

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Юдина Анна Викторовна

**Лазерная дифрактометрия в почвоведении:
методические аспекты и диагностическое значение**

Специальность 06.01.03 – «Агрофизика»
Специальность 03.02.13 – «Почвоведение»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» и в лаборатории физики и гидрологии почв Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Почвенный институт имени В.В. Докучаева».

Научный руководитель: **Милановский Евгений Юрьевич** – доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра физики и мелиорации почв, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Макеев Александр Олегович** – доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра географии почв, ведущий научный сотрудник

Болотов Андрей Геннадьевич – доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», факультет агрономии и биотехнологии, кафедра метеорологии и климатологии, профессор

Кравченко Александра Николаевна – PhD, профессор, Мичиганский государственный университет, Департамент наук о растениях, почве и микроорганизмах, профессор.

Защита состоится «11» декабря 2018 года в 17 ч. 00 мин. в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета МГУ.03.10 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1 стр. 12, МГУ имени М.В.Ломоносова, факультет почвоведения.

E-mail: nvkostina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, 27, отдел диссертаций) и на сайте ИАС «ИСТИНА» <https://istina.msu.ru/dissertations/153959673/>

Автореферат разослан «8» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.б.н.

Костина
Наталья Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Существующие в настоящее время расхождения в терминологии, отсутствие единства в понимании, что является объектом гранулометрического и микроагрегатного составов почв и, как следствие, разнообразие методологических подходов создают большие трудности при анализе результатов исследований, как между различными школами почвоведения, так и смежными отраслями естествознания и природопользования (гидрология, гидрогеология, инженерная геология, физика почв, лимнология и др.).

Определение гранулометрического состава (ГС), интерпретация данных и эффективное их использование должны базироваться на понимании механизма диспергирования образца до элементарных почвенных частиц (ЭПЧ), физических принципов распределения ЭПЧ по размерам, обоснованной группировке ЭПЧ по фракциям и их классификационной принадлежности.

Для определения ГС почв, грунтов и осадочных пород все чаще применяют метод лазерной дифракции (ЛД). В данном методе с высокой точностью регистрируется размер преимущественных диаметров частиц в виде непрерывного распределения объемного содержания частиц по размерам. Преимущества метода - экспрессность (минуты), небольшой объем пробы для исследования (десятые доли грамма), прямая связь с вычислительной техникой, обеспечивающая представление результата анализа в виде графика непрерывного распределения частиц по размерам и табличных данных.

В связи с вышеизложенным, актуальность исследования определяется:

- развитием теоретических основ физики твердой фазы (ТФ) почв, разработкой классификационных текстурных показателей и диагностики процессов переорганизации и трансформации ТФ почв на основе результатов, полученных методом ЛД;

- прикладном аспекте, ориентированном на разработку практических рекомендаций по определению гранулометрического и микроагрегатного составов почв методом ЛД, интерпретации данных и их использования при решении научных и производственных задач.

Степень разработанности темы исследования. Обзор отечественных и зарубежных публикаций (Тюлин, 1943; Качинский, 1958; Воронин, 1984; Шеин, и др., 2006; Шеин, 2001, 2005, 2009; Guedez, et al., 1978; Chittleborough, 1982; Francis, et al., 1995; Gee, et al., 2002; Murray, 2002; Matthews, 2007; Kerry, et al., 2009; Taubner, 2009; Totsche et al., 2017) свидетельствует о наличии широкого круга проблем в изучении ГС и микроагрегатности почв. До сих пор существует «своеобразная экстенсивность информации» (Березин, и др., 1991), получаемой в результате гранулометрического и микроагрегатного анализов почв.

Метод ЛД в почвоведении применяется с начала 80-ых гг. предыдущего столетия. В основном исследователями уделялось внимание сравнению результатов ГС почв, полученных методом ЛД и седиментационным методом (Loizeau, et al., 1994; Buurman, et al., 1997; Beuselinck, et al., 1998; Eshel, et al.,

2004; Шинкарев, и др., 2010). Авторами отмечалась необходимость нахождения связи между различными свойствами почв и распределением частиц по размерам, полученных методом ЛД, что позволит разработать новые подходы к классификации почв по ГС или адаптировать существующие (Eshel, et al., 2004; Nayton, et al., 2001). Практически не рассматривалась роль оптических свойств почвенных частиц при расшифровке дифракционной картины. В данных работах уделяют внимание лишь части проблемы, касающейся показателя преломления (n) ТФ полиминерального состава. Наличие и роль органоминеральных пленок на поверхности ЭПЧ и то, что объект анализа может представлять собой не только индивидуальные частицы, но и конгломераты частиц, в цитируемых работах не рассматривается. Единичные работы посвящены технике микроагрегатного анализа с помощью метода ЛД (Amezketta, et al., 2003; Pini, et al., 1998).

Самостоятельную проблему представляют методы подготовки образцов к анализу ГС и микроагрегатного составов, которой уделялось большое внимание в середине предыдущего столетия (Tyner, 1940; Kilmer, et al., 1949; Jackson, et al., 1950; Долгов, 1966; Martin, 1954; Качинский, 1958; Shield, et al., 1964; Emerson, 1971; Edwards, 1967; Kanno, 1967; Thiesen, 1968; Genrich, 1972; Зонн, 1974; Романов, 1974; Norrish, et al., 1976;). В опубликованных работах, посвященных технике анализа почв методом ЛД, адаптация существующих методов подготовки образцов к анализу с учетом малых навесок образца не проводилась.

Широкое внедрение в практику почвенных исследований ультразвуковой диспергации (Edwards, 1967; Genrich, 1972; Schmidt, et al., 1999; Amelung, et al., 1999) и денсиметрического фракционирования (Шаймухаметов, и др., 1972, 1984; Turchenek, Oades, 1979; Christensen, 1992) существенно расширило знания о структурной организации ТФ почв. На основе данных методов и метода ЛД возможно дальнейшее развитие уже имеющихся взглядов на структурную организацию почв.

Цель исследования: теоретическое, методическое и практическое обоснование определения гранулометрического и микроагрегатного состава почв методом лазерной дифракции для решения фундаментальных и прикладных задач почвоведения.

Методология и методы исследования. В основу исследований положен системный подход, теоретической основой которого являлись идеи и принципы изучения структурной организации почв, изложенные в трудах А.Ф. Тюлина (1943), Н.А. Качинского (1958), П.Н. Березина (1983, 1985), М.Ш. Шаймухаметова (1972, 1974), Л.С. Травниковой (1972, 1992), Tisdall, Oades (1982), А.Д. Воронина (1984), В.Т. Christensen (2001), Е.В. Шеина (2005), А.В. Смагина (2004), В.О. Таргульяна (2008).

Комплекс полевых и лабораторных методов исследования включал: профилльно-генетический, морфологический, статистический, физические, физико-химические и химические методы исследования состава и свойств почв. Статистическая обработка данных проведена с помощью программ STATISTICA 6.0, Matlab R2016_a, Python, R Studio, Excel 2016.

Задачи исследования:

- 1) систематизировать современные подходы к определению гранулометрического и микроагрегатного состава почв;
- 2) оценить влияние параметров частиц (показателя преломления n , коэффициента абсорбции χ , формы) на результат обработки дифракционной картины;
- 3) экспериментально определить энергию ультразвуковой (УЗ) диспергации образцов различного генезиса до ЭПЧ с морфологическим контролем полноты диспергации;
- 4) проанализировать распределение частиц по размерам методом ЛД образцов почв разного генезиса при их различных способах пробоподготовки к гранулометрическому и микроагрегатному анализу;
- 5) оценить взаимосвязь результатов метода ЛД с другими физическими свойствами почв;
- 6) оценить возможность применения показателей микроструктурной организации почв, разработанных на основе седиментационных методов, к результатам метода ЛД;
- 7) для распределений частиц почв, полученных методом ЛД, оценить качество аппроксимации существующих моделей распределения частиц по размерам;
- 8) разработать методики гранулометрического и микроагрегатного анализа методом ЛД.

В соответствии с результатами исследований разработаны следующие **основные защищаемые положения:**

Микроструктурная организация почв может быть представлена в виде трехкомпонентной модели, состоящей из **первичных элементов** (*primary soil particles*), **элементарных почвенных частиц** (ЭПЧ, *elementary soil particles*) и **микроагрегатов** (*microaggregates*), где:

первичные элементы почв – индивидуальные минеральные частицы почв;

ЭПЧ – твердофазные продукты почвообразования, представленные обломками горных пород и минералов, органо-минеральными и органическими частицами, все компоненты которых находятся в химическом и физико-химическом взаимодействии,

микроагрегаты – более сложные по строению компоненты, состоящие преимущественно из ЭПЧ и органических остатков, связанные между собой более слабыми взаимодействиями, чем ЭПЧ.

Количественная **граница между уровнями ЭПЧ и микроагрегатов** эквивалентна энергии ультразвуковой диспергации водной суспензии равной $450 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$.

Почвы, обладающие **первичной микроструктурой**, диспергируются УЗ при $65 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ до первичных элементов; почвы, представленные различными типами ЭПЧ и микроагрегатами, разрушающимися только после удаления органического вещества и других клеящих веществ, характеризуются **вторичной микроструктурной организацией**.

Научная новизна работы:

Впервые проведены морфологические исследования ЭПЧ и микроагрегатов почв, полученных при возрастающей энергии УЗ диспергации.

Для расшифровки дифракционной картины распределения частиц по размерам полиминеральных полидисперсных природных объектов предложены и обоснованы оптические и геометрические параметры частиц.

Экспериментально установлены и стандартизированы условия пробоподготовки образцов почв к гранулометрическому и микроагрегатному анализу методом ЛД.

Впервые дана оценка использования квалификационных показателей гранулометрического и микроагрегатного состояния почв к результатам лазерной дифрактометрии.

Впервые дана оценка использования величины расчетной поверхности (*Calculated surface*), рассчитываемой из распределения частиц по размерам, полученного методом лазерной дифракции, и показана взаимосвязь данного показателя с величиной удельной поверхности, полученной классическими методами.

Предложена трехмодальная модель распределения частиц по размерам на основе бимодальной модели Фредлунда (Fredlund et al., 2000).

Впервые показана взаимосвязь между данными метода лазерной дифракции и почвенно-гидрологическими константами, полученными из кривых сушки почв.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные экспериментальные данные и теоретические обобщения могут быть использованы для разработки методики выполнения измерений и ГОСТ по определению гранулометрического и микроагрегатного состава почв и грунтов методом лазерной дифракции. Результаты исследования могут использоваться в учебном процессе в курсах лекций по почвоведению, физике почв и соответствующих практикумах. Также они могут быть использованы при решении многих задач в области почвоведения, экологии, грунтоведения и др.

Личный вклад автора заключается в выполнении основной части теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку методик экспериментов, анализ и интерпретацию полученных результатов, статистический анализ, формулировку основных защищаемых положений и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

Степень достоверности и апробация работы

Все экспериментальные исследования проведены с помощью современного сертифицированного оборудования и имеют единую методологическую основу. Полученные результаты статистически обработаны методами вариационной статистики. Все выводы достоверны. Принятый уровень вероятности $P = 0.95$.

Основные положения и выводы диссертации представлены и обсуждены на 15 Международных и Всероссийских конференциях, включая «Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2013, 2014), «Ломоносов» (2013, 2014),

International Soil Science Congress «Soil Science in International Year of Soils 2015» (Сочи, 2015), VII съезд Общества им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016), «Морфология почв от макро- до субмикроуровня» (Москва, 2016), «Почвоведение: горизонты будущего» (Москва, 2017, 2018), «EGU General Assembly 2018» (Вена, 2018). А также были доложены и обсуждены на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ и Ученого совета Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 статей, из которых 7 в рецензируемых журналах из списков Web of Science, Scopus, RSCI, а также 17 статей в сборниках и тезисов докладов.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения и содержит 251 страницу, включает 48 таблиц, 131 рисунок; библиографический список включает 254 наименований, из них 193 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор глубоко признателен своему научному руководителю Евгению Юрьевичу Милановскому за неоценимую поддержку на протяжении всех этапов работы, кафедре физики и мелиорации почв – за прекрасное образование, Институту – за возможность работы и желание заниматься наукой в будущем. Отдельную благодарность автор выражает Елене Борисовне Скворцовой за обсуждение всех возникающих вопросов по ходу работы над диссертацией и введение в мир почвенной микроструктуры. Автор признателен учителям, коллегам, друзьям и близким: Т.Н. Початковой, Е.В. Шеину, З.Н. Тюгай, Т.А. Архангельской, А. Дымову, И.В. Ковде, Е.Г. Моргуну, В. Шишкову, Н.Б. Хитрову, Я. Кузякову, Д. Фомину, В. Чепцову, К. Романенко, А. Чурилиной, А. Котельниковой, О. Огневой, Г. Быковой, П. Трегубовой, С. Блинову, отдельно – маме, и многим другим, за вдохновляющие диалоги и помощь, и в, особенности, проявление необходимого чувства юмора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние подходов к изучению микроструктурной организации почв (обзор литературы)

Дан критический обзор существующих представлений о структурной организации почв и подходах к определению уровней ЭПЧ и микроагрегатов. Проведен анализ литературы, касающейся методических аспектов гранулометрического анализа почв: классификации гранулометрических элементов почв и почв по гранулометрическому составу, места новообразований при подготовке почв к анализу, физических и химических методов диспергации почв. Рассмотрены достоинства и недостатки существующих способов пробоподготовки почв к микроагрегатному анализу. Обзор литературы показывает широкое диагностическое и практическое значение гранулометрического и микроагрегатного анализов почв. Анализ литературы, касающийся использования метода ЛД в почвоведении, позволил выявить ряд нерешенных методических вопросов.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись контрастные по минералогическому составу и особенностям почвообразовательного процесса почвы, имеющие различной сложности структурную организацию, и поэтому представляющие интерес для данного исследования. Так, были выбраны: **1** – *подзол иллювиально-железистый на элюво-делювии коренных пород/ Rustic Podzols* (левый берег р. Кожим, северная часть Приполярного Урала, респ. Коми, 65.052472, 60.784972), **2** – *подзолистая почва с микропрофилем подзола/ Retisols Haplic with microprofile of Podzol* (с. Усть-Кулом, респ. Коми, Тиманский край, 61.762111, 54.297639), **3** – *подзол пирогенный иллювиально-железистый на песчаных отложениях/ Rustic Podzols* (с. Нювчим Сыктывдинского района, респ. Коми, 61.395, 50.74), **4** – *подзол иллювиально-железистый на песчаных отложениях/ Rustic Podzols* (с. Нювчим Сыктывдинского района, респ. Коми, 61.395, 50.74), **5** – *агродерново-подзолистая почва/ Eutric Albic Retisol* (опытное поле Зеленоградского опорного пункта ФГБНУ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», 56.131622, 37.802792), **6** – *серая почва/ Greyic Phaeozems Albic* (широколиственный лес Тульских засек, с. Крапивна, Тульская обл., 53.93304, 37.09259), **7** – *чернозем миграционно-мицеллярный мощный/ Haplic Chernozem* (Курский НИИ АПП, 51.59946, 36.23127), **8** – *аллювиальная луговая почва/ Fluvisols* (подножие бугра Бэра, с. Иванчуг, Астраханская обл., 46.027548, 48.020620), **9** – *вертисоль/ Gleyic Vertisol Glossic Gelistagnic* (Еравнинский район, респ. Бурятия, 52.96603, 112.58266), **10** – *ферраллитная/ Ferrasols* (о. Норфолк, Ю-3 Океания, -29.04083, 167.95471) (*Рисунок 1*).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
O	Qpyr	O (L)	O(L)	P1	AУ	AUrz	A	A	A1 ₁
O _{ao}	E	O(F+H)	O(F)	P2	AEL	AUCa	C _{st}	Ai	A1 ₂
E	BF	E	O(H)	EL	BT1	AUBCAmc	C	Ai'	A1B
BF	BC	BF	EL _e	BEL	BT2	BCAmc	C _g	Big	B1
BC	C1	BC	EL _{Bt}	BT1	BT/C	BC		B _{tkg}	B2
	C2	C1	EL1	BT2	C			2C _{kg}	BC
		C2	EL2	BT2 _g				3C _g	
			BT1	BT/C					
			BT2						
			BC _{g,t}						

Рисунок 1. Схемы профилей исследованных почв (номера соответствуют списку почв выше рисунка), индексация горизонтов дана согласно Кл. почв России (Шишов, и др., 1997), для ферраллитной почвы – согласно Кл. почв СССР (Егоров, и др., 1977), для вертисоли – согласно WRB (2014)

Согласно методике (North, 1974) проведена калибровка энергии диспергации ультразвукового (УЗ) диспергатора зондового типа Branson Sonifier S250-D (Branson, США) со стандартным наконечником (horn tip). На примере специально составленных полиминеральных смесей проведено исследование возможности использования среднего значения индекса рефракции (RI) при расчете дифракционной картины методом ЛД. После различных способов

пробоподготовки к анализам исследованы гранулометрический и микроагрегатный составы почв методом ЛД (Microtrac Bluewave, США). Методом изотермической ($T=60^{\circ}\text{C}$) термогравиметрии получены кривые влажности и температуры сушки образцов почв с помощью анализатора влажности MX-70 (A&D, Япония) и температурного датчика Thermochron iBotton (DS1921G). Методом низкотемпературной десорбции азота определена удельная поверхность (Сорбтометр-М, Россия). Также в лаборатории Института Географии РАН были проведены исследования почвенных частиц (<20 мкм) методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на JEOL JSM-6610LV (JEOL Ltd., Япония).

Главы 3-4. Результаты исследований и обсуждение

3.1 Теоретическое, экспериментальное и практические обоснование параметров для расчета распределения почвенных частиц по размерам методом ЛД. Имеющиеся теоретические представления об организации и свойствах ТФ почв и полученные экспериментальные данные позволили предложить ряд аргументов в пользу использования при расчете распределения частиц по размерам методом ЛД следующие характеристики частиц – коэффициент абсорбции (χ) равный 1, т.е. частицы принимаются абсорбирующими, и несферическую форму:

1. Оптические характеристики частиц влияют в первую очередь на наиболее дисперсную часть распределения (ISO13320:2009). В то же время известно, что по мере уменьшения размера форма почвенных частиц в большей степени отклоняется от сферической (Loveland, et al., 2001).

2. Поверхность почвенных частиц имеет массу неровностей и, кроме того, в ряде случаев покрыта новообразованными органоминеральными и минеральными пленками.

3. Частицы илистой и пылеватой фракций почв часто представлены конгломератами (Chenu, Plante, 2006), а не единичными зернами минералов. Также стоит задача исследования микроагрегатов почв методом ЛД. И те, и другие будут вести себя как абсорбирующие свет частицы.

Для экспериментального обоснования нами были проведены следующие опыты.

Модельный эксперимент с полиминеральными смесями (диссертация: Глава 3.1.1). Были получены распределения частиц по размерам для чистых минералов. Далее для качественной оценки влияния среднего значения n из минералов были составлены двух-, трех- и пятикомпонентные смеси. Среднее значение n для смеси было рассчитано исходя из объемных долей минералов в смеси. Теоретические расчеты распределения частиц по размерам в смесях были сделаны исходя из полученных распределений для чистых минералов и объемной доли их участия в смеси. Для количественной оценки были приготовлены двухкомпонентные смеси каолина и кварца с соотношением компонентов по объему от 1:9 до 1:1, так, чтобы для каждого минерала доля его участия в смеси менялась от 10 до 90 и от 90 до 10 %, соответственно.

Проделанный модельный эксперимент показал, что некорректно выбранные оптические параметры частиц могут существенно исказить результаты анализа. Использование среднего значения для объектов, состоящих из частиц, имеющих контрастные оптические свойства, может легко повлечь за собой возникновение таких артефактов, как *смещение максимума распределения частиц по размерам, недоучёт частиц с предельными значениями n для смеси*. В случае почв, характеризующихся чаще всего не только полиминеральным составом, но и имеющих наравне с частицами минералов органо-минеральные компоненты и частицы полностью органической природы, рекомендовать использование какой-то конкретной величины n не представляется возможным.

Микроскопические исследования элементарных частиц и микроагрегатов почв (диссертация: Глава 3.1.2). Для оценки формы частиц, состояния их поверхности и морфологического описания методом СЭМ были исследованы фракции <20 мкм горизонта E (3-10 см) Al-Fe-гумусового подзола и горизонтов AUrz (0-10 см) и BCAtc (120-130 см) чернозема миграционно-мицеллярного мощного после различных пробоподготовок (взбалтывание водной суспензии с концентрацией частиц 1:2.5 в течение 10 минут с частотой колебаний 2500мин⁻¹; УЗ диспергация с энергиями 65, 453 и 1101 Дж·мл⁻¹). Приготовленные суспензии почв пропускались через сито 20 мкм. Прошедшая через сито суспензия высаживалась под давлением на мембранный фильтр из нитроцеллюлозы (с диаметром пор 0.22 мкм), чтобы исключить слипание частиц по время

Таблица 1. Содержание (%) групп почвенных частиц по фактору формы (F) Е.Б. Скворцовой: <0.4 – вытянутая изрезанная, 0.4-0.6 – изометричная изрезанная, 0.6-0.8 – изометричная слабоизрезанная, 0.8-1 – округлая и близкая к округлой

Пробоподготовка	<0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
<i>гор. E, Al-Fe-гумусовый подзол</i>				
Взбалтывание	7	31	47	14
65 Дж·мл ⁻¹	3	23	52	21
453 Дж·мл ⁻¹	4	24	56	16
1101 Дж·мл ⁻¹	3	20	63	14
<i>гор. AUrz, чернозем</i>				
Взбалтывание	1	33	60	6
65 Дж·мл ⁻¹	2	22	58	18
453 Дж·мл ⁻¹	1	20	59	21
1101 Дж·мл ⁻¹	2	14	72	12
<i>гор. BCAtc, чернозем</i>				
Взбалтывание	10	33	50	8
65 Дж·мл ⁻¹	10	28	48	14
453 Дж·мл ⁻¹	5	30	48	16
1101 Дж·мл ⁻¹	4	18	57	21

высушивания.

Исследования показали, что форма частиц чаще всего существенно отклоняется от округлой (**Таблица 1**). Анализ методом главных компонент по параметрам формы частиц с последующей кластеризацией показал, что в исследованных образцах почв могут быть выделены от 6 до 8 типов микроагрегатов и ЭПЧ. Интересным кажется дополнение этих результатов данными элементного состава, получаемыми сопряженно с микроскопическими исследованиями с помощью различных зондов. Однако даже по форме и внешнему виду частиц можно сказать, что такой анализ позволяет выделить различные по генезису типы частиц.

Таким образом, для исследования образцов почв методом ЛД корректен выбор модифицированных уравнений Ми для несферических частиц (при наличии в программном обеспечении анализатора), которые используются для расшифровки дифракционной картины в промышленных лазерных дифрактометрах последнего поколения (например, Microtrac Bluewave, Mastersizer 3000).

При использовании $\chi = 1$, показатель преломления n не оказывает значимого влияния на результаты расчёта, поэтому аналитику нет необходимости в выборе данного значения. Также это позволяет избежать ошибок, обозначенных в разделе 3.1.1 диссертации.

3.2 Пробоподготовка почв к гранулометрическому анализу. Способ пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу будет зависеть от поставленной задачи. Обзор имеющихся представлений (диссертация: Глава 3.1.2) об объекте гранулометрического анализа позволил разделить между собой понятия ЭПЧ и первичного элемента почв. Для диспергации почв до ЭПЧ необходимо применение физического воздействия (УЗ, растирание в пасте, встряхивание со стеклянными шариками и т.д.). Для разделения до первичных элементов почв, имеющих развитую микроструктурную организацию, необходимым условием является удаление перед этапом диспергации органического вещества (ОВ), аморфных форм железа и других соединений, являющихся новообразованными в процессе почвообразования и выступающих в качестве агрегирующих веществ. Каждое из воздействий на ТФ почв несет свою долю информации об её организации. При пробоподготовке почв к анализу методом ЛД необходимо подготовить навеску малой величины, что далеко не всегда позволяет осуществить простое переложение существующих методик. Подготовка суспензии большего объема сопряжена с ошибками при отборе представительной аликвоты для анализа.

Ультразвуковая диспергация почв. Исследование распределений частиц по размерам в процессе увеличения энергии диспергации (с 65 до 1101 Дж·мл⁻¹) показало следующее. Для большинства образцов почв происходит прекращение выхода илистой фракции (ИФ, <1 мкм) и физической глины (ФГ, <10 мкм) при достижении энергии диспергации равной 450 Дж·мл⁻¹. Исключение составляют горизонты средней (В1, 30-40 см) и нижней (В2, 125-145 см) частей профиля ферраллитной почвы. Даже при высоких энергиях диспергации происходит дальнейший выход ИФ, ФГ и уменьшение медианного размера частиц D50.

Для ряда образцов почв с неустойчивой микроструктурой характерным является максимальный выход ФГ после минимального воздействия с помощью УЗ (65 Дж·мл⁻¹) на водные суспензии почв. К таким относятся исследованные образцы агродерново-подзолистой почвы (Р1, 0-10 см; ЕL, 30-35 см; ВТ1, 55-65 см), горизонта Eh1 (11-14 см) подзолистой почвы, горизонтов АЕL (15-25 см) и ВТ1 (55-65 см) серой лесной почвы, горизонта ВСАmc (120-130 см) чернозема. Так, в агродерново-подзолистой почве (Р1, 0-10 см), образцах чернозема при более высоких уровнях энергии (от 130 Дж·мл⁻¹) происходит выделение ИФ за счет разрушения устойчивых микроагрегатов размером ~2-10 мкм. Происходящий

также распад микроагрегатов размерами 60-100 мкм с выделением частиц диаметром ~20 мкм не вносит существенного вклада в соотношение между физическим песком и ФГ.

Эксперимент с разверткой по энергии УЗ воздействия на почвенные суспензии показал (диссертация: Глава 3.2.1), что исследованные образцы почв могут быть разделены на имеющие *неустойчивую микроструктуру* и *устойчивую микроструктуру*. Первые диспергируются до ЭПЧ при минимальных значениях энергии, в нашем случае минимальная использованная энергия – 65 Дж·мл⁻¹. В образцах почв с устойчивой микроструктурой продолжается разрушение частиц при энергиях выше 65 Дж·мл⁻¹. Кроме того, некоторые типы почв (например, чернозем, ферраллитная) могут содержать особо устойчивые частицы размером пыли (1-10 мкм), разрушающиеся только при энергиях свыше 500 Дж·мл⁻¹. Даже при энергии УЗ равной 1101 Дж·мл⁻¹ частицы чернозема имеют сложное строение (диссертация: Глава 3.1.2). Таким образом, *количественная граница между уровнями ЭПЧ и микроагрегатов* может быть выбрана по стабилизации выхода физической глины с увеличением энергии ультразвуковой диспергации и равняется энергии 450 Дж·мл⁻¹.

Гранулометрический состав почв с удалением ОБ с помощью пероксида водорода. Выбор способа окисления ОБ почв с помощью пероксида водорода. Были использованы следующие варианты пробоподготовок:

№	Этап пробоподготовки					
	I	II	III	IV	V	VI
1	15 мл H ₂ O	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹				
2	15 мл H ₂ O	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹	5 мл 30% H ₂ O ₂			
3	5 мл 30% H ₂ O ₂	10 мл H ₂ O	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹	16 ч	УЗ 130 Дж·мл ⁻¹	
4	5 мл 30% H ₂ O ₂	5 мл H ₂ O	16 ч	80°C + 5 мл 30% H ₂ O ₂	кипячение, 1 час	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹
5	5 мл 30% H ₂ O ₂	5 мл H ₂ O	16 ч	80°C + 5 мл 30% H ₂ O ₂	кипячение, 1 час	
6	5 мл 30% H ₂ O ₂	5 мл H ₂ O	16 ч	5 мл H ₂ O	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹	
7	5 мл 30% H ₂ O ₂	5 мл H ₂ O	16 ч	5 мл H ₂ O	перемешивание со стеклянной палочкой	
8	3 мл 30% H ₂ O ₂	3 мл H ₂ O	7 суток при T=60°C	УЗ 453 Дж·мл ⁻¹		

В Главе 3.2.2 диссертации на примере гумусового горизонта чернозема миграционно-мицеллярного (AUrz) было показано, что длительность окисления ОБ почв с помощью H₂O₂ при T=60°C составляет 7 суток. Этот же способ позволяет достичь более полного окисления по сравнению со стандартным способом (16 часов при комнатной температуре в растворе H₂O₂, добавление порции H₂O₂ и последующее кипячение в течение часа). Такое воздействие

обеспечивает окисление свободных органических ЭПЧ (размером крупнее 100 мкм).

Гранулометрический состав почв с удалением ОБ. Окисление ОБ почв приводит к уменьшению содержания ФГ на 3.97% в гор. Р дерново-подзолистой почвы, 14.5% в гор. АUrz чернозема, 9.7% в гор. Аi' вертисоли и увеличению содержания ФГ на 29.6% в гор. А ферраллитной почвы. При определении класса почв по гранулометрическому составу после стадии удаления ОБ происходит смена градации для 21 и 4 образцов из 42 по кл. Качинского и кл. USDA, соответственно. Что обусловлено спецификой распределения ОБ в распределении частиц по размерам.

Наблюдается тесная линейная взаимосвязь ($p=0,05$) между содержанием углерода (С, %) и суммой отрицательных разниц между кривыми распределения частиц по размерам после удаления ОБ и без удаления ОБ (**Рисунок 2**).

Сравнение химических способов пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу. Сравнение химических методов диспергации между собой и с УЗ способом пробоподготовки показало, что наиболее полную диспергацию обеспечивает УЗ (диссертация: Глава 3.2.3). Неполноту диспергации с помощью химических способов пробоподготовки можно объяснить значительно более низкой (1-3%) использованной нами концентрацией суспензий по сравнению с пробоподготовкой к анализам, основанной на явлении седиментации (~20%). Выбранная нами низкая концентрация суспензий объяснялась, с одной стороны, требованием метода ЛД к величине навески, с другой – ошибками, возникающими при отборе аликвоты из большой порции приготовленной суспензии. Так, добавление стадии УЗ обработки аликвоты суспензии (1-3%) после диспергации раствором аммиака образца чернозема (гор. АUrz) приводит к несколько большему выходу илистой фракции (на 1.3%) (диссертация: Глава 3.2.3, Рисунок 61). Таким образом, для минимизации или исключения ошибок при отборе аликвоты суспензии и эффективного использования методов химической диспергации при подготовке образцов почв к анализу методом ЛД возможны два подхода:

- 1) химическая диспергация более крупной навески почв (от 1 г) со стандартным разведением (почва:вода~1:4) и физическим воздействием (встряхивание) и увеличение числа аналитических повторностей за счет отбора большего числа аликвот (>3);
- 2) химическая диспергация навески оптимальной концентрации для полного переноса непосредственно в блок пробоподготовки лазерного анализатора с дополнительной стадией УЗ обработки.

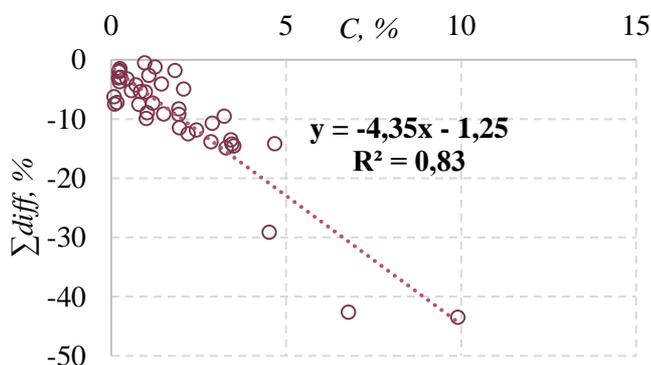


Рисунок 2. Зависимость между содержанием углерода (С, %) и суммой отрицательных разниц ($\Sigma diff$, %) между кривыми гранулометрического состава после стадии удаления ОБ и без удаления ОБ

На данный момент протоколы пробоподготовки имеют несколько

стадий в зависимости от наличия или отсутствия легкорастворимых солей, карбонатов, соединений Fe, количества и качества ОВ почв. Как итог, можно говорить о невозможности нахождения универсального способа пробоподготовки почв к гранулометрическому анализу с помощью методов химической диспергации. Однако сочетание между собой различных подходов к диспергации твердой фазы почв позволит глубже проникнуть в понимание структурной организации почв. Один и тот же способ пробоподготовки будет по-разному воздействовать в зависимости от типа почв и может рассказать об их специфике при должной щепетильности в подборе оказываемых воздействий. Нельзя сказать, что подобное не изучалось до сих пор (Алексеева, 2007; Kaiser et al., 2012; McLean, 1931; McLean, 1931; Robinson et al., 1925; Schulte et al., 2016). Однако благодаря анализу гранулометрического состава с помощью современных методов, позволяющих получить непрерывное распределение частиц по размерам и увидеть мельчайшие изменения, возможен переход исследований на новый количественный уровень. Для определения текстуры почв должны быть использованы методы диспергации, не приводящие к модификации твердой фазы почв.

3.3 Пробоподготовка почв к микроагрегатному анализу. Объектами исследования были гумусовые горизонты P (0-10 см) агродерново-подзолистой почвы, AY (0-15 см) серой лесной почвы, AUrz (0-10 см) чернозема, A₁₂ (10-20 см) ферраллитной почвы. Образцы почв предварительно были растерты пестиком с резиновым наконечником и пропущены через сито с ячейкой 1 мм. Было выбрано 6 способов пробоподготовки к микроагрегатному анализу:

1. Взбалтывание водной суспензии (почва:вода~1:300) в течение 1 часа на мультиротаторе Multi Bio RS-24 (Biosan, Латвия), скорость вращения 80 мин⁻¹.
2. Кипячение суспензии почвы (почва:вода~1:300) в течение 1 часа.
3. Перемешивание в течение 3 минут навески почвы с 1 мл H₂O_{дист.} (25 мг почвы в 600 мкл воды, после 10 минут насыщения) стеклянной палочкой.
4. Встряхивание водной суспензии (1.5 мл в пробирках типа Eppendorf на 2 мл, концентрация суспензии – от 1.7 до 2.7% в зависимости от дисперсности образца) с помощью вортекса Reax Top (Heidolph, Германия) в течение 1 минуты при частоте колебаний 1000 мин⁻¹, в течение 1, 3, 5, 7, 10, 12, 15, 20, 30 минут при 2500 мин⁻¹. Амплитуда колебаний 5 мм.
5. Термостатирование образца (1.5 мл в пробирках типа Eppendorf на 2 мл, концентрация суспензии – от 1.7 до 2.7% в зависимости от дисперсности образца), 16 часов, 80°C с последующим встряхиванием при 2500 мин⁻¹ в течение 10 минут.
6. Насыщение образца в течение 14 часов H₂O_{дист.} (концентрация суспензии – от 1.7 до 2.7% в зависимости от дисперсности образца), с последующим встряхиванием в течение 20 минут при 2500 мин⁻¹.

Для образца агродерново-подзолистой почвы была отмечена малая разница между используемыми способами пробоподготовки (*Рисунок 3*). Этот результат можно объяснить слабой агрегированностью и отсутствием разнообразия в механизмах агрегации. Минимальное физическое воздействие на агрегаты

оказывает взбалтывание (80 мин^{-1} , 1 час) разбавленной (1:300) водной суспензии. Данный способ позволяет идентифицировать в образцах все водоустойчивые микроагрегаты почв.

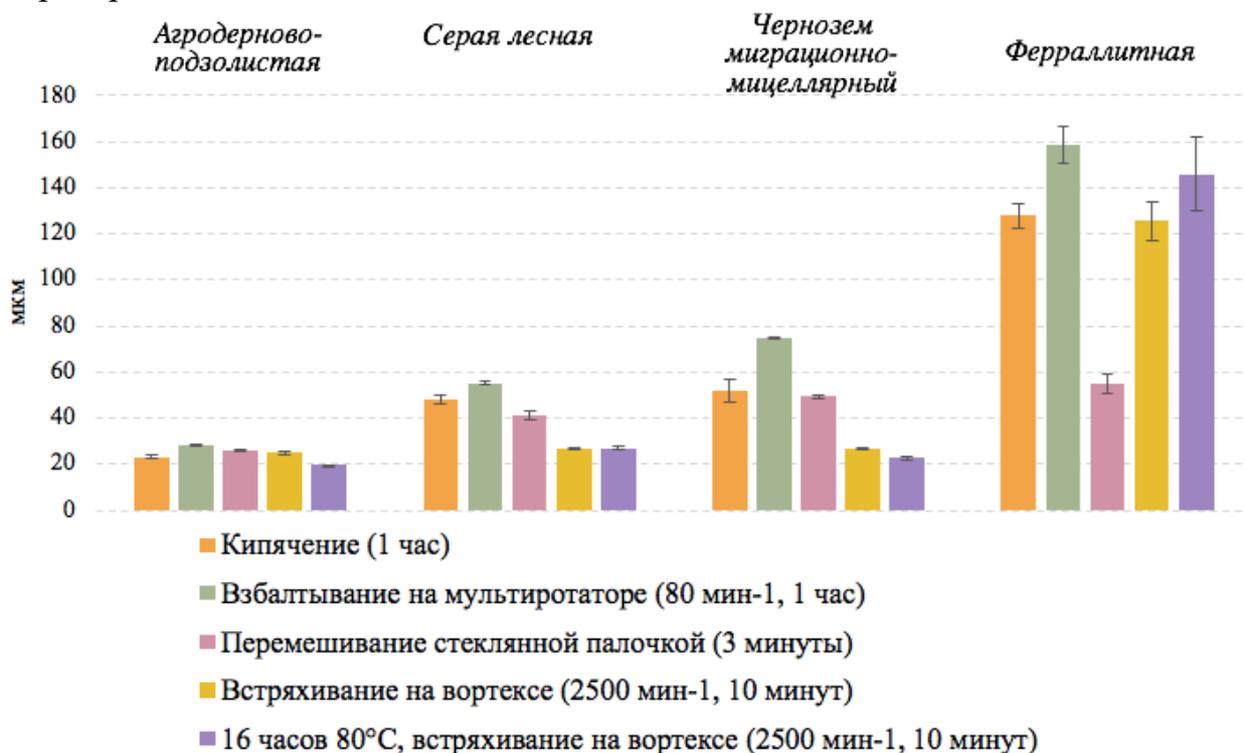


Рисунок 3. Медианный диаметр микроагрегатов (D_{50} , мкм) после различных способов пробоподготовки

Способ с кипячением суспензии не позволяет использовать массу навески образца, применяемую в микроагрегатном анализе с седиментационным окончанием. Считается, что за 1 час кипячения происходит удаление заземленного воздуха (Шеин, и др., 2007). При используемом разбавлении (1:300) разрушение микроагрегатов в основном происходит за счет выхода адсорбированного воздуха, солей и, возможно, в результате растворения органических «клеев». При этом также может происходить растворение карбонатов, которые являются одним из факторов агрегации мелкозема. Процедура перемешивания водных суспензий пробы стеклянной палочкой стандартизации не поддается. В результате субъективного фактора происходит неконтролируемое механическое разрушение части водоустойчивых микроагрегатов почв, например, как в образце ферраллитной почвы.

Термостатирование водной суспензии образца почвы в течение 16 часов при 80°C применяют для экстракции фракции водорастворимого органического вещества (ВОВ) (Chan, et al., 1999). Анализ данных микроагрегатного состава, полученных после пробоподготовки способами 1 и 5 дает информацию о роли ВОВ в процессе микроагрегации почв. Согласно Эдвардсу (Edwards, et al., 1967), для некоторых почв удаление ВОВ не влияет на их микроагрегатный состав. Это условие выполняется для образца серой лесной почвы, в то время как для образцов агродерново-подзолистой почвы и чернозема отмечено некоторое уменьшение величины D_{50} .

Применение интенсивного встряхивания водных суспензий с увеличением времени воздействия позволяет определить распределение по размерам микроагрегатов почв различной степени водоустойчивости. Поэтому мы проследили, через какое время происходит стабилизация суспензии для образцов различных типов почв (**Рисунок 4**). Встряхивание водных суспензий в течение различных периодов времени показало, что постепенно происходит уменьшение D50 (мкм). После 10 минут происходит стабилизация суспензий, D50 уже значительно не изменяется.

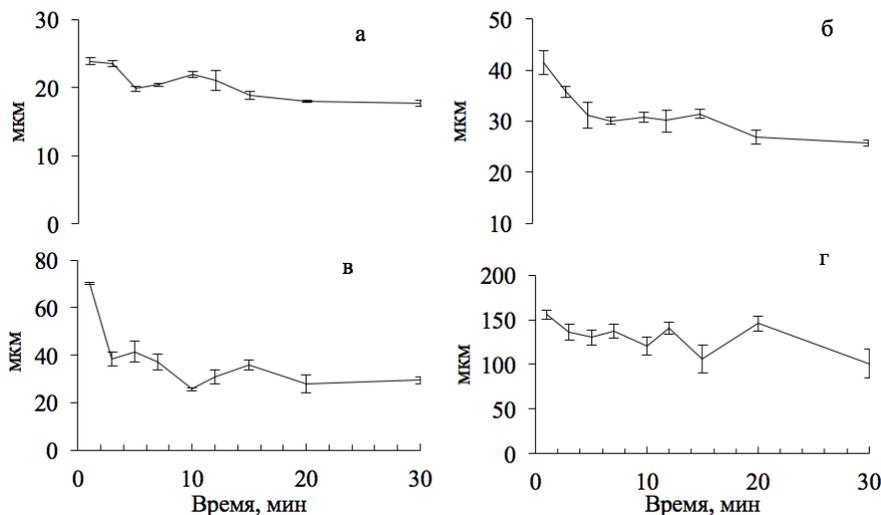


Рисунок 4. Изменение медианного диаметра частиц (D50, мкм) по мере увеличения времени встряхивания водных суспензий исследованных образцов почв: а) агродерново-подзолистой; б) серой лесной; в) чернозема типичного; г) ферраллитной

Для чернозема типичного отмечено разрушение значительной части микроагрегатов в течение 3 минут (D50 уменьшается с 70 до 38 мкм, и происходит увеличение содержания частиц <10 мкм с 8,6 до 17%).

Таким образом, встряхивание в течение 10 минут (2500 мин⁻¹) водных суспензий почв

позволяет получить распределение водоустойчивых микроагрегатов почв по размерам. Такой способ пробоподготовки не приводит к модификации свойств твердой фазы, и его можно рекомендовать в качестве стандартного для оценки микроструктуры почв.

3.4 Микроструктурная организация исследованных почв.

Для характеристики исследованных образцов почв по микроструктурной организации были выбраны 5 параметров: содержание ила (С, %), содержание физической глины (РС, %), сумма положительных разниц между

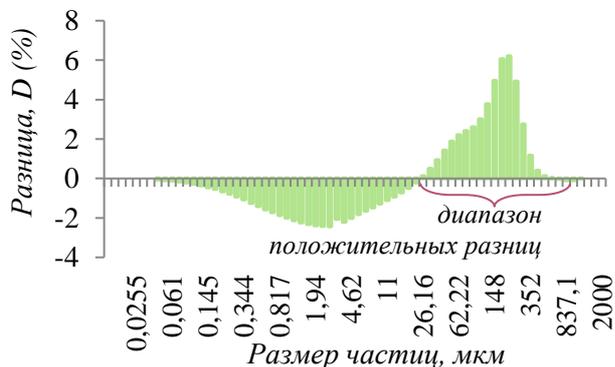


Рисунок 5. Разница между кривыми микроструктурной и гранулометрической составов. Ферралитная почва, гор. А1

дифференциальными распределениями микроагрегатного и гранулометрического составов (D, %) (**Рисунок 5**), коэффициент дисперсности по Качинскому (КС, %), фактор структурности по Вадюниной (VC). Ил и физическая глина являются наиболее значимыми компонентами гранулометрического состава почв, участвующими в микроагрегации. Коэффициент Качинского отражает актуальную вовлеченность ила в

микроагрегацию, а фактор структурности по Вадюниной – потенциальную способность почв к микроагрегации. Рассчитанный параметр D выражает количество микроагрегатов и рассчитывается во всём диапазоне частиц почв. Подобный формат представления данных также позволяет увидеть, в каком диапазоне размеров частиц располагаются микроагрегаты и преимущественно каким размером частиц представлены.

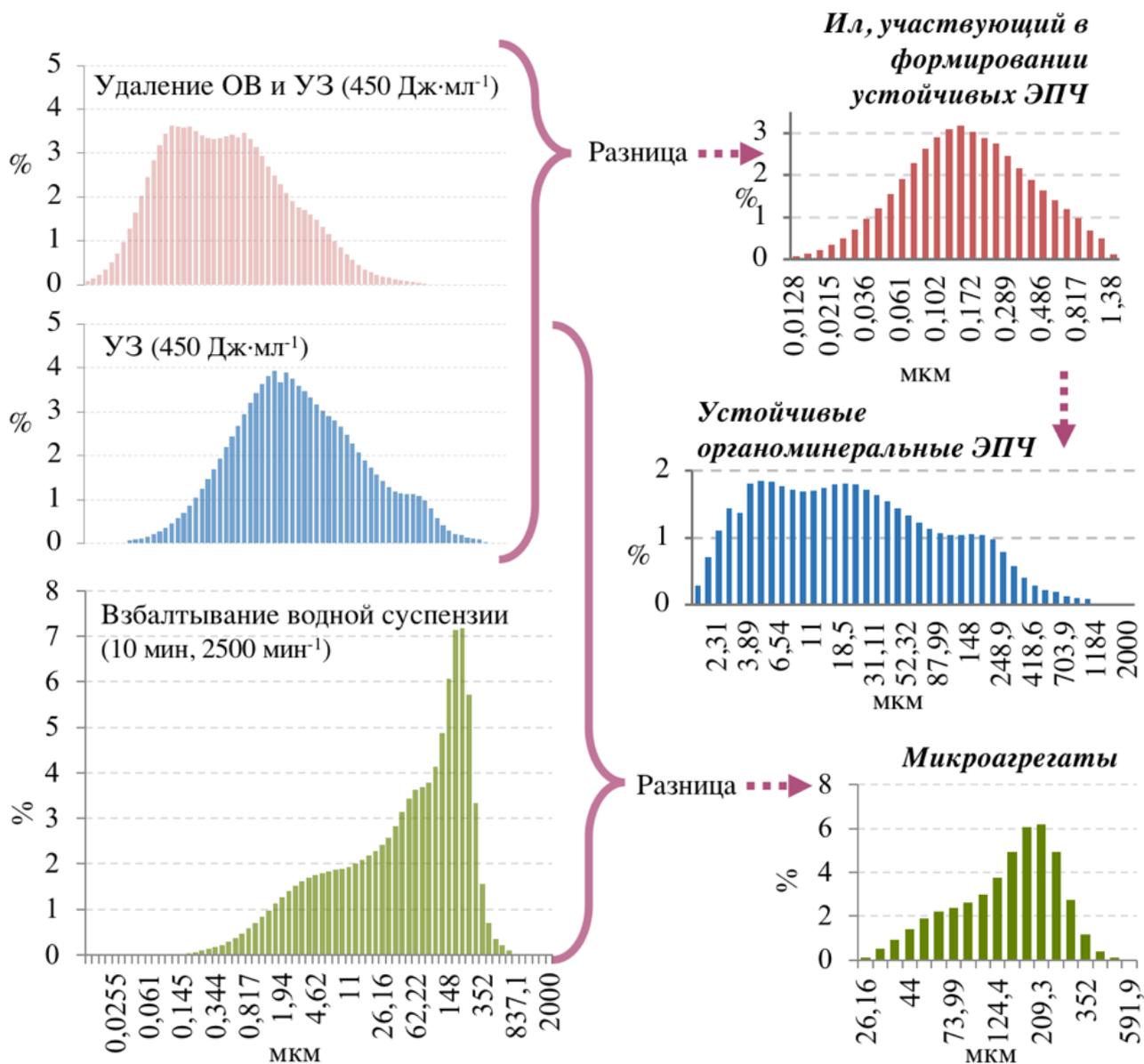


Рисунок 6. Схема микроструктурной организации гор. А1 ферралитной почвы

Полученные распределения первичных элементов, ЭПЧ и микроагрегатов методом ЛД позволяют количественно охарактеризовать особенности микроструктурной организации исследованных почв. Проведенная поисковая иерархическая кластеризация по параметрам гранулометрического состава и микроагрегированности показала, что полученные данные позволяют довольно четко разделять образцы на кластеры, имеющие генетическую общность. Целесообразным кажется дополнение выбранных параметров (С, РС, D, ВС, КС) показателями, характеризующими распределение первичных элементов почв

и/или локализацию органических ЭПЧ и характер органоминеральных связей между первичными элементами. Также выбранные показатели могут быть заменены на более гибкие, так как коэффициент дисперсности по Качинскому и фактор структурности являются слишком строгими за счет жестко принятых для расчетов границ. Как было показано в данной работе, локализация частиц той ли иной природы будет сильно зависеть от генетических особенностей почв (Например, *Рисунок 6*).

3.5 Аппроксимация распределений частиц по размерам с помощью математических моделей. Сравнение качества аппроксимации распределений почвенных частиц по размерам на основе величины Байесовского информационного критерия (*BIC*) показало, что для подавляющего большинства распределений ЭПЧ по размерам наилучшими являются модели, предложенные Фредлундом (Fredlund, и др., 2000) – одномодальные (FRED3, FRED4) и бимодальная (FREDbi), а также модифицированная нами для трехмодальных распределений (FREDtri) (пример аппроксимации представлен на *Рисунке 7*). Эти модели также являются наилучшими для описания кривых микроагрегатного состава, с тем отличием, что 49 из 59 распределений лучше всего аппроксимируются с помощью модели FREDtri. BIC был выбран нами в качестве главного критерия, так как он является чувствительным к числу параметров модели и накладывает «штраф» на неоправданное увеличение их количества. Однако несмотря на то, что в модифицированной модели FREDtri число параметров значительно увеличивается (с 8 в FREDbi до 13 в FREDtri, исключая d_{\min} , определяемое как диаметр частиц, имеющий первое ненулевое значение по оси Y), такое увеличение параметров оправдывается ростом качества аппроксимации.

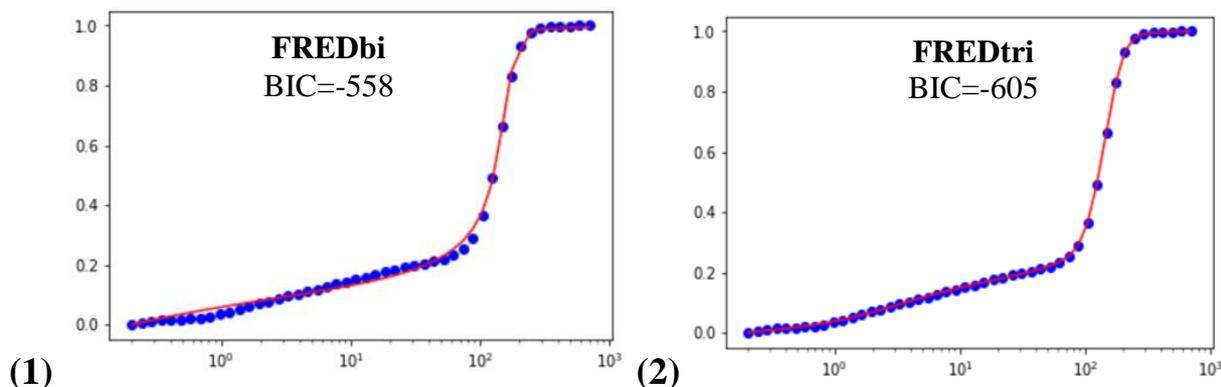


Рисунок 7. Аппроксимация экспериментальных данных распределения ЭПЧ по размерам с помощью (1) бимодальной модели Фредлунда (FREDbi) и (2) модифицированной трехмодальной модели (FREDtri) (на примере гор. Csa луговой почвы):

● – экспериментальные данные, — - кривая аппроксимации

Так как большинство исследованных распределений ЭПЧ по размерам наилучшим образом описываются малым разнообразием моделей, выявить зависимость качества работы моделей от класса почв по гранулометрическому составу не представляется возможным – трехмодальные и двухмодальные

варианты модели Фредлунда распределены равномерно по грациям (диссертация: стр. 151).

3.6 Связь между результатами метода ЛД и другими методами исследования физических свойств почв. Для исследованной выборки почв показано, что прямое использование кл. Качинского для результатов метода ЛД приводит приблизительно в 44% случаев к искажению класса почв по гранулометрическому составу (диссертация: Глава 3.6.1).

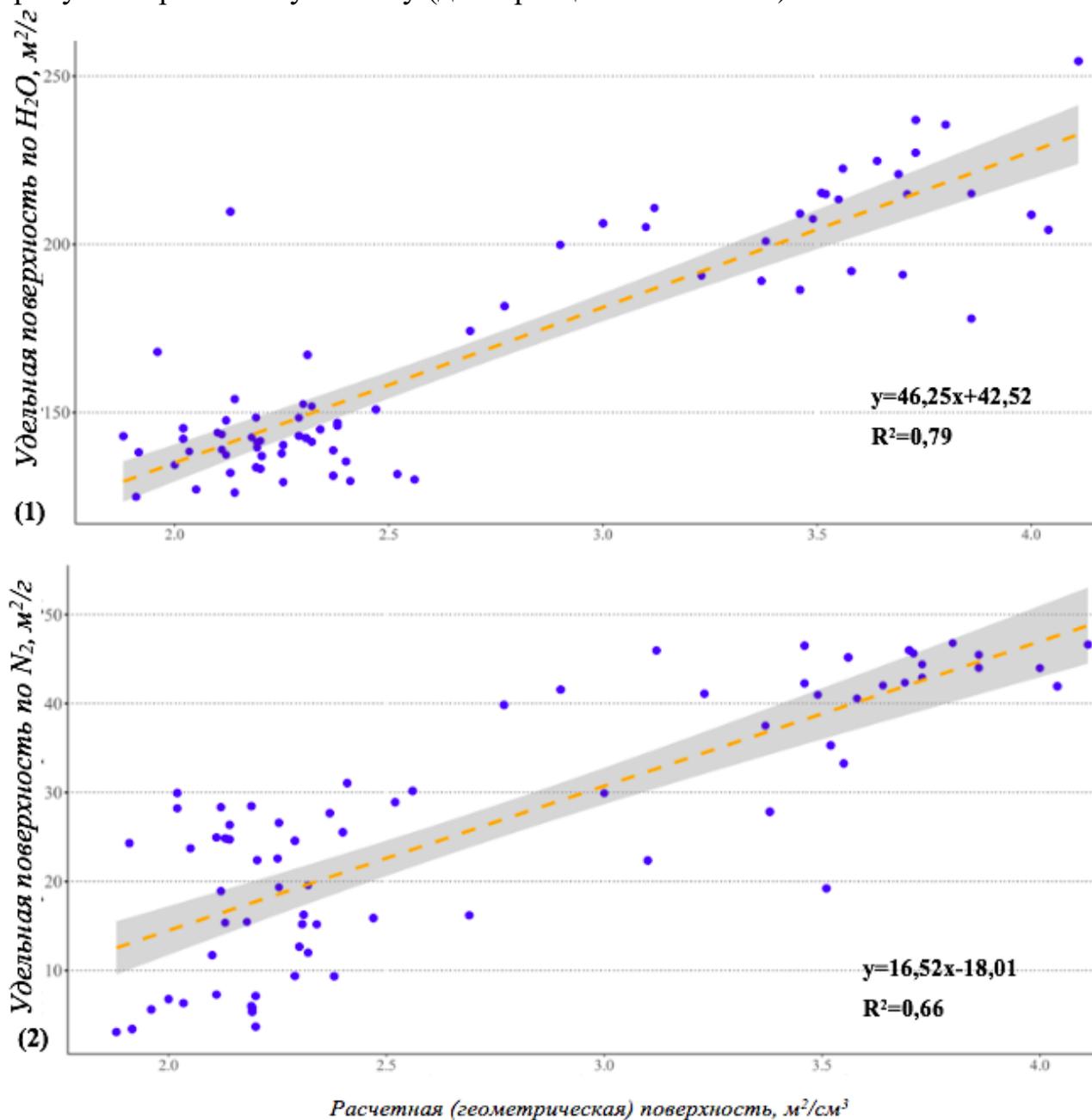


Рисунок 8. Диаграммы рассеяния. Взаимосвязь между: 1 - расчетной площадью поверхности (CS , м²/см³) и удельной поверхностью по воде (S_{H_2O} , м²/г), 2 - расчетной площадью поверхности (CS , м²/см³) и удельной поверхностью по азоту (S_{N_2} , м²/г). Черноземы (Курская и Саратовская обл.)

Необходима адаптация существующих и разработка новых классификаций для метода ЛД. Тем более что благодаря быстроте анализа метод претендует на широкое использование в прикладном почвоведении. Возможно использование регрессионных моделей, полученных при сравнении данных метода ЛД и пипет-

метода, так как между ними существует заметная и высокая взаимосвязь. Однако для этого необходимо создание отдельной базы данных гранулометрического состава российских почв, выполненных двумя методами, так как регрессионные модели необходимы под конкретную выборку почв (схожего генезиса и минералогического состава).

Показанные в работе взаимосвязи между величиной расчетной площади поверхности (CS , m^2/cm^3), рассчитываемой из результатов распределения частиц, полученного методом ЛД, и величиной удельной поверхности, полученными с использованием классических методов, позволяют рекомендовать данный показатель в качестве экспресс-оценки площади поверхности твердой фазы почв (**Рисунок 8**).

С помощью метода кривых сушки почв получилось охарактеризовать водоудерживающую способность исследованных почв. Метод является чувствительным и показывает различия как в профильном изменении диапазонов содержания влаги, так и между типами почв. На примере образцов профиля агродерново-подзолистой почвы была проверена воспроизводимость метода ($n=3-4$). Ошибка среднего при выделении критических точек была весьма низкой и не превышала 1.7% (диссертация: Приложение 8, стр. 248).

Между параметрами моделей распределений ЭПЧ по размерам и содержаниями влаги найдены линейные взаимосвязи, для большинства исследованных образцов почв – тесные и устойчивые. Однако взаимосвязи могут быть и нелинейными, что не могло быть выявлено при использованном методе поиска связей (был попарно рассчитан коэффициент корреляции по Пирсону и построены соответствующие корреляционные матрицы). Для чернозема (диссертация: Таблица 14) содержание влаги, при котором заканчивается анализ (W_{T60}) соизмеримо с влажностью почвы над раствором хлористого лития ($LiCl$, $P/P_0=0.15$), определенной классическим методом равновесия над растворами солей. Считается, что это влажность, при которой на поверхности частиц

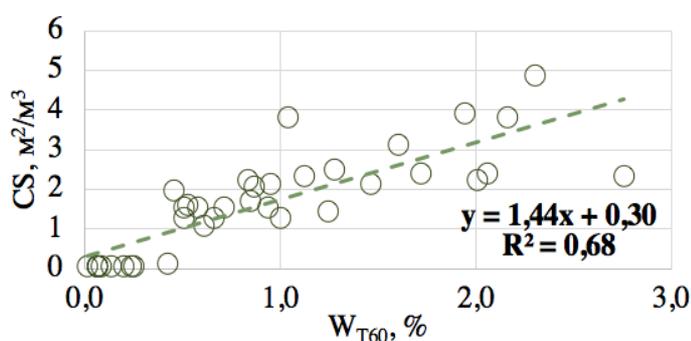


Рисунок 9. Взаимосвязь между содержанием влаги в критической точке W_{T60} (%) и расчетной величиной поверхности (CS , m^2/m^3), подзолистая почва с микропрофилем подзола, подзолы на песках, серая почва, вертисоль

формируется монослой воды. Для образцов ряда почв (**Рисунок 9**) существует тесная линейная взаимосвязь между величиной W_{T60} и величиной CS . Влажность $W_{кр3}$ соизмерима с влажностью при давлении $P/P_0=0.32$. Влажность разрыва капилляров, определяемая по кривым сушки ($W_{кр2}$) несколько выше величины максимально гигроскопической влажности ($MГ$), определяемой над растворами солей.

ВЫВОДЫ:

- 1) Возможность проведения измерений при различных режимах работы лазерного анализатора, экспресс оценка результатов предварительного воздействия на образец, его модификации при возможности анализа миллиграммовых количеств образца, позволяют рассматривать метод лазерной дифракции как современный инструментальный метод анализа дисперсных систем позволяющий решать на качественно новом уровне широкий круг вопросов фундаментального и прикладного почвоведения. При программной обработке дифракционной картины распределения частиц твердой фазы почв по размерам рекомендуется использовать несферическую форму частиц при коэффициенте абсорбции равном 1.
- 2) Микроструктурная организация почв может быть представлена в виде трехкомпонентной модели, состоящей из *первичных элементов (primary soil particles)*, *элементарных почвенных частиц (ЭПЧ, elementary soil particles)* и *микроагрегатов (microaggregates)*, где:
первичные элементы почв – индивидуальные минеральные частицы почв;
ЭПЧ – твердофазные продукты почвообразования, представленные обломками горных пород и минералов, органо-минеральными и органическими частицами, все компоненты которых находятся в химическом и физико-химическом взаимодействии;
микроагрегаты – более сложные по строению компоненты, состоящие преимущественно из ЭПЧ и органических остатков, связанные между собой более слабыми взаимодействиями, чем ЭПЧ;
количественная граница между уровнями ЭПЧ и микроагрегатов эквивалентна энергии ультразвуковой диспергации водной суспензии равной $450 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$.
- 3) Почвы, обладающие *первичной микроструктурой*, диспергируются УЗ при $65 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$ до первичных элементов; почвы, представленные различными типами ЭПЧ и микроагрегатами, разрушающимися только после удаления органического вещества и других клеящих веществ характеризуются *вторичной микроструктурной организацией*.
- 4) Диспергацию водной суспензии образца до ЭПЧ для определения гранулометрического состава почв методом ЛД обеспечивает энергия УЗ воздействия равная $450 \text{ Дж} \cdot \text{мл}^{-1}$. Данный способ пробоподготовки не приводит к дроблению частиц минеральной матрицы и его можно рекомендовать в качестве стандартного. Результат анализа позволяет определить значения преимущественных диаметров ЭПЧ (мкм) и содержание фракций ЭПЧ (об. %). Подготовка образцов почв к микроагрегатному анализу методом ЛД производится путем встряхивания 2.5 % водной суспензии пробы в течение 10 минут с частотой 2500 мин^{-1} . Результат анализа позволяет получить значения преимущественных диаметров (мкм) и содержание фракций (об. %) микроагрегатов.
- 5) Классификационные показатели (K_0 , A_2 , P) гранулометрического и микроагрегатного составов почв, разработанные на основе

седиментационных данных могут рассчитываться на основе результатов, полученных методом ЛД. Однако если преобладающее число микроагрегатов представлено частицами мельче, чем фракция песка в гранулометрическом анализе, для расчета A_z рекомендуется использовать суммы частиц крупнее 10 мкм. Между содержаниями гранулометрических фракций, полученными с помощью пипет-метода и метода лазерной дифракции, существует заметная или высокая линейная взаимосвязь, позволяющая с помощью полученных регрессионных моделей осуществлять пересчет данных лазерной дифрактометрии в данные пипет-метода для последующей оценки почв по гранулометрическому составу с помощью существующих классификаций.

- 6) Для аппроксимации интегральных кривых гранулометрического и микроагрегатного состава, полученных методом лазерной дифракции, универсальной и позволяющей получить наиболее близкие к экспериментальным данным моделью является модифицированная нами до трехмодальной модель Фредлунда.
- 7) Для агродерново-подзолистой почвы наблюдается линейная взаимосвязь ($R^2=0,87$) между расчетной величиной площади поверхности частиц (CS , $см^2/см^3$) и величиной удельной поверхности, определяемой по N_2 . Для черноземов наблюдается линейная взаимосвязь ($R^2=0,79$) между расчетной величиной площади поверхности частиц и величиной удельной поверхности, определяемой по H_2O . Для черноземов наблюдается линейная взаимосвязь ($R^2=0,66$) между расчетной величиной площади поверхности частиц и величиной удельной поверхности, определяемой по H_2O . Таким образом, расчетная величина площади поверхности частиц, получаемая при определении распределения частиц по размерам методом ЛД может служить новой дополнительной характеристикой дисперсности почв.
- 8) Между результатами метода ЛД и такими физическими свойствами почв, как удельная поверхность, различные по связи с твердой фазой почв формы влаги, выделяемые по кривым сушки, существуют статистически достоверные взаимосвязи. Для практического использования результатов метода ЛД необходимо формирование базы данных ГС почв различного генезиса и на её основе разработка самостоятельной классификации почв по гранулометрическому составу.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WOS, SCOPUS, RSCI:

1. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В. Влияние многократного замораживания–оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ) // Почвоведение. — 2018. — № 2. — С. 187–196.
2. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Романенко К.А., Юдина А.В., Ключева В.В., Хайдапова Д.Д., Рогов В.В. Изменение порового пространства в гумусовых

агрегатах дерново-подзолистой почвы при многократном замораживании и оттаивании // *Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева*. — 2018. — № 91. — С. 6–20.

3. *Г. В. Харитонова, Е. В. Шеин, В. П. Шестеркин, Юдина А.В., Дембовецкий А.В., Остроухов А.В., Берников Н.В., Якубовская А.Я.* Гранулометрический состав донных отложений р.Буреи района Нижне-Бурейской ГЭС//*Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. — 2017. — № 1. — С. 24–34.
4. *Е. Б. Скворцова, В. А. Рожков, А. В. Юдина, Н. А. Васильева.* Изменчивость морфометрических профилей порового пространства дерново-подзолистой и серой лесной почвах Восточно-Европейской равнины// *Бюлл. Почв. Ин-та им. В.В. Докучаева*. — 2017. — № 87. — С. 73–85.
5. *Юдина А. В., Милановский Е. Ю.* Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов // *Бюлл. Почв. Ин-та им. В.В. Докучаева*. — 2017. — № 89. — С. 3–20.
6. *Н. П. Чижикова, Е. Б. Скворцова, Е. Б. Варламов, Чурилин Н.А., Чурилина А.Е., Абросимов К.Н., Юдина А.В., Романенко К.А.* Перераспределение минералов в элювиально-иллювиальном горизонте агродерново- подзолистой почвы // *Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева*. — 2017. — № 88. — С. 75–95.
7. *Е. Б. Скворцова, В. А. Рожков, К. Н. Абросимов, Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., Ключева В.В., Юдина А.В.* Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы// *Почвоведение*. — 2016. — № 11. — С. 1328–1336.

Некоторые из публикаций в прочих научных изданиях:

8. *Юдина А. В.* Гранулометрический состав и литологическая гетерогенность генетических горизонтов почв бугра Бэра и сопряженных ландшафтов // *Материалы по изучению русских почв*. — 2013. — № 7 (34). — С. 40–42.
9. *Yudina A., Fomin D., Vladimirov A., Vasilyeva N.* Obtaining soil hydraulic properties with dynamical model of water, vapor and heat transfer using soil drying kinetics // *Geophysical Research Abstracts*. — Vol. 20 of *EGU General Assembly 2018*. — Copernicus, 2018 – стр. 3744.
10. *Yudina A., Shishkov V.* Partitioning of primary and secondary soil particles by ultrasonic energy: consequences for microstructure organization // *Geophysical Research Abstracts*. — Vol. 20 of *EGU General Assembly 2018*. — Copernicus, 2018 – стр. 824.
11. *Yudina A. V.* Particle size distribution of agrosoddy-podzolic soil morphons and morphemes by laser diffraction analysis // *Article book. The international Soil Science Congress on “Soil science in international year of soils 2015”. 19-23 October, Sochi, Russia* — М.: Буки Веди, 2015 – стр. 431-436.
12. *Милановский Е. Ю., Юдина А. В., Шеин Е. В.* Лазерная дифрактометрия в почвоведении: проблемы и перспективы // *Технологии экологического*

развития: *Международная молодежная научная школа, посвященная Международному году почв; г. Москва: Материалы докладов.* — М.: МАКС-Пресс, 2015. — С. 8–9.

13. **Юдина А. В.,** *Милановский Е. Ю.* Индекс рефракции твердой фазы почв и его значение в лазерной дифрактометрии // *Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции (Белгород, 15–22 августа 2016 г.). Часть I. — Т. 1 из Часть I.* — Белгород: Издательский дом "Белгород", 2016. — С. 396–397.
14. **Юдина А. В.,** *Милановский Е. Ю.* Микроагрегатный анализ чернозема типичного методом лазерной дифракции // *Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования: сборник материалов научной конференции, посвященной 80-летию кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами.* — Воронеж: Издательско-полиграфический центр Научная книга Воронеж, 2017. — С. 567–570.
15. **Юдина А. В.** Гранулометрический состав и литологическая гетерогенность генетических горизонтов почв бугра Бэра и сопряженных ландшафтов // *Материалы XVI Докучаевских молодежных чтений "Законы почвоведения: новые вызовы"* — СПб.: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета, 2013 – стр. 40-42.