezh, Russia); sveta.maslikova.01@mail.ru

Nadezhda S. Gorbunova – Candidate of Biological Sciences, docent, Department of Ecology and Land Resources, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University (Voronezh, Russia); vilian@list.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)