УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106



Ссылки для цитирования:

Юдина А.В., Фомин Д.С. Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 87-106. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106

Cite this article as:

Yudina A.V., Fomin D.S., Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 115, pp. 87-106, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-115-87-106

Благодарность:

Анализ методом лазерной дифракции выполнен с привлечением оборудования ЦКП "Функции и свойства почв и почвенного покрова" Почвенного института им. В.В. Докучаева (регистрационный номер 441994, <u>https://ckp-rf.ru/ckp/441994/</u>).

Acknowledgments:

Analysis using laser diffraction method was carried out with the equipment of the Centre for Collective Use "Functions and Properties of Soils and Soil Cover" of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (registration number 441994, <u>https://ckp-rf.ru/ckp/441994/</u>).

Энергия диспергации суглинистых почв до элементарных почвенных частиц с помощью ультразвука

© 2023 г. А. В. Юдина^{*}, Д. С. Фомин^{**}

ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2, *<u>https://orcid.org/0000-0003-2453-3090</u>, e-mail: <u>yudina_av@esoil.ru</u>, **<u>https://orcid.org/0000-0003-3733-0284</u>.

Поступила в редакцию 15.05.2023, после доработки 29.05.2023, принята к публикации 27.06.2023

Резюме: Элементарные почвенные частицы – первый специфичный для почв уровень иерархии структуры почвы, также являющийся объектом гранулометрического состава почв. Для диспергации твердой фазы почв до элементарных почвенных частиц необходимо разрушить прочные

связи между частицами с помощью физического воздействия. Эффективным способом физической диспергации является воздействие на почвенные суспензии ультразвуком. Однако в зависимости от типа почвы необходимый уровень энергии может варьировать, так как он определяется устойчивостью структуры почвы. В данной работе был проведен эксперимент с увеличивающейся в диапазоне от 65 до 1 101 Дж мл⁻¹ энергией ультразвуковой диспергации при постоянной мощности равной 32.4 Ватт. Для эксперимента были выбраны верхние горизонты трех типов почв – дерново-подзолистой, серой лесной и чернозема суглинистого гранулометрического состава. Для этого был использован диспергатор зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со ступенчатым цельным наконечником (stepped solid horn tip, 13 мм). Установлено, что величина суммарной энергии диспергации Е, необходимая для полного разрушения агрегатов почв до ЭПЧ, зависит от типа почв и варьирует в пределах 200-800 Дж мл⁻¹ для суглинистых почв содержанием органического вешества с 1.8–4.6 г · 100 г⁻¹ пробоподготовки почвы. Для почв к гранулометрическому анализу и последующего определения текстурного класса почв согласно классификации Качинского достаточной является величина $E_t = 250 \, \text{Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$, так как она позволяет получить максимальное количество физической глины (<10 мкм) при минимальной длительности пробоподготовки.

Ключевые слова: гранулометрический состав, лазерная дифрактометрия, ультравук, пробоподготовка, гранулометрический анализ, фракционирование почв.

Energy of dispersing of loamy soils to elementary particles using ultrasound

© 2023 A. V. Yudina^{*}, D. S. Fomin^{**}

Federal Research Centre "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute", 7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation, *<u>https://orcid.org/0000-0003-2453-3090</u>, e-mail: <u>yudina_av@esoil.ru</u>, **<u>https://orcid.org/0000-0003-3733-0284</u>.

Received 15.05.2023, Revised 29.05.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: Elementary soil particles are the first soil-specific level in the soil structure hierarchy, which is also the object of the soil texture analysis. To disperse soil solids to elementary soil particles (ESP), it is necessary to break the strong bonds between particles by physical action. An effective way of

physical dispersion is to treat soil suspensions with ultrasound. However, depending on the type of soil, the required energy level varies, as it is determined by the stability of the soil structure. In this work the experiment with increasing energy (from 65 to 1 101 J·mL⁻¹) of ultrasonic dispersion at constant power equal to 32.4 W is described. Soil samples from the upper horizons of three types of loamy soils (Retisol, Phaeozem, Chernozem) were used in the experiment. For this purpose, a horn-type ultrasonic disruptor Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, USA) with a stepped solid horn tip (13 mm) was used. It was found that the value of the total energy of dispersion E_t required for complete destruction of soil aggregates to ESP depends on soil type and varies within 200-800 J·mL⁻¹ for loamy soils with an organic matter content of $1.8-4.6 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ soil. For sample preparation of soils for grain-size analysis with a subsequent determination of soil texture class according to Kachinsky classification, the value $E_t = 250 \text{ J} \cdot \text{mL}^{-1}$ is sufficient, as it allows obtaining the maximum amount of physical clay $(<10 \ \mu m)$ at the minimum duration of sample preparation.

Keywords: soil texture, laser diffractometry, pretreatment, grain-size analysis, soil fractionation.

ВВЕДЕНИЕ

Элементарные почвенные частицы (ЭПЧ, elementary soil particles) - твердофазные продукты почвообразования, представгорных минералов, ленные обломками пород И органоминеральными и органическими частицами, все компоненты которых находятся в химическом и физико-химическом взаимодействии (Воронин, 1984; Юдина и др., 2018). ЭПЧ является первым специфичным для почвы как природного тела уровнем иерархии структурной организации (Воронин, 1984; Розанов, 1983; Yudina, Kuzyakov, 2023), а также объектом измерений в гранулометрическом анализе почв (Юдина и др., 2018). Существующие стандарты гранулометрического анализа почв и грунтов (ГОСТ 12536-2014; ISO 11277:2009) и наиболее распространенные в научнопрактической экспертизе методы (пирофосфатный способ пробоподготовки, Шеин и др., 2007) основаны на комбинации химических и физических приемов диспергации почвенных частиц. Для определения размера первичных элементов почв, т. е. минеральных частиц, необходимо удалить клеящие вещества, преимущественно представленные органо-минеральными соединениями и

оксидами, гидроксидами металлов. Для этого используются различные способы окисления органических веществ и экстракции соединений Fe, Al (Юдина и др., 2018). Физические этапы пробоподготовки почвы не стандартизированы количественно по оказываемому механическому воздействию. Для решения проблемы стандартизации воздействия был предложен ультразвуковой (УЗ) метод диспергации почвы (Edwards, Bremner, 1967; Березин, 1983).

В данный момент не существует общепризнанных величин выходной мощности (output power, Ватт или Дж сек⁻¹) и суммарной энергии (total energy, E, Дж мл⁻¹) диспергации почв УЗ, несмотря на широкое распространение метода ультразвуковой диспергации почв для подготовки почв к анализу гранулометрического состава (Polakowski et al., 2018), ферментативной активности почв (Stemmer et al., 1998), выделения пулов органического вещества (Poeplau et al., 2018; Büks, 2023). Сравнение оказываемого воздействия УЗ на почвенные образцы необходимо проводить при известных мощности, времени воздействия (t, cek), концентрации (соотношение почва : жидкость) и объема (V, мл) почвенной суспензии. Наиболее распространенным способом калибровки выходной мощности УЗ является калориметрический метод, предложенный North (1976). Мощность УЗ имеет качественно разное воздействие на почвенные частицы. При недостаточной мощности УЗ использование высокой суммарной энергии диспергации не приведет к разрушению прочных связей между частицами почвы. Поэтому при пробоподготовке почвенных образцов для достижения достаточной мощности преимущественно используются УЗ диспергаторы зондового типа (horn-type), имеющие мощность в десятки – сотни Ватт.

Воздействие УЗ на почвы разного состава, генезиса и землепользования может различаться как по силе, так и по форме (Kaiser et al., 2014). В исследовательских работах суммарная энергия УЗ диспергации E_t образцов почв варьирует в пределах от 7 до 5 350 Дж·мл⁻¹ (Mentler et al., 2017). Однако E_t равная 450– 500 Дж·мл⁻¹ считается достаточной для диспергации образцов большинства почв (Amelung et al., 1999, при заявленной приборной мощности P = 49 Ватт; Schmidt et al., 1999, мощность согласно калориметрическому методу Р = 75 Ватт). При высоких значениях энегрии диспергации может изменяться состав почвенного образца. Например, минералы песчаной фракции почв, развитые на вулканических пеплах, могут разрушаться при достижении E_t зна-400-1500 Дж мл⁻¹ (<u>Hunter, Bussaca, 1989</u>, чений свыше P = 39.9 Ватт). Также при значениях E_t выше 500 Дж·мл⁻¹ происдисперсного органического ходит разрушение вещества (particulated organic matter) (Amelung et al., 1999, P = 49 Batt). B слаборазвитых и молодых почвах может наблюдаться разрушение почвенных частиц при достижении $E_t = 1500 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ (Kaiser et al., 2012, Р = 52.7 Ватт). Для почв, развитых на известняках, не рекомендуется использовать встряхивание и УЗ, так как хрупкие и пористые фрагменты карбоната кальция будут разрушаться (Kerry et al., 2009). В процессе диспергации УЗ может происходить разрушение зерен кварца, что было диагностировано по появлению острых осколков кварца при увеличении времени УЗ воздействия (Chappell, 1998, использованная мощность УЗ не указана). Энергия диспергации отличается для почв разного типа землепользования. Пахотные почвы требуют меньше затрат энергии на диспергацию по сравнению с природными (Eriksen et al., 1995).

Единого уровня диспергации твердой фазы почв не существует, так как интенсивность необходимого воздействия будет зависеть от устойчивости агрегатов (Cerli et al., 2012). Однако попытки найти универальное значение энегрии диспергации не прекращаются, так как это необходимо для стандартизации базовых анализов. Подробный эксперимент по влиянию мощности УЗ на диспергацию был проведен для тех образцов почв из слоя 0–10 см различного гранулометрического состава (coarse sand, loam, sandy loam) (Poeplau, Don, 2014). В эксперименте оценивали влияние мощности УЗ на количество частиц <63 мкм, концентрацию общего органического углерода и δ^{13} С в этой же фракции почвенных частиц. Мощность УЗ была выбрана в пределах от 5 до 122.4 Ватт. Согласно результатам работы, минимальная необходимая для диспергации почв до стабильного состояния мощность УЗ составляет 50 Ватт. Данное значение мощности воздействия УЗ является достаточно высоким и может приводить к разрушению дисперсного органического вещества, из-за чего рекомендуется его удаление

после низкого воздействия УЗ (<u>Amelung et al., 1999</u>), например, по схеме Golchin et al. (<u>1994</u>).

Цель данной работы - на примере верхних горизонтов дерново-подзолистой, серой лесной почвы и чернозема суглинистого гранулометрического состава определить величину суммарной энергии УЗ, необходимую для диспергации почвенной суспензии до ЭПЧ. Для минимизации разрушения дисперсного органического вещества почв нами был выбран средний уровень мощности УЗ, равный 32.4 Ватт. Для регистрации изменений размера частиц при увеличении энергии воздействия был использован метод лазерной дифракции, результатом которого является детальное распределение частиц по размерам (Юдина и др., 2021; Polakowski et al., 2018). Наша гипотеза состоит в том, что в диапазоне суммарной энергии диспергации от 11 до 1 101 Дж мл⁻¹ содержание ила (<1 мкм), физической глины (<10 мкм) и среднего объемного размера частиц достигнут стабильного состояния и выйдут на уровень плато, на основе которого мы сможем определить минимальное значение энегрии для диспергации почвы до ЭПЧ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись верхние горизонты трех почв тяжелого гранулометрического состава, контрастные по содержанию органического вещества: агродерновослабоподзолистая (Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic. Differentic) – опытное поле Зеленоградского опорного пункта ФГБНУ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева", N: 56.131622° с. ш., Е: 37.802792° в. д.); серая лесная (Grevic Phaeozems (Albic) широколиственный лес Тульских засек рядом с с. Крапивна, Тульская обл., N: 53.93304° с. ш., Е 37.09259° в. д.); агрочернозем миграционно-мицеллярный среднепахотный средне карбонатный (Haplic Chernozem (Loamic, yperhumic, Pachic) – лесополоса, Курский НИИ АПП, N: 51.59946° с. ш., Е: 36.23127° в. д.). Содержание углерода в образцах почв представлено в таблице 1.

Образцы почв перед анализом были высушены до воздушно-сухого состония в лабораторных условиях, далее гомогенизированы пестиком с резиновым наконечником с параллельным удалением растительных остатков с помощью пинцета и просеяны

через сито 2 мм.

Таблица 1. Содержание органического углерода (C_{opr}) в исследованных образцах почв

Почва	Горизонт (мощность, см)	С _{орг} (г · 100 г ⁻¹ почвы)
Дерново-подзолистая (Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic, Differentic))	Ap (0–10)	1.84
Серая лесная (Greyic Phaeozems (Albic))	A (0–15)	3.58
Чернозем (Haplic Chernozem (Loamic, yperhumic, Pachic))	Ар (0–10)	4.67

Table 1. The organic carbon content in studied soil samples

Пробоподготовка образцов

Обработка УЗ осуществлялась на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со ступенчатым цельным наконечником (stepped solid horn tip, 13 мм, 101-147-038). Калибровка мощности УЗ осуществлена в дистиллированной воде калориметрически согласно общепринятой методике (North, 1976). Выходная мощность *P* составляла 32.4 Ватт при выставленной на блоке управления диспергатором мощности 50%. Суспензии почв концентрацией 1–3% и объемом 15 мл озвучивались в пластиковых стаканчиках в течение различных периодов времени, для которых была предварительно рассчитана величина суммарной энергии диспергации (Дж·мл⁻¹) (табл. 2). Во избежание перегрева суспензий время однократного озвучивания не превышало 2.5 минут.

Измерение размеров частиц

Все определения распределений частиц по размерам проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) в трехкратной повторности. Обработка дифрактограмм проведена с помощью ПО анализатора Microtrac FLEX 11. Используемые при обработке параметры твердой фазы – частицы абсорбирующие, изометричной формы.

Таблица 2. Время и соответствующим величины суммарной энергии диспергации почвенных суспензий объемом 15 мл и концентрацией 1–3% использованные в эксперименте (*P* = 32.4 Ватт)

Table 1. Time and corresponding total energy of ultrasonic dispersion of soil suspensions (15 ml) having concentration 1-3% used in the experiment (P = 32.4 W).

<u>№</u> Badhauta	Время воздействия Суммарная энерги (Шж. м.т. ¹)	
Барианта	(мин)	(Дж МЛ)
1	0.5	65
2	1	130
3	1.5	194
4	2	259
5	2.5	324
6	3	389
7	3.5	453
8	4.5	583
9	5.5	712
10	6.5	842
11	7.5	971
12	8.5	1 101

Для каждого из полученных распределений частиц почв по размерам были рассчитаны следующие параметры – средний объемный размер частиц (MVD, мкм), содержание ила (сумма частиц <1 мкм) согласно российской классификации гранулометрических элементов почв (ИЛ_{<1}, %), содержание физической глины (сумма частиц меньше 10 мкм, $\Phi 3\Gamma_{<10}$, %).

Моделирование взаимосвязей между дисперсностью почвы и энергией диспергации

Аппроксимация данных по взаимосвязи содержания ила и

физической глины с суммарной энергией диспергации проводилась с использованием экспоненциальной функции (<u>Демьянов</u>, <u>Савельева, 2010</u>):

$$v = c \times (1 - \exp(1 - \frac{3 \times E}{E_{INF}})$$
 (уравнение 1),

где v – содержание частиц (%), E – суммарная энегрия диспергации (Дж·мл⁻¹); c – плато, т. е. равновесное содержание частиц при данном типе диспергации (%); E_{INF} – пороговая суммарная энергия (Дж·мл⁻¹), достачная для достижения содержания частиц до уровня плато.

Для аппроксимации данных взаимосвязи среднего размера частиц и суммарной энергией диспергации к уравнению 1 был добавлен стартовый параметр *c*₀:

$$v = c_0 + (c - c_0) \times (1 - \exp(1 - \frac{3 \times E}{E_{INF}})$$
 (уравнение 2),

где *c*₀ – точка пересечения функции с осью ординат.

Статистическая обработка

Статистическая обработка и визуализация выполнялись в среде R 4.2.1. Расчет базовых статистик выполнялся с пользованием пакета *broom* (Robinson, 2014). Визуализация с использованием пакета *ggplot2* (Wickham et al., 2016). Доверительный интервал рассчитывался как двусторонний с уровнем значимости a = 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ распределений частиц по размерам показывает динамику изменения содеражния частиц отдельных фракций при увеличении энегрии диспергации. Для всех почв распределения частиц по размерам, полученные при минимальном уровне воздействия УЗ на твердую фазу почв ($E_t = 11 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$), характеризуются наличием максимума в диапазоне размеров частиц песка от 100 до 2 000 мкм (рис. 1). При увеличении энергии УЗ диспергации до 65 Дж · мл⁻¹ происходит постепенная дезагрегация частиц крупнее 100 мкм. И при диспергации с использованием $E_t =$ 65 Дж · мл⁻¹ частицы крупнее 100 мкм почти полностью разрушаются. Увеличение суммарной энергии диспергации свыше





Рис. 1. Дифференциальные кривые содержания (ось Y, %) частиц различного диаметра (ось X, мкм), полученные при увеличивающемся воздействии УЗ на почвенные суспензии (суммарная энергия E_t , Дж·мл⁻¹, легенда в правой части рисунка): (А) чернозем; (Б) серая лесная; (В) дерново-подзолистая почвы. Выходная мощность P составляла 32.4 Ватт.

Fig. 1. Differential curves of the content (Y axis, %) of particles of different diameters (X axis, μ m) obtained with increasing ultrasonic energy on soil suspensions (total energy E_t , J·mL⁻¹, legend in the right part of the figure): (A) Chernozem; (B) Phaeozem; (B) Retisol. The output power *P* was equal to 32.4 W.

Содержание ила является наиболее чувствительным показателем при анализе устойчивости почвы к диспергации УЗ. При увеличении энергии диспергации происходит постепенное увели-

чение количества илистых частиц в суспензии (рис. 2А). Максимальное содержание илистых частиц составляет $8.69 \pm 0.15\%$ для чернозема, $4.72 \pm 0.16\%$ – для серой почвы, $5.20 \pm 0.09\%$ – для дерново-подзолистой почвы (табл. 2). Для дерново-подзолистой почвы необходимое количество суммарной энергии для полного выхода илистой фракции значимо ниже по сравнению с серой лесной почвой и черноземом и составляет 275 ± 21 Дж·мл⁻¹. Пороговая суммарная энегрия в 2.4 раза для серой лесной почвы (646 ± 37 Дж·мл⁻¹) и в 2.8 раза (762 ± 73 Дж·мл⁻¹) для чернозема выше, чем для дерново-подзолистой почвы.

Содержание физической глины резко изменяется с увеличением энергии диспергации (рис. 2Б), поэтому значение пороговой суммарной энегрии для физической глины в среднем в 3 раза ниже, чем для ила. Содержание физической глины является чувствительным параметром к типу почв, потому что между E_{INF} исследованными почвами наблюдаются статистические различия. Полная суммарная энегрия диспергации физической глины минимальная для дерново-подзолистой почвы и составляет 119 ± 9 Дж·мл⁻¹. Для серой лесной почвы E_{INF} в 1.3 раза (151 ± 5 Дж·мл⁻¹), а для черноземов в 2.1 раза (249 ± 17 Дж·мл⁻¹) выше, чем для дерновоподзолистой почвы.

 E_{INF} для частиц среднего размера в среднем на 13% выше, чем для физической глины (рис. 2В). Однако суммарная энергия диспергации до ЭПЧ между исследованными почвами очень близка, и статистических различичий не обнаружено (табл. 1).

Выбор режима диспергации почв УЗ зависит от устойчивости связей между частицами и заключается в выборе двух параметров – мощности P и суммарной энергии E_r . В аналогичном проведенному нами эксперименте Poeplau and Don (2014) был сделан вывод, что необходимая мощность для разрушения связей между почвенными частицами в агрегатах составляет 50 Ватт. Авторы использовали тот же ультразвуковой диспергатор и наконечник большего диаметра (19 мм), однако работали с большим в 10 раз объемом суспензии (150 мл). Чем меньше диаметр наконечника, тем выше амплитуда УЗ. Выбранный рабочий объем влияет на долю объема суспензии, находящуюся в непосредственной зоне воздействия УЗ.

97



Рис. 2. Изменение содержания (ось Y): (A) – частиц ила (ИЛ_{<1}, %), (Б) – физической глины (ФЗГ, %), (В) – среднего объемного диаметра (МVD, мкм) почвенных частиц при увеличении суммарной энергии УЗ диспергации (ось X, E_t) в образцах дерново-подзолистой почвы (фиолетовый цвет), серой лесной почвы (оранжевый цвет) и чернозема (зеленый цвет) (легенда в нижнем правом секторе графика). a – пороговое значение E_t , необходимое для диспергации твердой фазы почвы до элементарных почвенных частиц.

Fig. 1. Changes in the content (Y axis): (**A**) – clay particles ($U\Pi_{<1}$, %), (**B**) – physical clay ($\Phi 3\Gamma$, %), (**B**) – mean volume diameter (MVD, µm) of soil particles with increasing total ultrasonic dispersion energy (X axis, E_t , J·mL⁻¹) in samples of Chernozem (green dots), Phaeozem (organge dots) and Retisol (purple dots) (legend in the lower right sector of the figure). *a* is the threshold value of E_t necessary for dispersion of the soil solid phase into elementary soil particles.

Таблица 2. Параметры аппроксимации кривых зависимости содержания ила, физической глины и среднего объемного диаметра частиц от величины суммарной энергии диспергации суспензий почв УЗ ($E_t \sim U \Pi_{<1}$, $E_t \sim \Phi \Im \Gamma_{<10}$, $E_t \sim MVD$ соответственно): c – уровень плато, соответствующий максимальному содержанию ила, физической глины или минимальному среднему размеру частиц соответственно; a – пороговое значение E_t (Дж·мл⁻¹), c_0 – начальный средний размер частиц суспензии почвы (мкм). * – статистически значимые отличия между образцами почв (p < 0.05)

Table 2. Parameters of approximation of relationships between the clay content, the physical clay, the mean volume diameter of particles, and the value of total energy of dispersion of soil suspensions by US ($E_t \sim H\Pi_{<1}, E_t \sim \Phi \Im \Gamma_{<10}, E_t \sim \text{MVD}$, respectively): c – plateau level corresponding to the maximum content of clay, physical clay or minimum mean particle size, respectively; a – threshold value of E_t (J·mL⁻¹), c_0 – initial mean size of soil particles in suspensions (µm). * – statistically significant differences between soil samples (p < 0.05)

Функция	Почва	С	E_{INF}	c_0
$E_t \sim ИЛ_{<1}$	Чернозем	$8.69\pm0.15*$	646 ± 37	_
	Серая лесная	4.72 ± 0.16	762 ± 73	—
	Дерново-подзолистая	5.20 ± 0.09	$275\pm21*$	—
$E_t \sim \Phi 3 \Gamma_{<10}$	Чернозем	$49.6\pm0.18\ast$	$151 \pm 4*$	—
	Серая лесная	$41.82 \pm 0.64*$	$249 \pm 17 *$	—
	Дерново-подзолистая	$38.88\pm0.58*$	$119\pm9*$	—
$E_t \sim \text{MVD}$	Чернозем	$10.02\pm0.07\ast$	229 ± 15	$25 \pm 1*$
	Серая лесная	$29.68\pm2.42*$	194 ± 35	$129\pm9*$
	Дерново-подзолистая	$14.40\pm1.96*$	173 ± 34	$91\pm8*$

От мощности УЗ также зависит скорость циркуляции объема диспергируемой жидкости. Соответственно, чем меньше объем и выше мощность, тем большая часть рабочего объема суспензии подвергается воздействию УЗ в единицу времени.

Выбранная нами мощность УЗ равная 32.4 Ватт была обусловлена минимизацией разрушения дисперсного органического вещества (<u>Amelung et al., 1999</u>), которое может быть заключено в микроагрегатах почв. Также УЗ низкой мощности используется для подготовки почв к микробиологическим и биохимическим

анализам, чтобы избежать разрушение клеток и ферментов (например, 30 Ватт – <u>Neumann et al., 2013</u>; 40 Ватт – <u>Zhou et al., 2021</u>).

Проведенный нами эксперимент показал, что разрушение твердой фазы серой лесной и дерново-подзолистой почв, имеющих ярко выраженный максимум в диапазоне частиц 100–1000 мкм, делится на два этапа по границе суммарной энергии диспергации E_t равной 65 Дж·мл⁻¹ (рис. 1): ниже этой границы разрушаются крупные агрегаты (>100 мкм), выше – мелкие агрегаты в диапазоне частиц 0–10 мкм. Таким образом, предположительно, в исследованных почвах существуют два пула микроагрегатов почв – низкой и высокой устойчивости.

Найденные нами пороговые значения E_t для чернозема и серой лесной почвы (646 и 762 Дж·мл⁻¹ соответственно), необходимые для максимальной диспергации образцов почв, оцененной нами по увеличению количества частиц ила (рис. 2А, табл. 2) выше значения E_t , установленного другими исследователями и равному 500 Дж·мл⁻¹ (Amelung et al., 1999; Schmidt et al., 1999). Значение E_t , установленное для дерново-подзолистой почвы, значительно ниже (275 Дж·мл⁻¹), и, вероятно, связано с более низким содержанием органического вещества почвы (табл. 1), являющим-ся основным агрегирующим агентом органо-аккумулятивных горизонтов почв. Таким образом, величина энергии диспергации почв до ЭПЧ варьирует в пределах сотен Дж·мл⁻¹ и зависит от типа почвы.

Величина энергии, выше которой не происходит значимого изменения содержания физической глины, является искомой энергией диспергации, необходимой для подготовки почв к гранулометрическому анализу и определения класса почв согласно классификации Качинского. Для исследованных образцов чернозема, серой лесной и дерново-подзолистой почв она значимо отличалась и составляла 151, 249 и 119 Дж·мл⁻¹ соответственно. Эти данные подтверждают гипотезу Cerli et al. (2012), что энергия диспергации будет варьировать для различных по генезису образцов почв. Более высокая энергия диспергации серой лесной почвы предположительно связана с дисперсным органическим веществом, которое может быть заключено в большом количестве в крупных

микроагрегатах, и, соответственно, может разрушаться при более высоких суммарных энергиях воздействия УЗ.

Средний объемный диаметр (MVD, мкм) частиц не является подходящим параметром для оценки способов пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу, так как для него не было выявлено значимых различий между исследованными образцами почв (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного эксперимента с образцами дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема, с увеличением суммарной энергии E_t диспергации почвенных суспензий в диапазоне 65–1101 Дж·мл⁻¹ почвы при постоянной мощности УЗ равной 32.4 Ватт установлено:

1) величина E_t , необходимая для полного разрушения агрегатов почв до ЭПЧ, зависит от типа почв и варьирует в пределах 200–800 E_t для суглинистых почв с содержанием органического вещества 1.8–4.6 г · 100 г⁻¹ почвы;

2) для пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу и последующего определения класса почв согласно классификации Качинского достаточной является величина $E_t = 250 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$, так как она позволяет получить максимальное количество физической глины при минимальной длительности пробоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Березин П.Н.* Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород // Почвоведение. 1983. № 2. С. 64–72.

2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: изд. МГУ, 1984. 205 с.

3. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

4. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.

5. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: изд. МГУ, 1983. 320 с.

6. Шеин Е.В. и др. Теории и методы физики почв. М.: "Гриф и К", 2007. 616 с.

7. *Юдина А.В. и др.* От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. 2018. №. 11. С. 1340–1362.

8. *Amelung W., Zech W.* Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons // Geoderma. 1999. Vol. 92. Iss. 1–2. P. 73–85.

9. *Büks F*. The recovery rate of free particulate organic matter from soil samples is strongly affected by the method of density fractionation // *Biogeosciences*. 2023. Vol. 20 (7). P. 1529–1535.

10. *Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K.* Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level // Geoderma. 2012. Vol. 170. P. 403–416.

11. *Chappell A*. Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction // Catena. 1998. Vol. 31. P. 271–281.

12. *Edwards A.P., Bremner J.M.* Use of sonic vibration for separation of soil particles // Canadian Journal of Soil Science. 1964. Vol. 44. P. 366.

13. *Eriksen J., Lefroy R.D.B., Blair G.J.* Physical protection of soil organic S studied using acetylacetone extraction at various intensities of ultrasonic dispersion // Soil Biology and Biochemistry. 1995. Vol. 27. P. 1005–1010.

14. *Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state 13C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy // Soil Res. 1994b. Vol. 32. P. 285–309.

15. *Hunter C.R., Busacca A.J.* Dispersion of three andic soils by ultrasonic vibration // Soil Science Society of America Journal. 1989. Vol. 53. P. 1299–1302.

16. ISO 11277:2009. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Geneva. International Organization for Standartization.

17. *Kaiser M., Berhe A.A.* How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? – A review // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2014. Vol. 177. P. 479–495.

18. *Kerry R., Rawlins B.G., Oliver M.A., Lacinska A.M.* Problems with determining the particle size distribution of chalk soil and some of their implications // Geoderma. 2009. Vol. 152. P. 324–337.

19. Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H. Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate // Int. Agrophysics. 2017. Vol. 31. P. 582–588.

20. Neumann D., Heuer A., Hemkemeyer M., Martens R., Tebbe C.C. Response of microbial communities to long-term fertilization depends on their microhabitat // FEMS Microbiology Ecology. 2013. Vol. 86 (1). P. 71–84.

21. North P.F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound // Journal of Soil Science. 1976. Vol. 27. P. 451–459.

22. *Poeplau C., Don A.* Effect of ultrasonic power on soil organic carbon fractions // Journal of plant nutrition and soil science. 2014. Vol. 177 (2). P. 137–140.

23. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., ..., Nieder R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 125. P. 10–26.

24. Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryżak M., Zaleski T., Beczek M., ..., Bieganowski A. Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis // Geoderma. 2023. Vol. 430. P. 116358.

25. *Robinson D*. broom: And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames // arXiv preprint arXiv:1412.3565. 2014.

26. *Schmidt M.W.I., Rumpel C., Kögel-Knabner I.* Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils // European Journal of Soil Science. 1999. Vol. 50. P. 87–94.

27. *Stemmer M., Gerzabek M. H., Kandeler E.* Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication // Soil Biology and Biochemistry. 1998. Vol. 30. No. 1. P. 9–17.

28. *Wickham H., Chang W., Wickham M.H.* Package 'ggplot2' // Create elegant data visualisations using the grammar of graphics. Version. 2016. Vol. 2. No. 1. P. 1–189.

29. *Yudina A., Kuzyakov Y.* Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores // Geoderma. 2023. Vol. 434. P. 116478.

30. Zhou J., Gui H., Banfield C.C., Wen Y., Zang H., Dippold M.A., Charlton A., Jones D.L. The microplastisphere: Biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function // Soil Biology and Biochemistry. 2021. Vol. 156. 108211.

REFERENCES

1. Berezin P.N., Osobennosti raspredeleniya granulometricheskikh elementov pochv i pochvoobrazuyushchikh porod (Distribution of particle-size elements in soils and parent rocks), *Pochvovedenie*, 1983, No. 2, pp. 64–72.

2. Voronin A.D., *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv* (Structural-functional hydrophysics of soils), Moscow: izd. MGU, 1984, 205 p.

3. State standard. GOST 12536-2014 Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution.

4. Demyanov V.V., Savelyeva E.A., *Geostatistics. Theory and Practice*. Moscow: Nauka, 2010, 327 p.

5. Rozanov B.G., *Morfologiya pochv* (Soil morphology), Moscow: izd. MGU, 1983, 320 p.

6. Shein E.V., Karpachevskii L.O., *Teorii i metody fiziki pochv* (Theories and methods of soil physics), Moscow: "Grif i K", 2007, 616 p.

7. Yudina A.V., Fomin D.S., Kotelnikova A.D., Milanovskii E.Y., From the notion of elementary soil particle to the particle-size and microaggregate-size distribution analyses: A review, *Eurasian Soil Science*, 2018, No. 51, pp. 1326–1347.

8. Amelung W., Zech W., Minimisation of organic matter disruption during particle-size fractionation of grassland epipedons, *Geoderma*, 1999, Vol. 92, Iss. 1–2, pp. 73–85.

9. Büks F., The recovery rate of free particulate organic matter from soil samples is strongly affected by the method of density fractionation, *Biogeosciences*, 2023, Vol. 20 (7), pp. 1529–1535.

10. Cerli C., Celi L., Kalbitz K., Guggenberger G., Kaiser K., Separation of light and heavy organic matter fractions in soil – Testing for proper density cut-off and dispersion level, *Geoderma*, 2012, Vol. 170, pp. 403–416.

11. Chappell A., Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction, *Catena*, 1998, Vol. 31, pp. 271–281.

12. Edwards A.P., Bremner J.M., Use of sonic vibration for separation of soil particles, *Canadian Journal of Soil Science*, 1964, Vol. 44, p. 366.

13. Eriksen J., Lefroy R.D.B., Blair G.J., Physical protection of soil organic S studied using acetylacetone extraction at various intensities of ultrasonic dispersion, *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, Vol. 27, pp. 1005–1010.

14. Golchin A., Oades J., Skjemstad J., Clarke P., Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state 13C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy, *Soil Res.*, 1994, Vol. 32, pp. 285–309.

15. Hunter C.R., Busacca A.J. Dispersion of three andic soils by ultrasonic vibration, *Soil Science Society of America Journal*, 1989, Vol. 53, pp. 1299–1302.

16. ISO 11277:2009. Soil quality – Determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Geneva. International Organization for Standartization.

17. Kaiser M., Berhe A.A., How does sonication affect the mineral and organic constituents of soil aggregates? – A review, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, Vol. 177, pp. 479–495.

18. Kerry R., Rawlins B.G., Oliver M.A., Lacinska A.M., Problems with determining the particle size distribution of chalk soil and some of their implications, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, pp. 324–337.

19. Mentler A., Schomakers J., Kloss S., Zechmeister-Boltenstern S., Schuller R., Mayer H., Calibration of ultrasonic power output in water, ethanol and sodium polytungstate, *Int. Agrophysics*, 2017, Vol. 31, pp. 582–588.

20. Neumann D., Heuer A., Hemkemeyer M., Martens R., Tebbe C.C., Response of microbial communities to long-term fertilization depends on their microhabitat, *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, Vol. 86 (1), pp. 71–84.

21. North P.F., Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound, *Journal of Soil Science*, 1976, Vol. 27, pp. 451–459.

22. Poeplau C., Don A., Effect of ultrasonic power on soil organic carbon fractions, *Journal of plant nutrition and soil science*, 2014, Vol. 177 (2), pp. 137–140.

23. Poeplau C., Don A., Six J., Kaiser M., Benbi D., Chenu C., ..., Nieder R., Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 125, pp. 10–26.

24. Polakowski C., Makó A., Sochan A., Ryżak M., Zaleski T., Beczek M., ..., Bieganowski A., Recommendations for soil sample preparation, pretreatment, and data conversion for texture classification in laser diffraction particle size analysis, *Geoderma*, 2023, Vol. 430, pp. 116358.

25. Robinson D., broom: And package for converting statistical analysis objects into tidy data frames, *arXiv preprint arXiv:1412.3565*, 2014.

26. Schmidt M.W.I., Rumpel C., Kögel-Knabner I., Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils, *European Journal of Soil Science*, 1999, Vol. 50, pp. 87–94.

27. Stemmer M., Gerzabek M. H., Kandeler E., Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication, *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, Vol. 30, No. 1, pp. 9–17.

28. Wickham H., Chang W., Wickham M.H., Package 'ggplot2', Create elegant data visualisations using the grammar of graphics, *Version*, 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 1–189.

29. Yudina A., Kuzyakov Y., Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, pp. 116478.

30. Zhou J., Gui H., Banfield C.C., Wen Y., Zang H., Dippold M.A., Charlton A., Jones D.L., The microplastisphere: Biodegradable microplastics

addition alters soil microbial community structure and function, *Soil Biology* and *Biochemistry*, 2021, Vol. 156, 108211.