

УДК 631.434

## ОПТИМИЗАЦИЯ АНАЛИЗА АГРЕГАТНОГО СОСТАВА ПОЧВ МЕТОДОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАССЕВА

© 2019 г. Д. С. Фомин<sup>1\*</sup>, И. А. Валдес-Коровкин<sup>1,2</sup>,  
А. П. Голуб<sup>3</sup>, А. В. Юдина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2,

\* <https://orcid.org/0000-0003-3733-028>, e-mail: [fomin\\_ds@esoil.ru](mailto:fomin_ds@esoil.ru)

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,  
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1–12

<sup>3</sup>НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия,  
119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1

Поступила в редакцию 06.11.2018, после доработки 20.11.2018,  
принята к публикации 12.03.2019

Поставлен и проведен эксперимент по определению оптимального режима просеивания на аналитической просеивающей машине. За основу взят метод “сухого” просеивания Саввинова, а в качестве объектов были выбраны пахотные горизонты агродерново-подзолистой почвы (Eutric Retisol) и агрочернозема миграционно-мицеллярного (Haplic Chernozem). Для анализа агрегатного состава были использованы навески почвы массой  $500 \pm 0.5$  г, которые просеивались с 3–6-кратной повторностью, частотой 50 Гц и амплитудой вибраций от 0.5 до 2.5 мм на протяжении от 1 до 5 минут. Был проведен расчет работы прибора по просеиванию образца почвы. Для определения оптимального режима просеивания была проведена аппроксимация результатов эксперимента функцией асимптотической регрессии. Для агродерново-подзолистой почвы оптимальным режимом просеивания является использование амплитуды вибрации 1 мм на протяжении 1 минуты; для агрочерноземов – амплитуды вибрации 2.5 мм на протяжении 2 минут. В качестве универсального режима “сухого” просеивания образцов почв на аналитических просеивающих машинах, по результатам данного исследования, рекомендуется использовать следующие параметры при частоте используемой сети 50 Гц: амплитуда вибрации 2.5 мм, время – 2 минуты.

*Ключевые слова:* почвенная структура, сухое просеивание, виброгрохот, методика.

## ВВЕДЕНИЕ

Распространенным представлением о почвенной структуре является способность почвы образовывать агрегаты из элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) ([Воронин, 1984](#)), а также качественное и количественное описание формы и размеров данных агрегатов ([Шейн, 2005](#)). Понятие структуры почвы было развито Розановым ([Розанов, 1975](#)) и Ворониным ([Воронин, 1984](#)) до концепции иерархии структурной организации почв. В рамках данной концепции почва представляется как система уровней, выделяемых на основе происходящих в них процессов превращения веществ и энергии. Данная работа посвящена изучению агрегатного уровня почвенной структуры, также называемого уровнем макроструктуры. Агрегатная структура почвы характеризуется формой и степенью оформленности структурных отдельностей ([Шейн, 2005](#)). Количественной характеристикой макроструктуры является агрегатный состав, т.е. распределение агрегатов по размерам.

Понятие почвенной структуры использовалось еще В.В. Докучаевым при описании причин засух и неурожаев на черноземах. Вильямс В.Р. в своих ранних работах дает классификацию почв по структуре и подробное количественное описание структурных элементов почвы ([Вильямс, 1897](#)). Согласно данной классификации почвы имеют глыбистое строение, грубо комковатое строение – наличие комков более 3 мм, нежно комковатое строение – наличие комков 0.25–3 мм в диаметре. Также в данной работе В.Р. Вильямс приводит методику определения строения почвы. Для анализа берут 1 куб. дециметр (1000 см<sup>3</sup>) почвы, крупные глыбы отбирают руками, раскладывают крупные глыбы и мелкую почву на бумаге и сушат до воздушно-сухого состояния. После сушки почву просеивают через сита 5, 3, 1 и 0.5 мм и выделяют структурные отдельности размером 5–3 мм – крупные комки, 3–1 мм – средние комки, 1–0.5 мм – мелкие комки, < 0.5 мм – распыленная почва ([Вильямс, 1897](#)).

В следующих работах В.Р. Вильямс уточняет верхнюю классификационную границу агрегатов: “...крупность комков по данным опытов лежит около 2–3 мм, но практически они прини-

маются от 3 до 5 мм. Отдельности крупнее 10 мм называются глыбами” ([Вильямс, 1901](#); [Вильямс, 1910](#); [Вильямс, 1927](#)). В 1931 г. Н.И. Саввинов дополняет методику и предлагает разделять образец воздушно-сухой почвы на 8 фракций путем просеивания на ситах с диаметром отверстий 10, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 мм ([Саввинов, 1931](#)). В 1935 г. Д.Г. Виленский акцентирует внимание, что структурный анализ почвы является первой стадией работы с агрегатами. В своей работе Виленский дополняет методику Н.И. Саввинова, предлагая проводить анализ агрегатного состава навески почвы в воздушно-сухом состоянии методом фракционирования на ситах с размером отверстий 15, 10, 9, 8, 7, 5, 4, 3, 2, 1, 0.5 мм. После просеивания для дальнейших анализов было предложено объединять некоторые соседние фракции и работать с диапазоном размеров агрегатов 1–10 мм ([Виленский, 1935](#)).

Позже небольшие комментарии о процессе просеивания почвы были высказаны И.Б. Ревутом “...образец помещается в верхнее сито колонки сит и легким встряхиванием разделяется на фракции агрегатов разных размеров” ([Ревут, 1960](#)). Через год А.Ф. Вадюниной и З.А. Корчагиной также было введено уточнение по методике “сухого” просеивания: “Анализируемую почву небольшими порциями помещают на верхнее, самое крупное, сито и осторожными наклонами всего набора сит рассеивают. Не следует сита сильно встряхивать. При разъединении каждое сито еще раз встряхивают осторожным постукиванием по его ребру ладонью руки, для того чтобы освободить из отверстий застрявшие в них агрегаты” ([Вадюнина, и др., 1961](#)). То есть с учетом последних комментариев процедура просеивания состоит из двух частей:

1. Производится встряхивание всего набора сит с почвой.
2. Каждое сито с оставшимися агрегатами индивидуально подвергается дополнительному воздействию.

Н.А. Качинский обосновывает актуальность стандартизации методики “сухого” просеивания: “Результаты анализа весьма грубы. На них влияет степень раздробленности воздушно-сухой почвы перед анализом, энергия толчков при просеивании, диапазон качания сит и др. Лучшие результаты получаются при механизации процесса просеивания: со стандартизацией размаха качания

сит, частоты качаний в единицу времени, длительности процесса просеивания” ([Качинский, 1965](#)).

Но, не смотря на то, что предложения стандартизации высказывались, а с 1980-х годов за рубежом активно используются различные модификации аналитических просеивающих машин, общепринятой и обоснованной методики работы на данных приборах не существует (табл. 1).

Из приведенной таблицы 1 можно сделать обобщение: масса образцов почвы, которую используют для просеивания на аналитических просеивающих машинах, находится в диапазоне от 0.1 до 5 кг, амплитуда вибраций прибора – от 0.1 до 3 мм, время просеивания – от 10 секунд до 20 минут.

Наиболее популярные режимы просеивания №№ 8, 9, 17 и 12 (режим просеивания, который используется на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова).

Таким образом, задачами данной работы были адаптация методики “сухого” просеивания по Саввинову на аналитической просеивающей машине и определение оптимального режима просеивания.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Объекты.** В качестве объектов исследования были выбраны два типа суглинистых пахотных почв, контрастные по структурному состоянию: агродерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (Eutric Retisol, Московская область, Зеленоградский район, опорный пункт Почвенного института им. В.В. Докучаева) и агрочернозем миграционно-мицеллярный тяжелосуглинистый (Haplic Chernozem, Курская область, пос. Черемушки, территория Курского НИИ АПП) (табл. 2). В 2016 г. в каждом регионе проводился отбор насыпных образцов массой 50 кг из пахотного горизонта с глубины 0–20 см. После отбора все образцы доводились до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре.

**Таблица 1.** Наиболее распространенные методики просеивания на аналитических просеивающих машинах

№	ИСТОЧНИК	ПРИБОР	МЕТОДИКА			
			МАССА ПОЧВЫ	РЕЖИМ РАБОТЫ: Ч – частота вибраций, А – амплитуда вибраций, В – время просеивания		
				Ч (Гц)	А (мм)	В (мин)
<b>НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПРОСЕИВАЮЩИЕ МАШИНЫ</b>						
1	(Mbagwu, и др., 1990)	Retsch, KS1000 (горизонтальный ротатор)	250 г	0–1.7	25	10
2	(Kristiansen, и др., 2006)		300 г	н. у.	25	10–45 сек
3	(Sainju, 2006)	Tyler Ro-Tap (горизонтальный ротатор с постукиваниями по крышке)	500 г	5 (вра- щения), 2.5 (удары)	25	3
<b>ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПРОСЕИВАЮЩИЕ МАШИНЫ</b>						
4	(Wang, и др., 2014)	Retsch, AS 200	170–200 г	30	н.у.	5
5	(Labiadh, и др., 2011)		500 г	40	н.у.	20
6	(Jongmans, и др., 1991)	Fritsch, Anallysette 3	Объем = 1000 см <sup>3</sup>	50	н.у.	н.у.

Примечание. н. у. – не указано.

7	(Wang, и др., 2017)	Retsch, AS 200	400 г	50	н.у.	10–45 сек
8	(López, и др., 2007), (Álvaro-Fuentes, и др., 2007), (Álvaro-Fuentes, и др., 2008), (Álvaro-Fuentes, и др., 2008)	Fritsch, Anallysette 3	200 г		0.1	5
9	(Gartzia-Bengoetxea, и др., 2009), (Gartzia-Bengoetxea, и др., 2011), (Zhang, и др., 2012), (Zhang, и др., 2013), (Wei, и др., 2014), (Zhang, и др., 2016), (Wang, и др., 2017), (Jin, и др., 2018)	Retsch, AS 200	100 г		1.5	2
10	(Gunina, и др., 2014), (Gunina, и др., 2015)	Retsch, AS 200	100 г			5
11	(Weng, и др., 2018)	Fritsch, Anallysette 3				
12	(Шейн, и др., 2017)	Retsch, AS 200	н. у.		1.53	4
13	(Moreno-de las Heras, 2009)	Endecotts, Octagon	300 г		2	1
14	(Guzmán, и др., 2010)	Retsch, AS 200	200 г			2.5
15	(Sarkera, и др., 2018)	Fritsch, Anallysette 3	500 г		3	2
16	(Preston, и др., 1997)				0.9	5
17	(Perfect, и др., 1997), (Perfect, и др., 1997), (Perfect, и др., 1998)		4.5–4.6 кг	60	2	1
18	(Yang, и др., 2016)	1 кг				
19	(Busscher, и др., 2007), (Busscher, и др., 2007)	Endecotts, Octagon	100 г	3		

**Методика.** В качестве основы была выбрана методика “сухого” просеивания по Саввинову. Согласно данной методике образец почвы массой 0.5–2.5 кг переносится на набор сит с диаметром отверстий 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 мм и просеивается за счет встряхивания руками ([Шейн, и др., 2007](#)).

**Таблица 2.** Основные свойства объектов

Регион	Координаты	Почва	Горизонт	Плотность, г·см <sup>-3</sup>	Физ. глина, %	Сорг, %
Московская обл.	56°07'58.0" N 37°48'08.5" E	Агро-дерново-подзолистая	Р (0–20 см)	1.51	53.5	1.24
Курская обл.	51°37'17.2" N 36°15'41.5" E	Агро-чернозем миграционно-мицелиарный	Р (0–20 см)	1.11	52.4	3.36

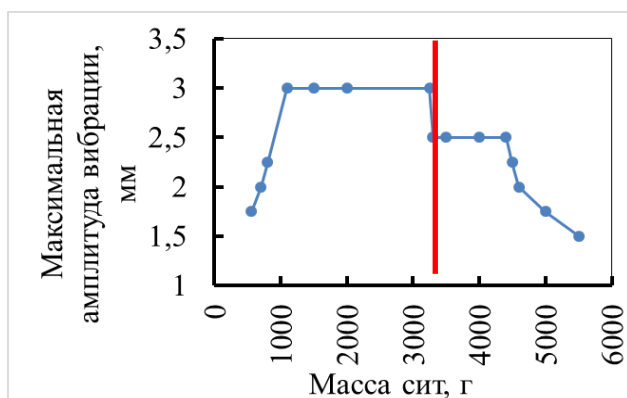
В нашем эксперименте использовались образцы почвы массой  $500 \pm 0.5$  г, просеивание осуществлялось на ситах с диаметром отверстия 10, 7.15, 5, 3.15, 2, 1, 0.5, 0.25 мм (соответствие стандарту ISO 3310-1 / ASTM E11). Перед просеиванием почвенные агрегаты крупнее 50 мм подвергались разрушению путем давления пестиком с резиновым наконечником. Данная процедура проводилась для уравнивания размеров глыбистых почвенных агрегатов, имеющих следы контакта с лопатой, полученных при отборе образцов, и естественных почвенных агрегатов. Образец аккуратно перемещался на верхнее сито.

Просеивание проводилось на аналитических просеивающих машинах AS 200 Control ([Retsch](#), Германия) и Anallysette 3 Spartan (Fritsch, Германия) (Anallysette 3 Spartan предоставлен Сколковским институтом науки и технологий). Данные модели имеют одинаковые вибрационные характеристики. Вибрация осуществляется в вертикальном направлении с амплитудой от 0 до 3 мм, частота вибрации зависит от используемой частоты электросети – для частоты электросети  $\nu = 50$  Гц (частота электросети на терри-

тории Российской Федерации) частота вибрация составляет 3000 вибраций в минуту.

**Дизайн эксперимента.** Эксперимент был реализован в виде развертки с увеличением воздействия на образец почвы. В качестве изменяющихся факторов были выбраны амплитуда вибрации и времени просеивания, масса образца и частота вибрации (частота электросети) оставались постоянными. Время просеивания ( $t$ ) было исследовано в диапазоне от 1 до 5 минут с шагом в 1 минуту, амплитуда ( $l_a$ ) – от 1 до 2.5 мм с шагом 0.5 мм для агрочернозема и от 0.5 до 2.5 мм с шагом 0.5 мм для агродерново-подзолистой почвы.

Максимальное значение амплитуды обусловлено требованиями прибора и зависит от массы сит (рис. 1).



**Рис. 1.** Допустимая амплитуда вибраций просеивающей машины (Retsch GmbH, 1998).

Поскольку устойчивость агрегатов агродерново-подзолистой почвы ниже, в эксперименте была дополнительно использована амплитуда колебаний 0.5 мм ([Zubkova, 1998](#); [Skvortsova, 2009](#); [Баева, и др., 2017](#)). Анализ выполнялся в 3–6-кратной повторности.

**Расчет работы по просеиванию почвы, совершаемой аналитической просеивающей машиной.** В качестве количественного показателя оказываемого воздействия на образцы поч-



вы была выбрана и рассчитана полная энергия гармонических колебаний, совершаемая просеивающей машиной –  $A$  (Дж).

$A$  – механическая работа находится из уравнения:  $A = F \cdot x$

$F$  – вынуждающая сила, которая меняется по гармоническому закону:  $F = F_0 \cos(\omega t)$ ,

$x$  – координата центра масс, которая зависит от времени:  
 $x = l_a \cos(\omega t - \varphi)$ ,

где:  $l_a$  – амплитуда вынужденных колебаний,  $\omega$  – частота (рад/с),  $\varphi$  – разность фаз между вынуждающей силой и вынужденными колебаниями.

Так как в системе отсутствуют затухания, то разность фаз  $\varphi = 0$ .

Элементарная работа вынуждающей силы находится из выражения:

$$dA_B = F \cdot dx$$

Работа вынуждающих сил:

$$A_B = \int_{x_0}^{x_1} F dx$$

Уравнения движения имеют вид:

$$m\ddot{x} = F_0 \cos(\omega t)$$

Закон движения:  $x = -\frac{F_0}{m\omega^2} \cos(\omega t) + V_0 t + x_0$ .

Тогда амплитуда вынужденных колебаний определяется выражением  $l_a = \frac{F_0}{m\omega^2}$ ,

отсюда  $F_0 = ml_a \omega^2$ .  $\omega = 2\pi\nu$ ,

период колебаний  $T = \frac{1}{\nu}$ .

Найдем  $A^*$  – работу вынуждающих сил при перемещении от 0 до  $l_a$  (четверть периода):

$$A^* = \int_0^{l_a} F dx = \int_0^{l_a} F_0 \cos(\omega t) dx = \int_0^{l_a} ml_a \omega^2 \cos(\omega t) d(l_a \cos(\omega t))$$

Сделаем замену  $y = \cos(\omega t)$ , тогда получим:

$$A = ml_a^2 \omega^2 \int_0^1 y dy = ml_a^2 \omega^2 \left( \frac{1}{2} y^2 \Big|_0^1 \right) = \frac{1}{2} ml_a^2 \omega^2$$

Следовательно, работа на периоде:

$$A_T = 4A^* = 2ml_a^2\omega^2$$

Чтобы найти полную затрачиваемую энергию для просеивания почвы, надо работу на периоде  $A_T$  умножить на количество периодов за время работы  $vt$ .

Формула для полной работы, совершаемой просеивающей машиной за время  $t$ , которая создает вынужденные колебания с частотой  $\nu$  и амплитудой  $l_a$ :

$$A = 2ml_a^2\omega^2vt = 8\pi^2ml_a^2\nu^3t.$$

В таблице 3 приведены значения работы, совершаемой для просеивания навески почвы массой 500 г с частотой 50 Гц и амплитудой 0.5–2.5 мм в течении 1–5 мин.

**Таблица 3.** Работа, совершаемая при просеивании образца почвы.

Амплитуда вибраций	Время просеивания					Агрочернозем Агродерново- подзолистая почва
	1 мин	2 мин	3 мин	4 мин	5 мин	
0.5 мм	18.75	37.5	56.25	75	93.75	
1.0 мм	75	150	225	300	375	
1.5 мм	168.75	337.5	506.25	675	843.75	
2.0 мм	300	600	900	1200	1500	
2.5 мм	468.75	937.5	1406.25	1875	2343.75	

**Статистическая обработка.** Статистическая обработка данных осуществлялась в программах R Studio и Microsoft Excel. Аппроксимация моделей регрессии, расчет доверительных и предсказательных интервалов, дисперсионный анализ проводились в среде R Studio с использованием стандартной библиотеки stats, визуализация результатов выполнялась с использованием библиотеки ggplot2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки влияния факторов “Амплитуда вибрации” и “Время просеивания” проводилась с использованием дисперсионного анализа. В основе дисперсионного анализа лежит проверка гипотезы

о равенстве средних значений выборок, которое осуществляется путем расчета и сравнения внутригрупповой и межгрупповой изменчивости. Рассмотрим в качестве примера фактор “Амплитуда вибрации”: внутригрупповая изменчивость свидетельствует о неоднородности значений средневзвешенного диаметра (СВД) внутри каждой амплитуды, межгрупповая изменчивость показывает неоднородность значений СВД между различными амплитудами.

Аппроксимация данных осуществлялась функцией асимптотической регрессии с использованием метода нелинейных наименьших квадратов. В качестве независимой переменной была выбрана работа просеивающей машины с образцом почвы –  $A$  (Дж). Зависимой переменной выбран СВД воздушно-сухих агрегатов (мм). Функция асимптотической регрессии:

$$\text{СВД} = \text{Asym} + (R0 - \text{Asym}) * \exp(-c * A),$$

где  $\text{Asym}$  – значения горизонтальной асимптоты (точка выхода функции на плато),  $R0$  – точка пересечения функции с осью ординат,  $c$  – константа скорости изменения.

Качество аппроксимации моделей линейной регрессии проверяется по величине коэффициента регрессии ( $r^2$ ). В данной работе аппроксимация проводилась методами нелинейной регрессии, соответственно, прямое использование  $r^2$  не подходит. Поэтому для оценки качества аппроксимации были построены графики зависимости экспериментальных значений СВД агрегатов от рассчитанных значений СВД агрегатов, по этим данным вычислялся  $r^2$ . Чем ближе значение  $r^2$  к 1, тем лучше функция асимптотической регрессии описывает данные просеивания.

После аппроксимации значения средневзвешенного диаметра воздушно-сухих агрегатов каждого режима просеивания сравнивались со значением коэффициента  $\text{Asym}$  с использованием одновыборочного  $t$ -критерия. Наилучший режим определялся значением работы, достаточным для полного просеивания почвы, при наименьшем времени, затраченном на анализ. Минимализация времени просеивания особенно важна для результатов анализа, поскольку при длительном просеивании происходит постепенное окатывание агрегатов. С увеличением времени просеивания частицы, находящиеся на поверхности крупных агрегатов, облетают,

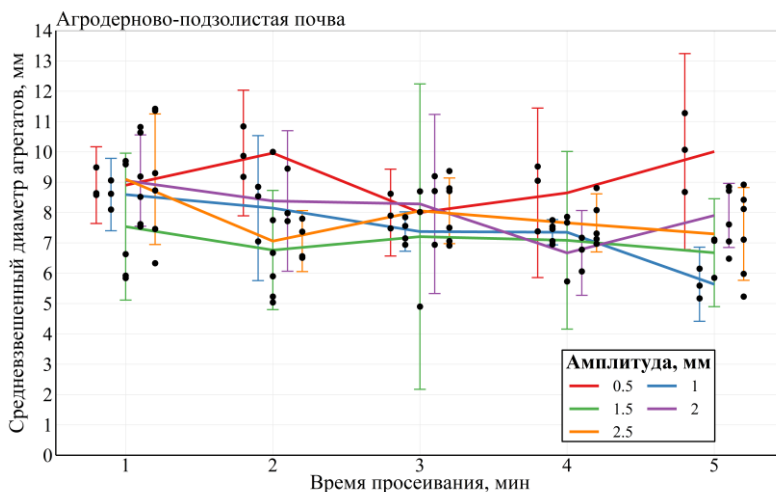
агрегаты приобретают все более круглую форму, соответственно, нарушается исходное состояние агрегатов (рис. 2).

**Агродерново-подзолистая почва.** Данные просеивания показали высокую неоднородность агрегатного состава дерново-подзолистой почвы. С увеличением времени просеивания снижение СВД воздушно-сухих агрегатов происходит вследствие того, что агрегаты окатываются, соответственно, им становится проще проходить через ячейки сит. Также в процессе окатывания крупных агрегатов материал с поверхности крошится и остается на мелких ситах.



**Рис. 2.** Округление агрегатов в ходе длительного просеивания (> 4 минут). а – агрочернозем, б – агродерново-подзолистая.

Для объекта агродерново-подзолистой почвы эксперимент расширили, дополнительно было проведено просеивание с амплитудой 0.5 мм. При изучении результатов просеивания отмечается, что вне зависимости от времени при данной амплитуде материал просеивается слабо (рис. 3). При амплитудах от 1 до 2.5 мм разница между длительностью просеивания становится более заметной. В тоже время разница между амплитудами просеивания не очевидна.



**Рис. 3.** Изменение СВД агрегатов агродерново-подзолистой почвы при различных амплитудах вибрации.

Дисперсионный анализ данных просеивания агродерново-подзолистой почвы, проводимый по факторам: “Амплитуда вибрации”, “Время просеивания” и объединенное влияние амплитуды и времени, показал высокие значения внутригрупповой неоднородности (строка “Ошибка”) (табл. 4). Изучение межгрупповой изменчивости между различными амплитудами вибраций и продолжительностью анализа свидетельствует о наличии статистически значимом влиянии факторов “Амплитуда вибрации” и “Время просеивания” ( $F = 6.74$ ,  $p = 0.0001$  и  $F = 3.35$ ,  $p = 0.0141$  при  $\alpha = 0.05$ ).

**Таблица 4.** Дисперсионный анализ результатов просеивания агродерново-подзолистой почвы.

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ					
Факторы	Ст. св.	Сум. кв. откл.	Ср. кв. откл.	F-значения	p-уровень
Амплитуда	4	41.86	10.47	6.74	0.0001
Время	4	20.79	5.20	3.35	0.0141
Амплитуда: Время	16	31.86	1.99	1.28	0.2312
Ошибка	76	118.09	1.55		

Высокие значения СВД и среднего квадрата отклонений ошибки (“Ср. кв. откл.”) свидетельствуют о том, что образцы пахотного слоя агродерново-подзолистой почвы преимущественно глыбистые и имеют сильно неоднородный агрегатный состав. Значимое влияние факторов “Амплитуда вибрации”, “Время просеивания” связано с тем, что при увеличении амплитуды происходит более полное просеивание, а увеличение длительности просеивания приводит к постепенному окатыванию и истиранию агрегатов.

Использование функции асимптотической регрессии для данных просеивания позволило получить параметры аппроксимации (табл. 5).

**Таблица 5.** Параметры аппроксимации.

	Агродерново- подзолистая почва	Агрочернозем миграционно- мицеллярный
	Коэффициенты аппроксимации	
<b>Asym</b>	7.58	4.02
<b>R0</b>	9.81	6.62
<b>c</b>	0.48	0.06

В агродерново-подзолистой почве максимальное значение функции (коэффициент  $R_0$ ) равняется СВД – 9.81 мм, выход на плато (коэффициент  $Asym$ ) наблюдается при значении СВД – 7.58 мм, константа скорости (коэффициент  $c$ ) равна 0.48. Высокое зна-

чение константы скорости означает, что плато достигается при малых величинах энергии воздействия (рис. 4).

Поиск оптимального режима осуществлялся с использованием одновыборочного  $t$ -критерия, применяемого для сравнения значений СВД при разных энергиях воздействия, соответствующих каждой амплитуде вибрации и времени просеивания, с величиной коэффициента  $A_{sum}$ . В случае агродерново-подзолистой почвы статистически достоверное отсутствие различий наблюдается при величине  $A = 56.25$  Дж и более (за исключением  $A = 375$  Дж – амплитуда вибрации  $l_a = 1$  мм, время просеивания  $t = 5$  мин), т.е. статистически СВД агрегатов при воздействии более 56.25 Дж не различается. Воздействию  $A = 56.25$  Дж соответствует настройки  $l_a = 0.5$  мм,  $t = 3$  мин. Для определения оптимального режима анализа необходимо минимизировать время просеивания, в связи с этим для агродерново-подзолистой почвы оптимальный режим –  $l_a = 1$  мм,  $t = 1$  мин. Функция асимптотической регрессии, моделирующая зависимость СВД агрегатов от энергии воздействия, хорошо улавливает закономерности в поведении данных, однако статистически описывает весьма слабо (СВД расч. к СВД эксп,  $r^2 = 0.12$ ) (рис. 5). Данный факт обусловлен высокой неоднородностью агрегатного состава пахотного горизонта агродерново-подзолистой почвы.

**Агрочернозем миграционно-мицеллярный.** Величина СВД агрегатов агрочернозема миграционно-мицеллярного более чувствительна к изменению энергии воздействия (рис. 6). По значениям СВД амплитуду вибрации можно разделить на 2 уровня: 1 –1.5 мм и 2 –2.5 мм. В рамках каждого уровня доверительные интервалы пересекаются, а средние значения СВД агрегатов близки. В агрочерноземе, как и в агродерново-подзолистой почве, разница между амплитудами визуально не прослеживается.

Согласно результатам дисперсионного анализа результатов просеивания агрочернозема миграционно-мицеллярного, значение внутригрупповой изменчивости меньше, чем для агродерново-подзолистой почвы (агродерново-подзолистая почва – “Ср. кв. откл.” = 1.55, агрочернозем миграционно-мицеллярный – “Ср. кв. откл.” = 0.74), что свидетельствует о меньшей неоднородности агрегатного состава (табл. 6).

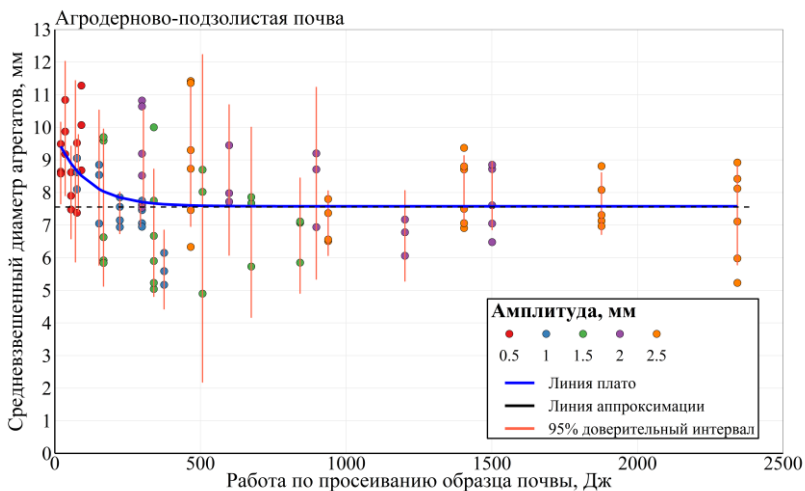


Рис. 4. Аппроксимация результатов просеивания агродерново-подзолистой почвы.

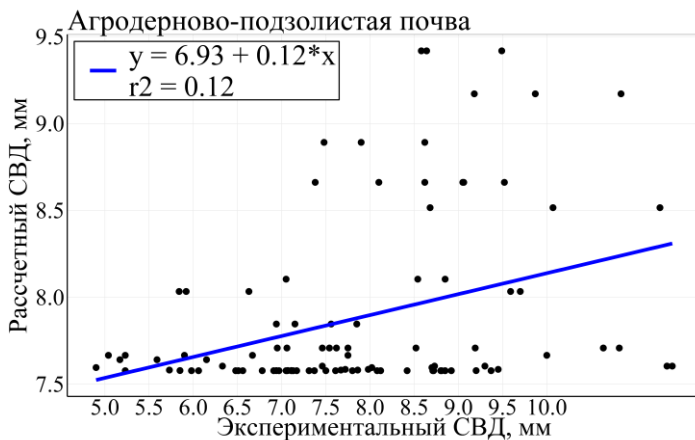
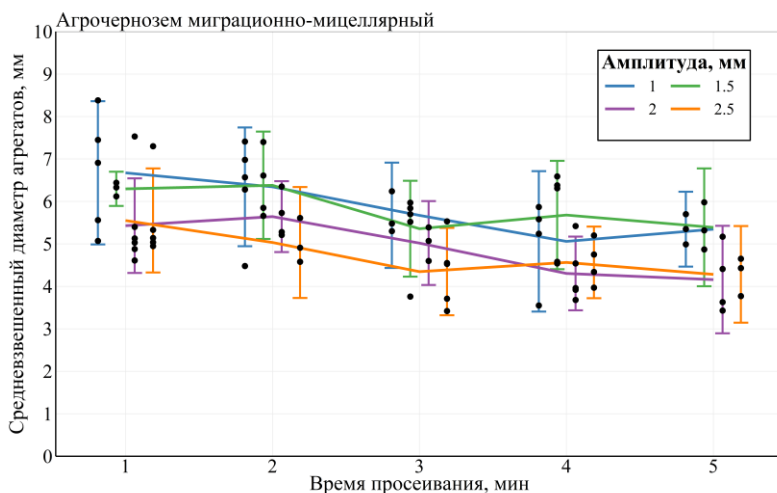


Рис. 5. Проверка качества аппроксимации результатов просеивания агродерново-подзолистой почвы.





**Рис. 6.** Изменение СВД агрегатов агрочернозема миграционно-мицеллярного при различных амплитудах вибрации.

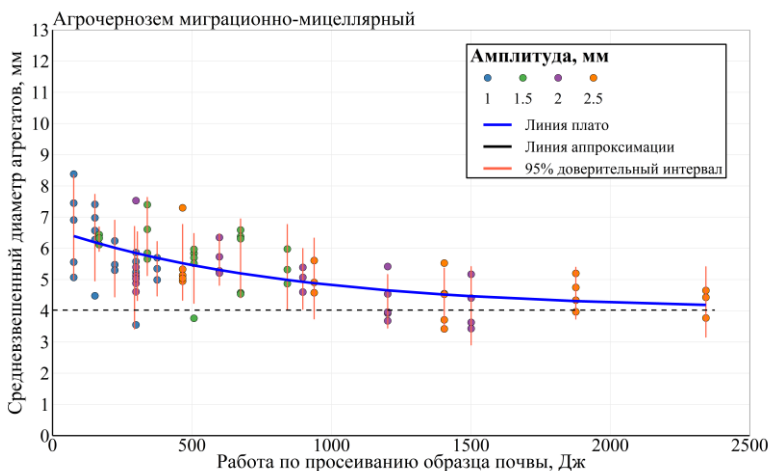
Изучение факторов “Амплитуда вибрации”, “Время просеивания” показало статистически достоверное влияние каждого на величину СВД агрегатов ( $F = 9.36$ ,  $p = 0.00003$  и  $F = 7.26$ ,  $p = 0.00007$  при  $\alpha = 0.05$ , соответственно). Следовательно, увеличение амплитуды и времени просеивания способствует более полному просеиванию.

**Таблица 6.** Дисперсионный анализ результатов просеивания агрочернозема миграционно-мицеллярного.

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ					
Факторы	Ст. св.	Сум. кв. откл.	Ср. кв. откл.	F-значения	p-уровень
Амплитуда	3	20.66	6.89	9.36	0.00003
Время	4	21.37	5.34	7.26	0.00007
Амплитуда: Время	12	3.05	0.25	0.35	0.977
Ошибка	62	45.62	0.74		

Регрессионный анализ позволяет изучить поведение данных просеивания. В агрочерноземе максимальное значение функции

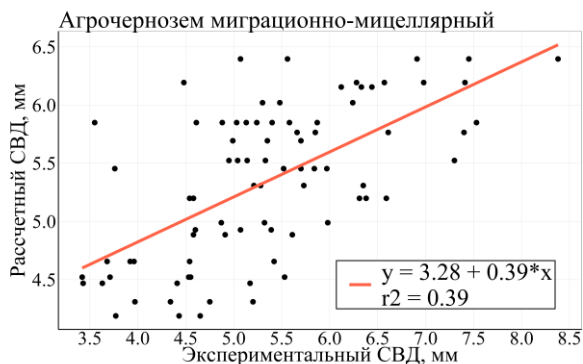
(коэффициент  $R_0$ ) имеет значение СВД равное 6.62 мм, выход на плато (коэффициент  $As_{ум}$ ) наблюдается при значении СВД – 4.02 мм, константа скорости (коэффициент  $c$ ) равна 0.06 (табл. 5). Низкое значение константы скорости свидетельствует о длительном плавном выходе значений функции на плато (рис. 7). Функция асимптотической регрессии лучше описывает зависимость СВД агрегатов от энергии воздействия для агрочернозема, чем для агродерново-подзолистой почвы (СВД расч. от СВД эксп,  $r^2 = 0.39$ ). Улучшение качества аппроксимации связано с большей однородностью агрегатного состава (рис. 8).



**Рис. 7.** Аппроксимация результатов просеивания агрочернозема миграционно-мицеллярного.

Оптимальный режим просеивания для агрочернозема миграционно-мицеллярного так же, как и для агродерново-подзолистой почвы, сопровождается близостью СВД агрегатов к значению коэффициента  $As_{ум}$ . На основании одновыборочного  $t$ -критерия было выявлено, что статистически достоверное отсутствие различий наблюдается при величине  $A = 937.5$  Дж и более (за исключением  $A = 300$  Дж – амплитуда вибрации  $l_a = 1$  мм, время просеивания  $t = 4$  мин). Воздействие 300 Дж соответствует  $l_a = 2.5$  мм,  $t = 2$  мин (рис. 7). Большие значения работы связаны с

увеличением времени анализа, следовательно, режим просеивания –  $l_a = 2.5$  мм,  $t = 2$  мин является оптимальным.



**Рис. 8.** Проверка качества аппроксимации результатов просеивания агрочернозема миграционно-мицеллярного.

## ВЫВОДЫ

Из результатов методического эксперимента следует, что агрегатный состав агродерново-подзолистой почвы обладает высокой неоднородностью, агрегатный состав агрочернозема миграционно-мицеллярного более однороден (“Ср. кв. откл.” = 1.55 и 0.74, соответственно).

Оптимальные результаты просеивания агродерново-подзолистой почвы достигаются при малых значениях энергии просеивания ( $A = 56.25$  Дж), режим просеивания соответствует амплитуде вибрации  $l_a = 1$  мм, времени просеивания  $t = 1$  мин. Оптимальное просеивание агрочернозема миграционно-мицеллярного достигается при работе  $A = 937.5$  Дж, режим просеивания – амплитуда вибрации  $l_a = 2.5$  мм и время просеивания  $t = 2$  мин.

На основе полученных результатов анализа агрегатного состава почв на аналитической просеивающей машине методом “сухого” просеивания по Саввинову при частоте электросети  $\nu = 50$  Гц рекомендуется проводить с использованием режима просеивания, соответствующего амплитуде вибрации  $l_a = 2.5$  мм и времени просеивания  $t = 2$  мин.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-316-00139 и Президиума РАН (грант на проведение фундаментальных научных исследований в 2018 г.) с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева и Сколковского института науки и технологий (Сколтех).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Цветкова Ю.Д.* Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. № 88. С. 47–74.  
DOI: [10.19047/0136-1694-2017-88-47-74](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-47-74).
2. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы определения физических свойств почв и грунтов (В поле и лаборатории), М.: Высшая школа, 1961. 343 с.
3. *Виленский Д.Г.* К методике исследования прочности почв при изучении почвенной эрозии // Почвоведение. 1935. № 115. Вып. 5–6. С. 789–796.
4. *Вильямс В.Р.* Лекции по почвоведению. М.: Типография общества распространения полезных книг, 1897. 260 с.
5. *Вильямс В.Р.* Курс общего земледелия (общая культура), ред. Гильтебрандт Д.И. М.: Типография Г. Лиснера и А. Гешеля, 1901. 190 с.
6. *Вильямс В.Р.* Курс общего земледелия, ред. Андриевский И.К. М.: Издательство студенческого Агрономического Кружка по изучению Смоленской губернии, 1910. 203 с.
7. *Вильямс В.Р.* Общее земледелие с основами почвоведения. М.: Новый агроном, 1927. 494 с.
8. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв, ред. Розанов Б.Г. и Судницын И.И. М.: Издательство Московского университета, 1984. 204 с.
9. *Качинский Н.А.* Физика почв. М.: Высшая школа, 1965. 319 с.
10. *Ревут И.Б.* Физика в земледелии, ред. Иоффе А.Ф. М.: Физматгиз, 1960. 400 с.
11. *Розанов Б.Г.* Генетическая морфология почв, ред. Добровольский Г.В. и Ковда В.А. М.: Издательство Московского университета, 1975. 291 с.

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96.  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 96

12. *Саввинов Н.И.* Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках, ред. Вильямс В.Р. М.: Сельколхозгиз, 1931. 46 с.
13. *Шеин Е.В.* Курс физики почв, ред. Владыченский А.С. и Бондарев А.Г. М.: Издательство Московского университета, 2005. 432 с.
14. *Шеин Е.В., Карпачевский Л.О.* Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
15. *Шеин Е.В.* и др. Рабочая тетрадь. Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Буки-Веди, 2017. 119 с.
16. *Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R., López M.V.* Soil management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain) // *Science of the total environment*. 2007. No. 387. P. 179–182.  
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2007.01.046](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.046).
17. *Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Cantero-Martínez C., López M.V.* Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil // *Soil and Tillage Research*. 2008. No. 101. P. 62–68. DOI: [10.1016/j.still.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2008.06.004).
18. *Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R., López M.V.* Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions // *Geoderma*. 2008. No. 145. P. 390–396.  
DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.04.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.005).
19. *Busscher W., Krueger E., Novak J., Kurtener D.* Comparison of soil amendments to decrease high strength in SE USA Coastal Plain soils using fuzzy decision-making analyses // *International Agrophysics*. 2007. No. 21. P. 225–231.
20. *Busscher W.J., Novak J.M. u Caesar-TonThat T.C.* Organic matter and polyacrylamide amendment of Norfolk loamy sand // *Soil and Tillage Research*. 2007. No. 93. P. 171–178. DOI: [10.1016/j.still.2006.03.023](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.023).
21. *Gartzia-Bengoetxea N., González-Arias A., Merino A., de Arano I.M.* Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests // *Soil Biology and Biochemistry*. 2009. No. 41. P. 1674–1683. DOI: [10.1016/j.soilbio.2009.05.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.05.010).
22. *Gartzia-Bengoetxea N., Arbestain M.C., Mandiola E., De Arano I.M.* Physical protection of soil organic matter following mechanized forest operations in *Pinus radiata* D.Don plantations // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. No. 43. P. 141–149. DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.09.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.025).
23. *Gunina A., Kuz'yakov Y.* Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from <sup>13</sup>C natural abundance // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. No. 71. P. 95–104.  
DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.01.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.011).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96.  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 96

24. *Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y.* Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilization in young soils // *Plant and Soil*. 2015. No. 387. P. 265–275.

DOI: [10.1007/s11104-014-2299-y](https://doi.org/10.1007/s11104-014-2299-y).

25. *Guzmán G., Barrón V., Gómez J.A.* Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments // *Catena*. 2010. No. 82. P. 126–133. DOI: [10.1016/j.catena.2010.05.011](https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.011).

26. *Jin X., An T., Gall A., Li S., Sun L., Pei J., Gao X., He X., Fu S., Ding X., Wang J.* Long-term plastic film mulching and fertilization treatments changed the annual distribution of residual maize straw C in soil aggregates under field conditions: characterization by <sup>13</sup>C tracing // *Journal of Soils and Sediments*. 2018. No. 18. P. 169–178. DOI: [10.1007/s11368-017-1754-9](https://doi.org/10.1007/s11368-017-1754-9).

27. *Jongmans A., Feijtel T., Miedema R., van Breemen N. Veldkamp A.* Soil formation in a Quaternary terrace sequence of the Allier, Limagne, France. Macro- and micromorphology, particle size distribution, chemistry // *Geoderma*. 1991. No. 49. P. 215–239. DOI: [10.1016/0016-7061\(91\)90077-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90077-7).

28. *Kristiansen S., Schjøning P., Thomsen I., Olesen J., Kristensen K., Christensen B.* Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture // *Geoderma*. 2006. No. 137. P. 147–154.

DOI: [10.1016/j.geoderma.2006.08.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.005).

29. *Labiadh M., Gilles Bergametti G., Attoui B., Sekrafi S.* Particle size distributions of South Tunisian soils erodible by wind // *Geodinamica Acta*. 2011. No. 24. P. 37–47. DOI: [10.3166/ga.24.37-47](https://doi.org/10.3166/ga.24.37-47).

30. *López M., de Dios Herrero J., Hevia G., Gracia R., Buschiazzi D.* Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies // *Geoderma*. 2007. No. 139. P. 407–411.

DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006).

31. *Mbagwu J.S.C., Piccolo A.* Carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in aggregates of organic waste-amended soils // *Biological Wastes*. 1990. No. 31. P. 97–111. DOI: [10.1016/0269-7483\(90\)90164-N](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90164-N).

32. *Moreno-de las H. M.* Development of soil physical structure and biological functionality in mining spoils affected by soil erosion in a Mediterranean-Continental environment // *Geoderma*. 2009. No. 149. P. 249–256.

DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.12.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.003).

33. *Perfect E., Blevins R.L.* Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. No. 61. P. 896–900.

DOI: [10.2136/sssaj1997.03615995006100030026x](https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030026x).

34. *Perfect E., Zhai Q., Blevins R.L.* Soil and tillage effects on the characteristic size and shape of aggregates // *Soil Science Society of America Journal*. 1997. No. 61. P. 1459–1465.

DOI: [10.2136/sssaj1997.03615995006100050025x](https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100050025x).

35. *Perfect E., Zhai Q., Blevins R.L.* Estimation of Weibull brittle fracture parameters for heterogeneous materials // Soil Science Society of America Journal. 1998. No. 62. P. 1212–1219.

DOI: [10.2136/sssaj1998.03615995006200050009x](https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050009x).

36. *Preston S., Griffiths B.S., Young I.M.* An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry // European Journal of Soil Science. 1997. No. 48. P. 31–37. DOI: [10.1111/j.1365-2389.1997.tb00182.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00182.x).

37. *Retsch GmbH.* Инструкция по эксплуатации ситового анализатора AS 200, Haan. 1998. 37 с.

38. *Sainju U.M.* Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separates by dry and wet sieving methods // Soil Science. 2006. No. 171. P. 937–949.

DOI: [10.1097/01.ss0000228062.30958.5a](https://doi.org/10.1097/01.ss0000228062.30958.5a).

39. *Sarker J., Singh B., Cowie A., Fang Y., Collins D., Dougherty W., Singh B.* Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues // Soil Biology and Biochemistry. 2018. No. 116. P. 22–38.

DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030).

40. *Skvortsova E.B.* Changes in the geometric structure of pores and aggregates as indicators of the structural degradation of cultivated soils // Eurasian Soil Science. 2009. No. 11. P. 1254–1262.

DOI: [10.1134/S1064229309110088](https://doi.org/10.1134/S1064229309110088).

41. *Wang R., Dungait J., Buss H., Yang S., Zhang Y., Xu Z., Jiang Y.* Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland // Science of the total environment. 2017. No. 575. P. 564–572.

DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.09.018](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.018).

42. *Wang X., Cammeraat E., Cerli C., Kalbitz K.* Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition // Soil Biology and Biochemistry. 2014. No. 72. P. 55–65.

DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.01.018](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.018).

43. *Wang Y., Hu N., Ge T., Kuz'yakov Y., Wang Z., Li Z., Tang Z., Chen Y., Wu C., Lou Y.* Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment // Applied Soil Ecology. 2017. No. 111. P. 65–72. DOI: [10.1016/j.apsoil.2016.11.015](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.015).

44. *Wei K., Chen Z., Zhang X., Liang W., Chen L.* Tillage effects on phosphorus composition and phosphatase activities in soil aggregates // Geoderma. 2014. No. 217–218. P. 37–44.

DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.002).

45. *Weng Z., Van Zwieten L., Singh B., Tavakkoli E., Kimber S., Morris S., Macdonald L., Cowie A.* The accumulation of rhizodeposits in organo-mineral

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96.  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 96

fractions promoted biochar-induced negative priming of native soil organic carbon in Ferralsol // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. No. 118. P. 91–96. DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.12.008).

46. Yang H., Wang J., Zhang F. Soil aggregation and aggregate-associated carbon under four typical halophyte communities in an arid area // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No. 23. P. 23920–23929. DOI: [10.1007/s11356-016-7583-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7583-3).

47. Zhang S., Li Q., Lü Y., Zhang X., Liang W. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China // *Soil and Tillage Research*. 2012. No. 124. P. 196–202. DOI: [10.1016/j.still.2012.06.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.007).

48. Zhang S., Li Q., Zhang X., Wei K., Chen L., Liang W. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. No. 62. P. 147–156. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.03.023](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.023).

49. Zhang Z., Zhang X., Mahamood M., Zhang S., Huang S., Liang W. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil nematode communities within aggregates // *Scientific reports*. 2016. No. 6. P. 1–12. DOI: [10.1038/srep31118](https://doi.org/10.1038/srep31118).

50. Zubkova T.A. The nature of mechanical strength of oven-dry aggregates of soil // *Eurasian Soil Science*. 1998. No. 3. P. 254–262.

## DRY SIEVING ANALYSIS OF SOIL BY VIBRATORY SIEVE SHAKER: MODIFICATION AND OPTIMIZATION

D. S. Fomin<sup>1\*</sup>, I. A. Valdes-Korovkin<sup>1,2</sup>, A. P. Holub<sup>3</sup>,  
A. V. Yudina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,  
Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskiy per., 7, build. 2,*

\* <https://orcid.org/0000-0003-3733-028>, e-mail: [fomin\\_ds@esoil.ru](mailto:fomin_ds@esoil.ru)

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University,  
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1–12*

<sup>3</sup>*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,  
Russia, 119192, Moscow, Michurinskiy prospekt, 1*

*Received 06.11.2018, Revised 20.11.2018, Accepted 12.03.2019*

This study performs a methodical experiment on adaptation and unification of soil dry sieving analysis. The analysis is based on the Savvinov dry sieving method that uses 0.5–1.5 kg air-dried soil samples which are passed through the 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 mm sieves. The studied soils are silt loam Eutric



Retisol and Haplic Chernozem. From each object, 50 kg of fresh soil was sampled from the plow layer (1m<sup>2</sup> area). Air-dried soil subsamples of 500 ± 0.5 g were used for analysis, clods bigger than 50 mm were gently crushed by pestle with rubber tip. The sieving parameters were the following: 50 Hz vibration frequency – 3000 rpm (depend on current), from 0.5 to 2.5 mm vibration amplitude and from 0.5 to 5 minutes sieving time. Sieve shaker mechanical work (J) was calculated for each mode. The data approximation was carried out by means of the asymptotic regression function. An optimal dry sieving mode was defined for each soil: Eutric Retisol – 1 mm vibration amplitude during 1 minute, Haplic Chernozem – 2.5 mm vibration amplitude during 2 minutes. In the case of sandy soils dry sieving doesn't require much effort. Therefore, in this experiment only fine macrostructure soils were selected (11–16 % < 2 um clay by laser diffraction method). As a result, the unified dry sieving mode of vibratory sieve shakers was developed which is applicable for all studied soils: 2.5 mm vibration amplitude during 2 minutes and 50 Hz frequency when 500 g air-dried soil sample is used.

*Keywords:* soil structure, aggregates, fractionation, structural stability, erosiveness.

## REFERENCES

1. Baeva Yu.I., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Tsvetkova Yu.D., Change in aggregate structure of various soil types during the succession of abandoned lands, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 88, pp. 47–74, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-88-47-74](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-47-74).
2. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody opredeleniya fizicheskikh svoystv pochv i gruntov (V pole i laboratorii)* (Methods for determining the physical properties of soils (In the field and laboratory)), Moscow: Vysshaya shkola, 1961, 343 p.
3. Vilenskiy D.G., K metodike issledovaniya prochnosti pochv pri izuchenii pochvennoy erozii (To the method of studying the strength of soils in the study of soil erosion), *Pochvovedenie*, 1935, Vol. 5–6, No. 115, pp. 789–796.
4. Vil'yams V.R., *Lektsii po pochvovedeniyu* (Lectures on soil science), Moscow: Tipografiya obshchestva rasprostraneniya poleznykh knig, 1897, 260 p.
5. Vil'yams V.R., *Kurs obshchego zemledeliya (obshchaya kul'tura)* (The course of general agriculture (general culture)), Moscow: Tipografiya G. Lissnera and A. Geshelya, 1901, 190 p.
6. Vil'yams V.R., *Kurs obshchego zemledeliya* (The course of general agriculture), Moscow: Izdatel'stvo studencheskogo Agronomicheskogo Kruzhka po izucheniyu Smolenskoj gubernii, 1910, 203 p.

7. Vil'yams V.R., *Obshcheye zemledeliye s osnovami pochvovedeniya* (General agriculture with the basics of soil science), Moscow: Novyi agronom, 1927, 494 p.
8. Voronin A.D., *Strukturno-funksional'naya gidrofizika pochv* (Structural and functional soil hydrophysics), Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1984, 204 p.
9. Kachinskiy N.A., *Fizika pochv* (Soil physics), Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 319 p.
10. Revut I.B., *Fizika v zemledelii* (Physics in agriculture), Moscow: Fizmatgiz, 1960, 400 p.
11. Rozanov B.G., *Geneticheskaya morfologiya pochv* (Genetic soil morphology), Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1975, 291 p.
12. Savvinov N.I., *Struktura pochvy i yeye prochnost' na tseline, perelege i staropakhotnykh uchastkakh* (Soil structure and its strength on virgin soil, fallow and old-cultivated areas), Moscow: Selkolkhozgiz, 1931, 46 p.
13. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics course), Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2005, 432 p.
14. Shein E.V., Karpachevskii L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: Grif and K, 2007, 616 p.
15. Shein E.V. et al. *Rabochaya tetrad'. Praktikum po fizike tverдой fazy pochv* (Workbook. Workshop on the physics of the solid phase of soils), Moscow: Buki-Vedi, 2017, 119 p.
16. Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R., López M.V., Soil management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain), *Science of the total environment*, 2007, No. 387, pp. 179–182, DOI: [10.1016/j.scitotenv.2007.01.046](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.046).
17. Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Cantero-Martínez C., López M.V., Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil, *Soil and Tillage Research*, 2008, No. 101, pp. 62–68, DOI: [10.1016/j.still.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2008.06.004).
18. Álvaro-Fuentes J., Arrúe J.L., Gracia R., López M.V. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: Temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions, *Geoderma*, 2008, No. 145, pp. 390–396, DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.04.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.04.005).
19. Busscher W., Krueger E., Novak J., Kurtener D., Comparison of soil amendments to decrease high strength in SE USA Coastal Plain soils using fuzzy decision-making analyses, *International Agrophysics*, 2007, No. 21, pp. 225–231.
20. Busscher W.J., Novak J.M., Caesar-Ton That T.C., Organic matter and polyacrylamide amendment of Norfolk loamy sand, *Soil and Tillage Research*, 2007, No. 93, pp. 171–178, DOI: [10.1016/j.still.2006.03.023](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.023).
21. Gartzia-Bengoetxea N., González-Arias A., Merino A., de Arano I.M., Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests, *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, No. 41, pp. 1674–1683, DOI: [10.1016/j.soilbio.2009.05.010](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.05.010).

22. Gartzia-Bengoetxea N., Arbestain M.C., Mandiola E., De Arano, I.M., Physical protection of soil organic matter following mechanized forest operations in *Pinus radiata* D. Don plantations, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, No. 43, pp. 141–149, DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.09.025](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.025).
23. Gunina A., Kuzyakov Y., Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from <sup>13</sup>C natural abundance, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, No. 71, pp. 95–104, DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.01.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.011).
24. Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y., Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilization in young soils, *Plant and Soil*, 2015, No. 387, pp. 265–275, DOI: [10.1007/s11104-014-2299-y](https://doi.org/10.1007/s11104-014-2299-y).
25. Guzmán G., Barrón V., Gómez J.A., Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments, *Catena*, 2010, No. 82, pp. 126–133, DOI: [10.1016/j.catena.2010.05.011](https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.011).
26. Jin X., An T., Gall A., Li S., Sun L., Pei J., Gao X., He X., Fu S., Ding X., Wang J., Long-term plastic film mulching and fertilization treatments changed the annual distribution of residual maize straw C in soil aggregates under field conditions: characterization by <sup>13</sup>C tracing, *Journal of Soils and Sediments*, 2018, No. 18, pp. 169–178, DOI: [10.1007/s11368-017-1754-9](https://doi.org/10.1007/s11368-017-1754-9).
27. Jongmans A., Feijtel T., Miedema R., van Breemen N., Veldkamp A., Soil formation in a Quaternary terrace sequence of the Allier, Limagne, France. Macro- and micromorphology, particle size distribution, chemistry, *Geoderma*, 1991, No. 49, pp. 215–239, DOI: [10.1016/0016-7061\(91\)90077-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90077-7).
28. Kristiansen S., Schjonning P., Thomsen I., Olesen J., Kristensen K., Christensen B., Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture, *Geoderma*, 2006, No. 137, pp. 147–154, DOI: [10.1016/j.geoderma.2006.08.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.005).
29. Labiadh M., Gilles Bergametti G., Attoui B., Sekrafi S., Particle size distributions of South Tunisian soils erodible by wind, *Geodinamica Acta*, 2011, No. 24, pp. 37–47, DOI: [10.3166/ga.24.37-47](https://doi.org/10.3166/ga.24.37-47).
30. López M., de Dios Herrero J., Hevia G., Gracia R., Buschiazzo D., Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies, *Geoderma*, 2007, No. 139, pp. 407–411, DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.03.006](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006).
31. Mbagwu J.S.C., Piccolo A., Carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in aggregates of organic waste-amended soils, *Biological Wastes*, 1990, No. 31, pp. 97–111, DOI: [10.1016/0269-7483\(90\)90164-N](https://doi.org/10.1016/0269-7483(90)90164-N).
32. Moreno-de las H.M., Development of soil physical structure and biological functionality in mining spoils affected by soil erosion in a Mediterranean-Continental environment, *Geoderma*, 2009, No. 149, pp. 249–256, DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.12.003](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.003).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96.  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 96

33. Perfect E., Blevins R.L., Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment, *Soil Science Society of America Journal*, 1997, No. 61, pp. 896–900,  
DOI: [10.2136/sssaj1997.03615995006100030026x](https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030026x).

34. Perfect E., Zhai Q., Blevins R.L., Soil and tillage effects on the characteristic size and shape of aggregates, *Soil Science Society of America Journal*, 1997, No. 61, pp. 1459–1465,  
DOI: [10.2136/sssaj1997.03615995006100050025x](https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100050025x).

35. Perfect E., Zhai Q., Blevins R.L., Estimation of Weibull brittle fracture parameters for heterogeneous materials, *Soil Science Society of America Journal*, 1998, No. 62, pp. 1212–1219,  
DOI: [10.2136/sssaj1998.03615995006200050009x](https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050009x).

36. Preston S., Griffiths B.S., Young I.M., An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry, *European Journal of Soil Science*, 1997, No. 48, pp. 31–37, DOI: [10.1111/j.1365-2389.1997.tb00182.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00182.x).

37. Retsch GmbH, Instructions for the sieve shaker use AS 200, Haan, 1998, 37 p.

38. Sainju U.M., Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separates by dry and wet sieving methods, *Soil Science*, 2006, No. 171, pp. 937–949,  
DOI: [10.1097/01.ss0000228062.30958.5a](https://doi.org/10.1097/01.ss0000228062.30958.5a).

39. Sarker J., Singh B., Cowie A., Fang Y., Collins D., Dougherty W., Singh B., Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, No. 116, pp. 22–38,  
DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.09.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030).

40. Skvortsova E.B., Changes in the geometric structure of pores and aggregates as indicators of the structural degradation of cultivated soils, *Eurasian Soil Science*, 2009, No. 11, Vol. 42, pp. 1254–1262,  
DOI: [10.1134/S1064229309110088](https://doi.org/10.1134/S1064229309110088).

41. Wang R., Dungait J., Buss H., Yang S., Zhang Y., Xu Z., Jiang Y., Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland, *Science of the total environment*, 2017, No. 575, pp. 564–572,  
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.09.018](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.018).

42. Wang X., Cammeraat E., Cerli C., Kalbitz K., Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition, *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, No. 72, pp. 55–65,  
DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.01.018](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.018).

43. Wang Y., Hu N., Ge T., Kuzyakov Y., Wang Z., Li Z., Tang Z., Chen Y., Wu C., Lou Y., Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment, *Applied Soil Ecology*, 2017, No. 111, pp. 65–72,  
DOI: [10.1016/j.apsoil.2016.11.015](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.015).

Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96.  
Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, 96

44. Wei K., Chen Z., Zhang X., Liang W., Chen L., Tillage effects on phosphorus composition and phosphatase activities in soil aggregates, *Geoderma*, 2014, No. 217–218, pp. 37–44.

DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.11.002).

45. Weng Z., Van Zwieten L., Singh B., Tavakkoli E., Kimber S., Morris S., Macdonald L., Cowie A., The accumulation of rhizodeposits in organo-mineral fractions promoted biochar-induced negative priming of native soil organic carbon in Ferralsol, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, No. 118, pp. 91–96, DOI: [10.1016/j.soilbio.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.12.008).

46. Yang H., Wang J., Zhang F., Soil aggregation and aggregate-associated carbon under four typical halophyte communities in an arid area, *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, No. 23, pp. 23920–23929, DOI: [10.1007/s11356-016-7583-3](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7583-3).

47. Zhang S., Li Q., Lü Y., Zhang X., Liang W., Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China, *Soil and Tillage Research*, 2012, No. 124, pp. 196–202,

DOI: [10.1016/j.still.2012.06.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.007).

48. Zhang S., Li Q., Zhang X., Wei K., Chen L., Liang W., Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, No. 62, pp. 147–156. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.03.023](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.023).

49. Zhang Z., Zhang X., Mahamood M., Zhang S., Huang S., Liang W., Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil nematode communities within aggregates, *Scientific reports*, 2016, No. 6, pp. 1–12, DOI: [10.1038/srep31118](https://doi.org/10.1038/srep31118).

50. Zubkova T.A., The nature of mechanical strength of oven-dry aggregates of soil, *Eurasian Soil Science*, 1998, Vol. 3, No. 31, pp. 254–262.

### **Ссылки для цитирования:**

Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В. Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического рассева // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 96. С. 149-177. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177)

### **For citation:**

Fomin D.S., Valdes-Korovkin I.A., Holub A.P., Yudina A.V. Dry sieving analysis of soil by vibratory sieve shaker: modification and optimization, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, V. 96, pp. 149-177, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-96-149-177](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-96-149-177)