МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Клюева Валерия Валерьевна**

# Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного

Специальность 06.01.03 – Агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

| | |
|---|---|
| **Научный руководитель** | ***Хайдапова Долгор Доржиевна,*** *кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра физики и мелиорации почв, доцент* |
| **Официальные оппоненты** | ***Рыжова Ирина Михайловна,*** *доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра общего почвоведения, профессор*<br>***Харитонова Галина Владимировна,*** *доктор биологических наук, ФГБУН Институт горного дела ДВО РАН, отдел Водных и экологических проблем, главный научный сотрудник*<br>***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* |

Защита состоится «29» октября 2019 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.03.13 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр.12, биологический факультет МГУ, ауд. М–1.

E-mail: nvkostina@mail.ru, тел. 8(495)939-35-46

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/235635020/

Автореферат разослан «26» сентября 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Костина
Наталья Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования**. Изучение структуры почвы – один из важных вопросов почвоведения и агрофизики, так как структура определяет водный, воздушный, тепловой обмены и как следствие влияет на жизнедеятельность и питание растений, определяет противоэрозионную устойчивость. Прочность почвенной структуры зависит от большого количества физических, химических, биологических и антропогенных факторов. В настоящее время существует современный подход, с помощью которого возможно определять большое количество реологических параметров, характеризующих структуру почвы и её изменения под влиянием различных воздействий. Таким подходом является реометрия, позволяющая оперативно изучить и оценить широкий ряд важных структурных характеристик почвы, увеличить точность измерений в реологических исследованиях, значительно сократить время одного испытания. Одним из главных преимуществ данного подхода является возможность исследования образцов ненарушенного сложения (монолитов) и образцов с нарушенной структурой (паст и суспензий), что позволяет провести изучение и сравнительную оценку естественных и искусственно созданных межчастичных связей. Выявление взаимосвязи реологического поведения образцов с различной структурой с её физическими и химическими свойствами может дать ценную информацию об её формировании и устойчивости, изменении при механическом воздействии, что и обусловливает актуальность данного диссертационного исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Обзор отечественных и зарубежных работ свидетельствует о наличии широкого круга вопросов при изучении реологического поведения почв (Абрукова, 1976; Абрукова, 1980; Манучаров, 1983; Манучаров, Абрукова, 1982; Хайдапова и др., 2016; Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Pértile et al., 2018; Stoppe, Horn, 2018). Реометрический подход и, в частности, метод осцилляционной амплитудной развертки в почвоведении применяется с начала нулевых годов нынешнего столетия (Ghezzehei, Or, 2001). Он был рекомендован рядом авторов в качестве подходящего метода для изучения реологического поведения почв, особенно в вязкоупругой

области до перехода в область вязкого течения (Хайдапова и др., 2014; Хайдапова и др., 2016; Хайдапова, Милановский, Честнова, 2014; Шеин и др., 2014; Markgraf, 2006; Markgraf, Horn, 2006а; Markgraf, Horn, 2006б; Markgraf, Horn, Peth, 2006). Были изучены характеристики вязкоупругого поведения черноземов (Хайдапова, Милановский, Честнова, 2014; Шеин и др., 2014), подзолисто-глееватых почв (Хайдапова и др., 2014), вертисолей и оксисолей (Жукова и др., 2015; Holthusen et al., 2017; Markgraf et al., 2010a; Pértile et al., 2016), вулканических почв (Baumgarten, Dörner, Horn, 2013), (полу)гидроморфных почв (Baumgarten et al., 2012; Markgraf, Moreno, Horn, 2012; Stoppe, Horn, 2018) и др. При этом изучению паст и суспензий было посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ, однако число исследований почв с ненарушенной структурой на данный момент относительно невысоко (Хитров, Хайдапова, 2019; Holthusen et al., 2012a; Holthusen et al., 2019; Holthusen, Reeb, Horn, 2012). Внедрение в практику почвенных исследований метода рентгеновской компьютерной томографии расширило знания об архитектуре порового пространства почв (Keller et al., 2013; Peth et al., 2010; Schäffer et al., 2008a). Комплексное применение реометрического метода и компьютерной томографии открывает новые возможности для изучения реологического поведения и структуры порового пространства почв различного генезиса и сложения.

**Цель работы:** исследования реологических свойств дерново-подзолистых почв и черноземов типичных и их взаимосвязей с физическими и химическими свойствами.

**Задачи исследования:**

1. Экспериментально определить и сравнить реологические свойства нарушенных (пастообразных) и ненарушенных (монолитных) образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных различных биоценозов методом амплитудной развертки на реометре MCR-302.

2. Оценить влияние физических и химических свойств на реологические показатели почвенной структуры.

3. Определить структуру порового пространства монолитных образцов почв методом томографической съёмки на рентгеновском

микротомографе SkyScan 1172.

4. Провести сопряженный анализ данных реологических и томографических исследований.

**Научная новизна.** Впервые исследованы реологические характеристики образцов с ненарушенной структурой черноземов типичных Курской области и дерново-подзолистых почв Московской области различных биоценозов методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria)[1], проведено их сравнение с реологическими показателями образцов с нарушенной структурой. Установлены зависимости между реологическими показателями и физико-химическими свойствами почв. Впервые проведено сопряженное определение структуры порового пространства ненарушенных монолитных образцов черноземов типичных и дерново-подзолистых почв на микротомографе SkyScan 1172 (Bruker, Belgium)[2] и реологических характеристик на реометре MCR-302. Выявлены зависимости между реологическими и томографическими показателями (пористостью).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Реометрический метод является обоснованным и оперативным подходом к изучению почвенной микроструктуры. Полученные в работе результаты могут быть использованы при комплексном изучении почвенной структуры, влияния на реологические параметры физико-химических, биологических, антропогенных факторов, в том числе переуплотнения при воздействии сельскохозяйственной техники; при прогнозе устойчивости почв к механическим воздействиям.

**Методология исследования.** Основой диссертационного исследования является системный подход (анализ) (Белицина, Василевская, Гришина, 1988; Воронин, 1984; Воронин, 1986; Качинский, 1965; Шеин, 2005). В исследовании использовались лабораторные и полевые методы: профильный, морфологический, метод почвенных монолитов, комплекс физических, физико-

---

[1]Работа выполнена на оборудовании, приобретенном по Программе развития МГУ.

[2]Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

химических, химических аналитических методов, статистический.

**Защищаемые положения:**

1. Профильные различия реологического поведения дерново-подзолистых почв и черноземов типичных более выражены в почвах естественной структуры по сравнению с нарушенной: монолиты имеют более прочные структурные связи в диапазоне линейного вязкоупругого поведения и показывают меньший диапазон пластичного поведения по сравнению с пастами.
2. Реологические параметры черноземов типичных и дерново-подзолистых почв: диапазон линейной вязкоупругости, модуль накопления в данном диапазоне, область пластичных деформаций – определяются содержанием органического вещества, карбонатов и гранулометрическим составом почв.
3. Для почв ненарушенного сложения установлены достоверные зависимости между реометрическими параметрами и томографическими характеристиками структуры порового пространства.

**Личный вклад автора** состоит в анализе научной литературы по теме исследования, в организации и проведении лабораторных и полевых работ, в обобщении и интерпретации полученных результатов, статистической обработке экспериментальных данных, представлении результатов исследования на научных конференциях и отчетах кафедры, подготовке публикаций в журналах и настоящей рукописи.

**Степень достоверности и апробация работы.** Исследования проведены на современном оборудовании методами, доказавшими свою применимость в почвенных исследованиях. Полученные экспериментальные данные обработаны общепринятыми статистическими методами в программах STATISTICA и Microsoft Excel при уровне значимости $\alpha$=0.05, выводы достоверны. Основные положения и результаты исследования были изложены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, включая "Soil Science in international year of soils 2015" (Сочи, 2015), «Современные методы исследований почв и почвенного покрова» (Москва, 2015),VII съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016), «Почвоведение: горизонты будущего» (Москва, 2017, 2018, 2019),XX

Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2017),«Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем» (Москва, 2017), «Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование» (Москва, 2017), «Ломоносов» (Москва 2018), "Biosystems Engineering 2018" (Тарту, Эстония, 2018), "Environment and Soil Resources Conservation" (Алматы, Казахстан, 2018), «Практическая микротомография – 2018» (Москва, 2018) и на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ (2015-2019 г.г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 статей в журналах из списка RSCI и Scopus, 12 публикаций в сборниках материалов конференций и тезисов докладов.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Д.Д. Хайдаповой, к.б.н., доценту кафедры физики и мелиорации почв, за помощь, поддержку и консультации на всех этапах выполнения работы; сотрудникам кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения за обсуждение работы на заседаниях кафедры. Личную благодарность автор выражает сотрудникам Почвенного института имени В.В. Докучаева: д.с.-х.н., зав. лабораторией физики и гидрологии почв Скворцовой Е.Б., с.н.с. Юдиной А.В., м.н.с. Фомину Д.С., н.с. Абросимову К.Н.; сотрудникам кафедры физики и мелиорации почв: зав.кафедрой Умаровой А.Б., проф. Шеину Е.В., с.н.с. Тюгай З.Н., с.н.с. Садовниковой Н.Б.; м.н.с. ИФА им. А.М. Обухова Кривенок Л.А. за помощь и советы на разных этапах работы.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ (обзор литературы)

В данной главе рассмотрены основные современные подходы к определению термина почвенной структуры (Воронин, 1984; Воронин, 1986; Розанов, 2004; Сергеев, 1971; Трофимов и др., 2005; Шеин, 2005), виды определяющих структуру почвы контактных взаимодействий (Осипов и др, 1989; Трофимов и др., 2005, и т.д.) и структурных связей (Вялов, 1978; Зубкова, Карпачевский, 2001; Сергеев, 1971; Трофимов, 2005; Santamarina, 2001). Описаны различные подходы в оценке прочности почвенной структуры. Проанализированы основные агрегирующие и диспергирующие

вещества в почвах. Рассмотрен реологический подход в изучении структуры почвы: история применения метода в отечественном почвоведении (Абрукова, 1970; Воларович, Лазовская, 1966; Горькова, 1965; Горькова, 1966; Горькова, 1980; Ребиндер, 1966; Абрукова, Манучаров, 1985; Манучаров, Абрукова, 1983; Манучаров, 1985; и т.д.). Современный этап развития реологического подхода на примере реометрии в отечественной и зарубежной науке, а также влияние физических и химических факторов на реологическое поведение почв (Хайдапова и др., 2014; Хайдапова и др., 2016; Хитров, Хайдапова, 2019; Холопов, 2018б; Baumgarten et al., 2012; Holthusen et al., 2012 а,б; Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Markgraf et al., 2006; Markgraf, Horn, 2006 а,б; Markgraf et al., 2012; Pértile et al., 2018; Stoppe, Horn, 2018 и др). Обозначены преимущества современного неинвазивного метода рентгеновской компьютерной микротомографии для анализа порового пространства почвы (Keller et al., 2013 и др.). Обзор литературы показывает широкие возможности подробного изучения реологического поведения и структуры порового пространства почв различного генезиса и сложения современными методами осцилляционной амплитудной развертки и компьютерной томографии. Однако комплексный анализ и сравнение вязкоупругого поведения почвы нарушенной и естественной структуры с применением томографических показателей остается актуальной темой исследований.

# ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 2.1. Объекты исследования

Объектами исследования послужили дерново-подзолистая почва под лесным массивом[1] – сложным ельником (пос. Ельдигино) и пахотная дерново–подзолистая почва[2] (опытное поле Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева) в Пушкинском районе Московской области; а также черноземы типичные под дубравой[3] на территории Центрально-черноземного природного биосферного заповедника им. В.А. Алехина, на пахотном поле[4] Курского НИИ АПП и в прилегающей к пахотному полю лесополосе[5] в Курском районе Курской области. Были исследованы образцы естественного (монолитные) и нарушенного (пастообразные) сложения горизонтов изучаемых профилей (Таблица 1).

Таблица 1. Полные названия почв.

| Номер | Названия почв, координаты разрезов |
|---|---|
| 1 | Дерново-неглубокоподзолистая тяжелосуглинистая на покровном суглинке (классификация 1977 г.), мелкая дерново-неглубокоподзолистая тяжелосуглинистая на покровном суглинке (классификация 2004 г.), Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic) по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.). N 56.098272°; E 37.821603° |
| 2 | Дерново-слабоподзолистая среднепахотная тяжелосуглинистая на покровном суглинке освоенная (классификация 1977г.), агродерново-слабоподзолистая тяжелосуглинистая на покровном суглинке (классификация 2004 г.), Albic Glossic Retisols (Lomic, Aric, Cutanic) по классификации WRB 2014 г. (версия 2015г.)<br>N 56.133261° E 37.802355° |
| 3,5 | Чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке (классификация 1977г.),чернозем миграционно-мицеллярный мощный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке (классификация 2004 г.), Haplic Chernozem (Loamic, Pachic) по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.)<br>N 51.621370° E 36.257558°(лесополоса) |
| 4 | Чернозем типичный мощный среднепахотный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке освоенный (классификация 1977г.), агрочернозем миграционно-мицеллярный мощный среднепахотный тяжелосуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке (классификация 2004 г.), Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic) по классификации WRB 2014 г. (версия 2015 г.) N 51.621370° E 36.257558° |

(Егоров и др, 1977; Герасимова, Красильников, 2017; Шишов и др., 2004).

## 2.2. Методы исследования

### 2.2.1. Методы определения основных физических и химических свойств почвы

Гранулометрический состав почвенных образцов определялся методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22 (Fritsch, Германия) с предварительной ультразвуковой диспергацией почвенной суспензии в течение 5 минут. Определение содержания общего, органического и карбонатного углерода* (*-в черноземных образцах) проводилось с помощью экспресс-анализатора АН-7529 («Измеритель», г. Гомель, Беларусь) методом сухого сжигания в потоке кислорода. Анализ влажности почвенных паст и монолитов при изучении почвы методом амплитудной развертки проводился с помощью анализатора влажности MX-50 (Япония) (Шеин, 2017). pH водной и солевой вытяжек (ГОСТ 26423-85 и ГОСТ 26483-85), обменная кислотность (ГОСТ 26484-85), содержание кальция и магния (Хитров, Понизовский, 1990), железо по Тамму и Мера-

Джексону (Теория и практика химического анализа почв, 2006) были получены в исследовательском лабораторном центре Почвенного института имени В.В. Докучаева.

### 2.2.2. Метод компьютерной томографии в изучении порового пространства и структуры почвы

Томографические исследования структуры монолитных образцов дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного проведены в Почвенном институте им. В.В. Докучаева на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172 при энергии рентгеновской трубки 70 кэВ и разрешении съемки 16 мкм на пиксел. Обработка томографических данных (теневых проекций) и получение томографических срезов (реконструкция) осуществлено на фирменном программном обеспечении NRecon (Bruker, SkyScan) (SkyScan NRecon User Manual, 2016)), (Диссертация: Глава 2.2.2, стр.59).

### 2.2.3 Метод амплитудной развертки в исследовании реологических свойств почвы

Реологические параметры определяли методом амплитудной развертки с измерительной системой параллельных плато диаметром 25 мм (PP-25) на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия). Технические параметры проведения испытаний: программа Start Rheoplus: режим Amplitude Sweep Test, количество точек измерения - 30, длительность измерения одной точки - 15 сек., угловая частота измерения - 0,5 Гц, диапазон деформации (напряжения) $\gamma$ от 0,001 до 100% lg (по Markgraf, 2006), контроль нормальной силы NF (силы воздействия верхнего плато) <15 Н для монолитных образцов и <5 Н для пастообразных образцов, постоянная температура 20°С обеспечивалось элементами Пельтье. Для почвенных образцов были измерены и проанализированы реологические параметры: диапазон линейной вязкоупругости (linear viscoelastic range – LVE-range), или область упругих деформаций, определяющаяся двумя показателями - деформацией ($\gamma_L$) и значением модуля накопления ($G`_L$), характеризующим жесткость межчастичных связей в образце, а также значение деформации $\gamma_F$ в точке Crossover – пересечении кривых модулей накопления G` и потерь G``. До точки Crossover почва показывает необратимое

деформационное поведение (пластичное поведение), после – поведение почвы переходит из вязкоупругого в вязкое. Реологические исследования почвенных образцов делились на *два блока. Блок №1.* Исследование и сравнение реологических показателей образцов с естественной структурой (монолитов) и с нарушенной структурой (пастообразных) дерново-подзолистых почв и черноземов типичных. Повторность измерения трехкратная для паст и четырех-семикратная – для монолитов. *Блок №2.* Исследование монолитных образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных после проведения томографической съёмки: изучение взаимосвязей между реологическими характеристиками и значениями томографической пористости. После проведения всех этапов томографической съёмки были изучены реологические показатели почв (аналогично блоку №1). Повторность измерения одно-четырехкратная (Диссертация: Глава 2.2.3, стр. 66-68).

# ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ[3]

## 3.1. Основные физические и химические свойства почв

По классификации Качинского изучаемые дерново-подзолистые почвы относятся к тяжелосуглинистым крупнопылеватым,текстурный класс по классификации USDA – silt. Черноземы типичные по классификации Качинского – тяжелые суглинки крупнопылеватые,

[3] В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в статьях:

1. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., **Клюева 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., Абросимов К.Н., Юдина А.В., **Клюева 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. – Том 91. – С.6-20.
3. Хайдапова Д.Д., **Клюева В.В.,** Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н. Характеристики реологических свойств и томографически определенного порового пространства ненарушенных образцов чернозема типичного и дерново-подзолистых почв // Почвоведение. –2018. – №10. – С. 1234-1243.
4. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д. Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2017. – Том 89. – С. 21-35.
5. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., **Клюева В.В.,** Юдина А.В. Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2016. – № 11. – С.1328-1336.
6. Khaydapova D., **Klyueva V.,** Kholopov Yu., Chestnova V. The rheological approach in an assessment of interparticle interactions in soils // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 201. – No. 11. – Pp 1-4.

текстурный класс по классификации USDA – silt loam. (Таблицы 2 и 3). Для чернозёма типичного содержание органического вещества находилось по разнице между содержанием общего и карбонатного углерода. (Таблица 3). Для черноземов типичных наибольшее содержание органического углерода в гумусовом горизонте наблюдалось в лесополосе, минимальное – на пашне. Значимые содержания карбонатного углерода во всех трех вариантах отмечались, начиная с горизонта Bca. Содержание общего углерода в изучаемых дерново-подзолистых почвах резко дифференцированно по профилю, наблюдается максимум в гумусовых горизонтах. Черноземы типичные обладают характерными признаками: неглубоким вымыванием карбонатов, отсутствием элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля по железу, содержание магния в несколько раз меньше содержания кальция, реакция почвенного раствора близка к нейтральной. Для дерново-подзолистых почв характерна четко выраженная дифференциация профиля на элювиальную и иллювиальную части: обеднение элювиальной части профиля полуторными оксидами и их накопление в иллювиальном горизонте; высокая кислотность. Близкие к нейтральным значения кислотности для пахотной почвы можно объяснить остаточным содержанием кальция (известкование почвы) (Таблица 2).

## 3.2. Реологические свойства изучаемых почв

### 3.2.1. Методические особенности определения реологических параметров поведения почвенных паст и монолитов методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302.

Целью данного этапа исследования было изучение и сравнение реологического поведения образцов с ненарушенной и искусственно созданной структурой. В исследовании величина зазора жестко не фиксировалась, был задан предел воздействия верхнего плато – нормальной силы (Диссертация: Глава 3.2.1, стр.75-76) в начале теста: <15 Н для монолитных образцов и <5 Н для пастообразных, что обеспечивало максимально плотный контакт измерительных плато с образцами при их минимальной деформации. Применение <15 Н

Таблица 2. Физические и химические свойства дерново-подзолистой и дерново-подзолистой пахотной почвы.

| Вариант, горизонт, глубина, см | Гранулометрический состав | | | | | | | С общ., % | Гигроскопическая влажность, % | pH водн. | pH сол. | Обмен. кисл.-ть, ммоль/100г | $Ca^{2+}$, мг-экв/100г | $Mg^{2+}$, мг-экв/100г | $Fe_2O_3$*, % | $Fe_2O_3$**, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Содержание фракции с размером частиц менее мм,% | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <0.001 | 0.001 - 0.002 | 0.002 - 0.005 | 0.005 - 0.01 | 0.01 - 0.05 | 0.05 - 0.25 | физ. глина, % | | | | | | | | | |
| **ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A1 (4-15) | 1,63 | 6,15 | 17,85 | 16,06 | 55,84 | 2,47 | 41,69 | 2,43 | 1,41 | 5,23 | 3,96 | 0,99 | 4,11 | 0,42 | 0,45 | 0,87 |
| A2 (15-28) | 1,42 | 4,79 | 13,61 | 14,56 | 62,60 | 3,02 | 34,38 | 0,31 | 0,53 | 5,44 | 4,07 | 0,90 | 1,66 | 0,02 | 0,46 | 0,56 |
| A2B (28-35) | 5,54 | 6,60 | 15,10 | 14,49 | 56,46 | 1,81 | 41,72 | 0,18 | 1,94 | 5,11 | 3,53 | 5,64 | 5,98 | 1,90 | 0,42 | 1,85 |
| B1 (35-70) | 6,23 | 8,85 | 17,53 | 13,89 | 51,84 | 1,66 | 46,50 | 0,13 | 2,14 | 5,16 | 3,45 | 4,63 | 7,40 | 2,53 | 0,36 | 1,59 |
| B2 (70-100) | 6,97 | 10,54 | 20,07 | 15,04 | 45,97 | 1,41 | 52,62 | 0,12 | 3,22 | 5,09 | 3,42 | 4,86 | 8,84 | 2,89 | 0,34 | 1,60 |
| **ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПАХОТНАЯ** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ap1 (0-26) | 3,27 | 7,44 | 15,29 | 14,18 | 56,83 | 2,99 | 40,18 | 1,46 | 1,20 | 7,52 | - | - | 19,51 | 9,13 | 0,31 | 0,85 |
| Ap2 (26-30) | 3,39 | 7,07 | 14,95 | 14,30 | 57,01 | 3,27 | 39,71 | 1,19 | 1,22 | 7,69 | - | - | 24,12 | 12,15 | 0,36 | 0,77 |
| A2B (30-65) | 5,41 | 7,00 | 14,47 | 13,77 | 57,37 | 1,99 | 40,65 | 0,27 | 2,13 | 7,41 | - | - | 28,80 | 3,43 | 0,31 | 1,58 |
| B1 (65-85) | 6,50 | 8,49 | 16,10 | 13,98 | 53,34 | 1,58 | 45,08 | 0,23 | 2,46 | 6,50 | 4,46 | 0,12 | 17,71 | 4,57 | 0,27 | 1,69 |
| B2 (85-115) | 7,28 | 10,30 | 17,53 | 13,70 | 50,15 | 1,04 | 48,81 | 0,22 | 2,57 | 5,92 | 4,10 | 0,44 | 8,79 | 2,55 | 0,36 | 1,53 |
| BC (115-160) | 7,27 | 10,17 | 16,98 | 13,84 | 50,67 | 1,06 | 48,27 | 0,19 | 2,66 | 6,03 | 3,92 | 0,58 | 17,22 | 5,00 | 0,35 | 1,61 |

Примечания: * - Содержание железа по Тамму, ** - Содержание железа по Мера-Джексону

Таблица 3. Физические и химические свойства черноземов типичных под лесополосой и дубравой, пахотного чернозема типичного

| Вариант, горизонт, глубина, см | Гранулометрический состав | | | | | | | С общ., % | С карб., % | С орг., % | Гигроскопическая влажность, % | pH вод. | $Ca^{2+}$, мг-экв/100г | $Mg^{2+}$, мг-экв/100г | $Fe_2O_3$*, % | $Fe_2O_3$**, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Содержание фракции с размером частиц менее мм,% | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <0.001 | 0.001 - 0.002 | 0.002 - 0.005 | 0.005 - 0.01 | 0.01 - 0.05 | 0.05 - 0.25 | физ.глина, % | | | | | | | | | |
| **ПАХОТНЫЙ ЧЕРНОЗЕМ ТИПИЧНЫЙ** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ap1 (0-20) | 5,77 | 13,36 | 24,77 | 14,17 | 41,24 | 0,70 | 58,06 | 2,65 | 0,10 | 2,55 | 2,75 | 7,83 | 55,56 | 3,15 | 0,18 | 0,98 |
| Ap2 (20-30) | 6,12 | 12,27 | 21,71 | 12,85 | 45,39 | 1,67 | 52,94 | 2,99 | 0,01 | 2,98 | 2,83 | 6,99 | 39,79 | 2,62 | 0,16 | 0,97 |
| A1 (30-60) | 4,39 | 11,18 | 23,52 | 15,55 | 44,65 | 0,72 | 54,64 | 2,88 | 0,00 | 2,88 | 2,81 | 6,86 | 25,71 | 2,14 | 0,20 | 0,92 |
| A1B (60-97) | 5,87 | 9,88 | 19,40 | 13,57 | 50,47 | 0,82 | 48,72 | 1,90 | 0,01 | 1,89 | 2,42 | 6,99 | 22,65 | 1,89 | 0,10 | 0,96 |
| Bca (97-120) | 5,88 | 9,01 | 18,36 | 13,71 | 51,93 | 1,10 | 46,97 | 1,62 | 0,92 | 0,70 | 2,21 | 8,45 | 120,47 | 3,31 | 0,03 | 0,99 |
| **ЧЕРНОЗЕМ ТИПИЧНЫЙ ПОД ДУБРАВОЙ** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A1 (0-50) | 4,53 | 11,09 | 23,06 | 15,26 | 45,08 | 0,98 | 53,93 | 3,30 | 0,01 | 3,29 | 2,85 | 6,75 | 26,99 | 2,43 | 0,15 | 1,09 |
| A1B (50-95) | 5,24 | 9,23 | 18,69 | 13,72 | 51,88 | 1,25 | 46,87 | 1,40 | 0,02 | 1,38 | 2,25 | 7,51 | 36,33 | 1,44 | 0,17 | 0,93 |
| Bca (95-170) | 6,30 | 9,79 | 19,62 | 14,18 | 48,57 | 1,47 | 49,90 | 2,23 | 1,85 | 0,38 | 2,11 | 8,49 | 176,11 | 5,52 | 0,11 | 0,87 |
| **ЧЕРНОЗЕМ ТИПИЧНЫЙ ПОД ЛЕСОПОЛОСОЙ** | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A1` (0-20) | 5,04 | 11,86 | 23,60 | 14,60 | 43,61 | 1,28 | 55,11 | 3,86 | 0,00 | 3,86 | 2,99 | 7,01 | 24,14 | 3,03 | 0,18 | 1,13 |
| A1`` (20-60) | 4,69 | 11,45 | 23,11 | 14,79 | 44,60 | 1,37 | 54,03 | 3,32 | 0,01 | 3,31 | 2,88 | 6,96 | 23,64 | 2,19 | 0,17 | 0,97 |
| A1B` (60-80) | 5,41 | 10,68 | 20,87 | 13,99 | 47,60 | 1,46 | 50,94 | 2,11 | 0,00 | 2,11 | 2,61 | 6,85 | 21,32 | 1,80 | 0,17 | 1,13 |
| A1B`` (80-110) | 5,51 | 9,90 | 19,61 | 13,88 | 50,62 | 0,48 | 48,90 | 1,54 | 0,01 | 1,53 | 2,45 | 7,29 | 20,42 | 1,57 | 0,20 | 1,39 |
| Bca (110-140) | 6,00 | 9,80 | 19,61 | 14,38 | 48,44 | 1,77 | 49,79 | 2,41 | 1,51 | 0,90 | 2,10 | 8,24 | 153,78 | 3,60 | 0,11 | 0,88 |
| BCca (140-180) | 6,24 | 9,35 | 18,41 | 13,82 | 50,55 | 1,62 | 47,82 | 2,57 | 2,10 | 0,47 | 2,01 | 8,32 | 171,39 | 5,56 | 0,11 | 0,92 |

Примечания: * - Содержание железа по Тамму, ** - Содержание железа по Мера-Джексону

случае монолитов обусловлено их большей толщиной (ограничения при вырезании) при подготовке к осцилляционному амплитудному тесту.

### 3.2.2. Реологические свойства образцов естественной и нарушенной структуры черноземов типичных и дерново-подзолистых почв

*Деформация $\gamma_L$, определяющая диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range).* Значение деформации $\gamma_L$, соответствующей диапазону упругих деформаций монолитов, в большинстве случаев значимо превышает таковой паст (Рисунок 1а), это говорит о том, что в данных условиях опыта они обладают большей устойчивостью к нагрузкам. Для монолитов дерново-подзолистых почв наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация значений деформации $\gamma_L$ по профилю, в пахотном варианте различия между горизонтами менее заметны. Для монолитов и паст черноземов типичных величина показателя $\gamma_L$ в целом несколько больше такого у дерново-подзолистых почв. Для монолитов черноземов типичных под дубравой и лесополосой наблюдается уменьшение величины $\gamma_L$ вниз по профилям с максимумами в гумусовых горизонтах, в пахотном варианте различия между горизонтами менее заметны. Оценка различий средних в пастах не выявила значимых отличий между горизонтами в рядах дерново-подзолистых почв и черноземов типичных при выбранном уровне значимости тестами Тьюки и Фишера НЗР. Возможно, это связано с гомогенизацией почвенной массы при подготовке почвенных паст, а также с высокими значениями влажности, при которых проводился анализ, что привело к нечеткой выраженности различий между горизонтами. Распределения величины $\gamma_L$ в монолитах дерново-подзолистых почв и черноземов типичных объясняются содержаниями общего (органического) углерода и физической глины: максимальные значения показателя наблюдаются в гумусовых горизонтах обеих почв и иллювиальном горизонте B2 дерново-подзолистой почвы под ельником. Органическое вещество повышает устойчивость почвы путем усиления когезии и увеличении числа менисков в ненасыщенных условиях. Тонкие фракции в основном отвечают за связи между частицами, что проявляется в увеличении значений деформации диапазона линейной вязкоупругости.

*Модуль накопления $G`_L$ диапазона LVE-range* монолитов значимо больше такового у паст, что говорит о большей «жесткости» их структуры (межчастичных связей) при условиях опыта (Рисунок 1б). Модуль накопления монолитов больше такого паст для дерново-подзолистых почв в 2-7 раз, для черноземов типичных – в 3-7 раз. Большая плотность монолитов и меньшая влажность (Таблица 4) способствуют увеличению числа контактов между частицами и, как следствие, увеличению значений показателя. Также больший предел нормальной силы, примененный для монолитных образцов, мог стать причиной увеличений значений $G`_L$ по сравнению с пастами. В монолитах дерново-подзолистых почв минимум $G`_L$ наблюдается для гумусовых горизонтов, при этом в пахотной почве значения показателя постепенно увеличиваются с глубиной, а в почве под ельником – в элювиальном горизонте наблюдается максимум значений, с последующим уменьшением в нижележащих горизонтах. Выявлено, что значимо отличаются пасты гор. Ар1 пашни, а также гор. В1 пашни от гор. А1 лесного профиля. Изменение величины $G`_L$ в горизонтах изученных профилей дерново-подзолистых почв закономерно комплексу их свойств: при большем содержании органического вещества и физической глины в процессе увлажнения поглощается большее количество воды (Таблица 4), что препятствует образованию близких межчастичных контактов между частицами; а чем выше значения плотности образца и содержание железа, тем больше количество межчастичных связей и их жесткость. Для монолитов черноземов типичных значения модуля накопления значимо ниже такового для дерново-подзолистых почв, что, вероятно связано с большим содержанием органического вещества и большей влажностью. Сходные тенденции наблюдаются при сравнении паст обеих почв: были выявлены значимые отличия между горизонтом А2 дерново-подзолистой почвы под ельником и большинством горизонтов трех профилей черноземов типичных. Значения показателя в монолитах черноземов типичных увеличиваются с глубиной. Органическое вещество, содержащееся в большем количестве в гумусовых горизонтах чернозема, препятствует образованию прочных контактов между частицами при набухании, карбонаты кальция же, присутствующие в нижних горизонтах, служат цементирующим агентом для образования жестких связей. Была

выявлена значимая разница между пастами гор. ВСса чернозема типичного под лесополосой и гор.Ар2 пахотного чернозема типичного**.**

*Деформации $\gamma_F$ в точке пересечения модулей накопления и потерь* (точке разрушения структуры, Crossover) паст в большинстве случаев превышает значения показателя для монолитов (Рисунок 1в), кроме гор. А1 дерново-подзолистой почвы под ельником и гор. А1` чернозема типичного лесополосы. Монолитные образцы, имея более жесткие структурные связи в диапазоне линейного вязкоупругого поведения, разрушаются при меньших значениях деформации, показывая более хрупкое поведение по сравнению с пастами, характеризующимися большей влажностью и большим диапазоном пластичного поведения. Максимум $\gamma_F$ в монолитах дерново-подзолистых почв характерен для гумусового горизонта почвы под ельником. Величина показателя уменьшается в нижних горизонтах, при этом наименьшее значение наблюдается в элювиальном горизонте. В дерново-подзолистой пахотной почве различия между горизонтами сглажены благодаря меньшему содержанию органического вещества в гумусовом горизонте и невыраженностью элювиального горизонта. Горизонты с небольшим содержанием углерода имеют более жесткие межчастичные контакты и, как следствие, меньшую область пластичного поведения. Горизонты с большим содержанием органического вещества больше набухают, а оно само выступает в качестве смазки, позволяя частицам свободнее двигаться относительно друг друга. Значимое увеличение показателя наблюдалось в пастах горизонтов Ар2,А2В,В1 пашни по сравнению с горизонтом А2 почвы под лесом. Максимальная величина деформации, при которой происходит разрушение структуры монолитов черноземов типичных, наблюдается в горизонте с максимальным содержанием органического вещества: гумусовом горизонте лесополосы. Значения показателя в этом профиле далее по глубине снижаются, практически не отличаясь для нижележащих горизонтов. В профилях чернозема типичного под дубравой и пахотного варианта разница значений показателя между горизонта выражена слабее, чем в варианте чернозема под лесополосой, также наблюдаются максимумы для гумусовых горизонтов: А1 в варианте чернозёма типичного под дубравой и Ар2 пахотного чернозема

типичного. Такие распределения значений деформации $\gamma_F$ в точке Crossover по профилям черноземов типичных определяются их свойствами: чем больше органического вещества и физической глины, тем больше почва может подвергаться деформации без перехода в область вязкого течения. Были выявлены значимые отличия в пастах черноземов типичных: увеличение значение в гор.А1 почвы под дубравой по сравнению с гор.Ар2 пашни.

*Анализ изученных реологических показателей и их сравнение* позволяет сказать, что монолитные образцы, имея более прочные структурные связи в диапазоне линейного вязкоупругого поведения, разрушаются при меньших значениях деформации, показывая более хрупкое поведение по сравнению с пастами, характеризующимися большей влажностью и большим диапазоном пластичного поведения, в котором упругое поведение преобладает над вязким.

*Кластерный и корреляционный анализ*. Для количественного подтверждения наличия и степени взаимосвязей между полученными значениями реологических показателей монолитов почв и их физических и химических свойств были использованы кластерный анализ (матрица расстояний получена с помощью расчета Евклидового расстояния, правило объединения с минимизацией дисперсий по методу Уорда) и корреляционный анализы. Анализ полученных дендрограмм, соответствующих матриц эвклидовых расстояний и расчёт коэффициентов корреляции r Пирсона (значимых при $\alpha$=0.05), позволяет сделать следующие заключения: 1. Дерново-подзолистые почвы (n=10). Изменение значений деформации $\gamma_L$ и $G`_L$ диапазона линейного вязкоупругого поведения и деформации $\gamma_F$ в точке Crossover наиболее тесно связаны с одинаковыми факторами: со значениями влажности и содержанием общего углерода: (r ($\gamma_L$/$C_{общ}$)= +0.7, r ($\gamma_L$/W)= +0.8, r ($G`_L$/$C_{общ}$)= –0.8, r ($G`_L$/W)= –0.8, r ($\gamma_F$/$C_{общ}$)= +0.8, r ($\gamma_F$/$C_{общ}$)=+0.9, сила связи высокая положительная и высокая отрицательная). 2. Черноземы типичные (n=13). Изменение значений деформации $\gamma_L$ диапазона линейного вязкоупругого поведения и деформации $\gamma_F$ в точке Crossover наиболее тесно связаны с одинаковыми факторами: содержанием органического углерода и физической глины (r ($\gamma_L$/$C_{орг}$)= +0.8, r($\gamma_L$/ФГ)= +0.6, r ($\gamma_F$/$C_{орг}$)= +0.6, сила связи высокая и средняя положительная). Изменение значений $G`_L$ диапазона линейного вязкоупругого поведения наиболее тесно

связаны с содержанием карбонатного углерода и кальция (карбоната кальция): r ($G`_L$/Ca)= +0.7, r ($G`_L$/Скарб)= +0.7,сила связи высокая положительная.

## 3.3. Сопряженный анализ реологических свойств и томографической пористости почв

### 3.3.1.Томографический анализ микромонолитов

Наибольшие значения общей и открытой пористости присущи гумусовым горизонтам дерново-подзолистых почв и черноземов типичных, при этом в вариантах целинных почв значения пористостей больше, чем в пахотных (Таблица 4). Значения общей и открытой пористости в гумусовых горизонтах распределяются следующим образом: дубрава > лесополоса > пашня в случае черноземов типичных и почва под сложным ельником > пахотная почва в случае дерново-подзолистых почв (Рисунок 2). В дерново-подзолистой почве минимальные значения отмечены для горизонта А2. В дерново-подзолистой пахотной почве общая и открытая пористость плавно снижаются по глубине. Для чернозема типичного под лесополосой нет четкого распределения общей и открытой пористости, однако можно сказать, что в верхних гумусовых горизонтах они выше, чем в переходных и иллювиальных. В черноземе типичном под дубовым лесом значения показателей снижаются по глубине. Распределение закрытой пористости по глубине не имеет четкого распределения для изучаемых почв, в целом значения закрытой пористости изменяются от 1 до 3% от объема образца. Величины закрытой пористости почв меньше открытой пористости в 2–13 раз. Сравнение величин пористостей позволяет сделать вывод, что значения общей пористости, полученные при помощи томографической съёмки и не превышающие 21%, значительно уступают расчетным величинам.

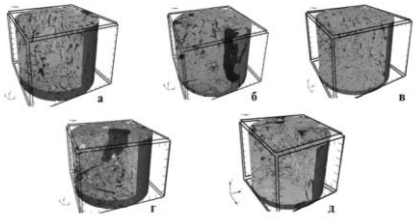


Рисунок 2. Объёмные изображения внутренней структуры и порового пространства гумусовых горизонтов черноземов типичных: а–под дубравой, б–под лесополосой, в–пахотного; дерново-подзолистых почв: г–под сложным ельником. д–пахотной.

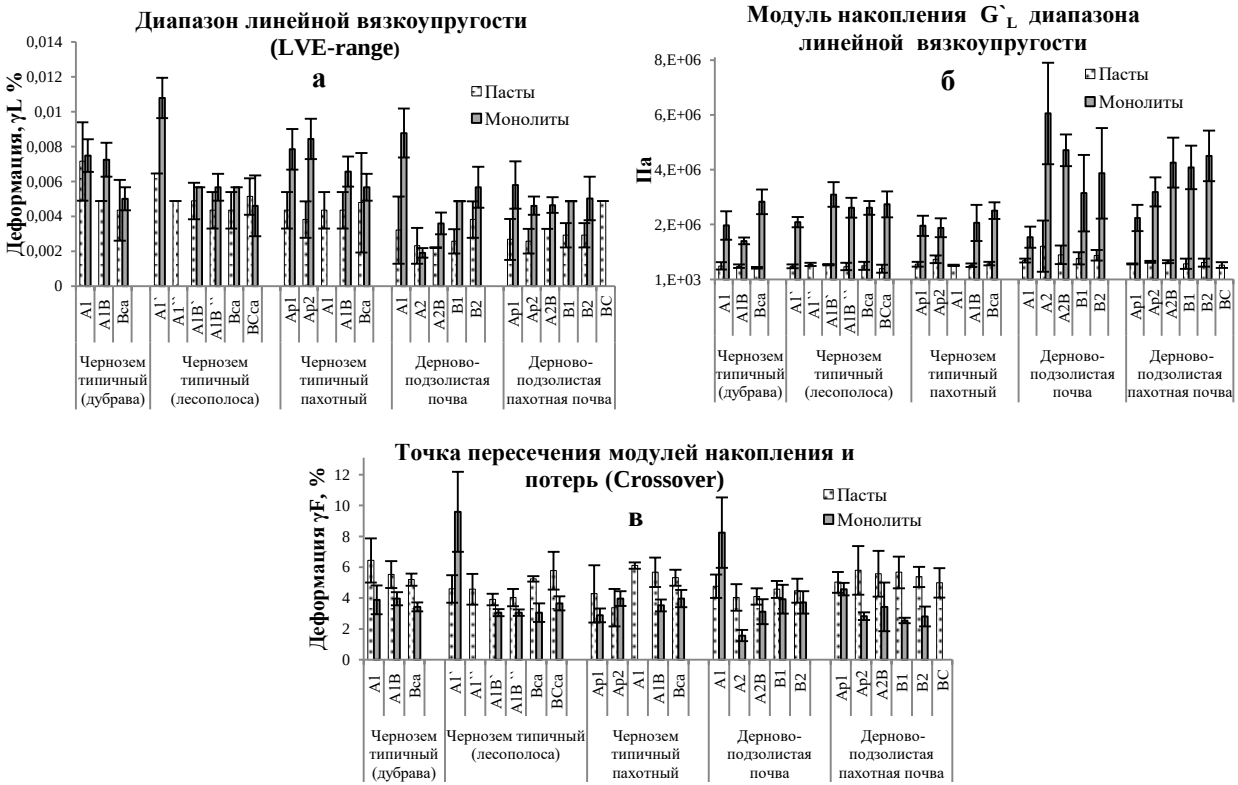


Рисунок 1. Деформация $\gamma_L$ (а) и модуль накопления $G`_L$ (б) диапазона линейной вязкоупругости, деформация $\gamma_F$ (в) в точке Crossover монолитных и пастообразных образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных.

Таблица 4. Плотность, влажность, пористость почвенных паст и монолитов

| Почва, горизонт | | Плотность почвы, г/см3 | | Влажность во время реол.измерений, % | | | Томографическая пористость****,% | | | Расчетная пористость % ε = 1 – ρb/ρs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Паста | Монолит* | Паста | Монолит 1** | Монолит 2*** | Открытая | Закрытая | Общая | |
| ***Дерново-подзолистые почвы*** | | | | | | | | | | |
| Дерново-подзолистая почва под сложным ельником | A1 | 0,74 | 0,55 | 64,17 | 51,63 | 55,93 | 19,05 | 2,51 | 21,56 | 79 |
| | A2 | 1,02 | 1,36 | 37,95 | 26,39 | 23,13 | 2,03 | 1,87 | 3,9 | 48 |
| | A2B | 1,13 | 1,44 | 49,20 | 24,02 | 16,12 | 7,7 | 1,34 | 9,05 | 45 |
| | B1 | 1,17 | 1,49 | 48,90 | 22,66 | 23,41 | 3,53 | 2,14 | 5,68 | 45 |
| | B2 | 1,27 | 1,53 | 49,18 | 22,73 | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | 43 |
| Дерново-подзолистая пахотная почва | Ap1 | 0,96 | 1,33 | 51,94 | 31,31 | 39,36 | 5,89 | 1,35 | 7,24 | 49 |
| | Ap2 | 1,01 | нет данных | 51,07 | 27,35 | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных |
| | A2B | 1,15 | 1,57 | 50,52 | 23,53 | 25,06 | 4,41 | 0,88 | 5,29 | 40 |
| | B1 | 1,14 | 1,57 | 56,92 | 33,39 | 25,26 | 2,89 | 1,67 | 4,57 | 40 |
| | B2 | 1,40 | нет данных | 51,62 | 23,97 | 28,29 | 2,19 | 1,67 | 3,85 | 42 |
| | BC | 1,23 | нет данных | 60,53 | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных |
| ***Черноземы типичные*** | | | | | | | | | | |
| Чернозем типичный пахотный | Ap1 | 0,79 | 1,32 | 74,67 | 35,76 | 36.65 | 4,16 | 1,85 | 6,01 | 50 |
| | Ap2 | 0,82 | 1,34 | 68,45 | 30,43 | 33.25 | 6,3 | 1,63 | 7,93 | 49 |
| | A1 | 0,90 | нет данных | 75,49 | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных |
| | A1B | 0,77 | 1,06 | 71,56 | 41,79 | 40.89 | 9,53 | 2,53 | 12,06 | 60 |
| | Bca | 0,80 | нет данных | 76,42 | 43,14 | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных | нет данных |
| Чернозем типичный под дубравой | A1 | 0,78 | 1,09 | 63,48 | 40,45 | 40.14 | 14,15 | 1,05 | 15,2 | 58 |
| | A1B | 0,79 | 1,23 | 72,48 | 43,59 | 43.27 | 2,61 | 1,37 | 3,67 | 53 |
| | Bca | 1,01 | 1,41 | 59,78 | 34,02 | 34.53 | 2,61 | 1,37 | 3,98 | 48 |
| Чернозем типичный под лесополосой | A1` | 0,68 | 1,06 | 80,37 | 44,60 | 42.63 | 9,05 | 1,07 | 10,12 | 59 |
| | A1`` | 0,86 | 1,09 | 80,71 | нет данных | 41.08 | 13,83 | 1,07 | 14,90 | 58 |
| | A1B` | 0,73 | 1,07 | 80,93 | 37,89 | 37.45 | 11,88 | 2,22 | 14,11 | 59 |
| | A1B` | 0,76 | 1,19 | 78,06 | 43,52 | 46.91 | 4,19 | 2,08 | 6,27 | 55 |
| | Bca | 0,81 | 1,15 | 71,74 | 44,08 | 47.83 | 1,29 | 1,89 | 3,18 | 57 |
| | BCca | 0,87 | 1,19 | 72,35 | 42,73 | 42.13 | 2,89 | 3,31 | 6,19 | 56 |

* приведена полевая плотность для дерново-подзолистой почвы, плотность монолитного образца для томографии – для чернозема типичного,
** монолит 1 - монолит первой партии (сравнение реологических показателей паст и монолитов),
*** монолит 2 - микромонолит (проведение томографической съёмки и последующее изучение его реологических показателей)
**** - томографическая пористость микромонолита при разрешении съёмки 16 мкм

### 3.3.2. Реологические свойства микромонолитов

Характер распределения реологических показателей в микромонолитах горизонтов профилей изучаемых почв, повторяют распределения, полученные для монолитов блока 1 и описанные в главе 3.3.1.

### 3.3.3.Сопряженный анализ реологических показателей и томографической пористости микромонолитов

Для микромонолитных образцов корреляционный анализ значений реологических показателей и томографической пористости выявил значимые взаимосвязи (r Пирсона,$\alpha$=0.05): r ($\gamma_L$/общ.п)= +0.7, r ($\gamma_F$/общ.п)= +0.9, r ($\gamma_F$/отк.п)= +0.9 –высокая и средняя положительные связи для дерново-подзолистых почв и r ($G`_L$/ общ.п)= –0.6, r ($G`_L$/ отк.п)= –0.6 черноземов типичных – средние отрицательные связи. Для наших данных были выявлены значимые зависимости между реологическими показателями и содержанием органического вещества (общего углерода) (гл.3.2.2). Органическое вещество оказывает влияние на структурные характеристики почвы и формирует поровое пространство, что подтверждается результатами исследования: горизонты почв с большим содержанием органического углерода и большим объемом пор (расчетной пористостью, открытой и общей пористостью) имеют больший диапазон упругих деформаций (или диапазон LVE–range) и обладают более пластичной структурой (значение деформации $\gamma_F$ в точке пересечения модулей накопления и потерь). В то же время, большое количество органического вещества приводит к уменьшению значений плотности соответствующих монолитов и увеличению влажности, что способствует уменьшению числа контактов между частицами и, как следствие, снижению значений модулей накопления.

## ВЫВОДЫ

1. Монолиты изученных почв по сравнению с пастами обладают большей устойчивостью и жесткостью естественных структурных связей в области небольших деформаций, определяемых диапазоном линейного вязкоупругого поведения и модулем накопления в данном диапазоне. Почвенные пасты проявляют большую пластичность, определяемую величиной деформации в точке пересечения модулей накопления и потерь. Дифференцированность профильного

распределения реологических параметров: диапазон линейной вязкоупругости, модуль накопления в данном диапазоне, точка разрушения структуры при влажности капиллярного насыщения – более выражена в почвенных монолитах по сравнению с пастами, как следствие особенностей их естественной структуры.

2. Органическое вещество и физическая глина определяют реологическое поведение черноземов типичных: с их увеличением их содержания происходит рост диапазонов упругих деформаций и пластичного поведения почв. В нижних горизонтах черноземов типичных карбонаты кальция служат цементирующим агентом для образования жестких межчастичных связей, характеристикой которых является модуль накопления диапазона линейной вязкоупругости.

Главным фактором, влияющим на реологические показатели дерново-подзолистых почв, является органическое вещество, снижающее величину жесткости межчастичных взаимодействий и увеличивающее область пластичных деформаций.

3. Томографическая съемка монолитов исследованных почв показала, что величины закрытой пористости не имеют четкого профильного распределения и значительно меньше открытой пористости. Открытая и общая пористость максимальны в гумусовых горизонтах целинных почв и уменьшаются с глубиной.

4. Сопряженный анализ данных показал значимые зависимости между реологическими свойствами и томографической пористостью монолитных образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных. Почвы с большим содержанием органического вещества и большей пористостью обладают наибольшей устойчивостью к деформациям.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Рецензируемые журналы баз RSCI и Scopus

1. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Юдина А.В., **Клюева 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. DOI:

10.7868/S0032180X18020065 ИФ РИНЦ (2017) 1,777. (Eurasian Soil Science IF 0,667 (2017)).

2. Скворцова Е.Б. Шеин Е.В., Романенко К.А., Абросимов К.Н., Юдина А.В., **Клюева 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. – Том 91. – С.6-20. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-91-6-20 ИФ РИНЦ (2017) 0,612.

3. Хайдапова Д.Д., **Клюева В.В.,** Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н. Характеристики реологических свойств и томографически определенного порового пространства ненарушенных образцов чернозема типичного и дерново-подзолистых почв // Почвоведение. – 2018. – №10. – С. 1234-1243. DOI: 10.1134/S0032180X18100064 ИФ РИНЦ (2017) 1,777. (Eurasian Soil Science IF 0,667 (2017)).

4. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д. Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2017. – Том 89. – С. 21-35. doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35 ИФ РИНЦ (2017) 0,612.

5. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Абросимов К.Н., Романенко К.А., Хохлов С.Ф., Хайдапова Д.Д., **Клюева В.В.,** Юдина А.В. Микротомографический анализ порового пространства целинной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. – 2016. – № 11. – С.1328-1336. DOI: 10.7868/S0032180X16110095 ИФ РИНЦ (2017) 1,777. (Eurasian Soil Science IF 0,667 (2017)).

6. Khaydapova D., **Klyueva V.,** Kholopov Yu., Chestnova V. The rheological approach in an assessment of interparticle interactions in soils // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 201. – No. 11. – Pp 1-4. doi :10.1088/1755-1315/201/1/012005 SJR (Scopus) (2018) 0,170.

**Публикации в прочих научных изданиях**

1. **Клюева В.В.** Изучение реологических свойств и томографически определенного порового пространства дерново-подзолистой почвы //Ломоносов-2018: XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция "Почвоведение", 9-13 апреля 2018г.: Сост.Л.А.Поздняков. – Москва:

МАКС Пресс, 2018. – С.252-253.

2. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б. Методы амплитудой развертки и компьютерной микротомографии в изучении микроструктуры и порового пространства почвы // Материалы Пятой международной конференции "Практическая микротомография", 7-9 ноября 2018. – М.: АПР, 2018. – С. 74-78.

3. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д., Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н. Изучение микроструктуры почвы методами амплитудной развертки и рентгеновской микротомографии // Материалы докладов второй открытой конференции молодых ученых «Почвоведение: горизонты будущего. 2018», 14-16 февраля 2018 г. – М.:ГЕОС, 2018. – С.59-64.

4. **Клюева В.В.** Определение реологических свойств чернозема типичного естественного и нарушенного сложения // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. Тезисы докладов Второй Всероссийской открытой конференции с международным участием. Москва, 28 – 30 ноября 2017 г. – М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2017. – С.66-67.

5. **Клюева В.В.** Реологические свойства дерново-подзолистой почвы естественного сложения// Материалы Международной конференции XX Докучаевские молодежные чтения «Почва и устойчивое развитие государства»/ Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета, 2017. – С.233-234.

6. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д. Изучение структурных характеристик почв методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 // Сборник трудов V конференции молодых ученых "Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем". Москва, 19-20 июня 2017 г. – М.: Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук, 2017. – С. 105-109.

7. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д. Определение реологических свойств дерново-подзолистой почвы методом амплитудной развертки на реометре MCR-302// 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 1/ Отв.ред.: С.А. Шоба, И.Ю. Савин. – Москва - Белгород: Издательский дом «Белгород», 2016. – С.353-354.

8. **Клюева В.В.,** Хайдапова Д.Д. Реологические свойства нарушенных и ненарушенных образцов дерново-подзолистой почвы ельника и залежи в Московской области // Современные методы исследований почв и почвенного покрова. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 9-11 ноября 2015. – М.: Почвенный ин-т им. В.В.Докучаева, 2015. – С. 248-250.

9. Abrosimov K.N., Romanenko K.A., Skvortsova E.B., Shein E.V.,Yudina A.V., **Klyueva V.V.,** Khaidapova D.D., Rogov V.V. The impact of multiple freeze-thaw cycles on the microstructure of aggregates from a soddy-podzolic soil // Abstract book "10th International Soil Science Congress on "Environment and Soil Resources Conservation", 17-19 October 2018. – Almaty: U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry of Kazakhstan, 2018. – Pp. 42-42.

10. Khaidapova D., Khitrov N., **Klueva V.** Rheological properties of undisturbed samples of Typical Chernozem (Kursk region, Russia) and Vertic Solonetz (Voronezh region, Russia) // Abstract book "10th International Soil Science Congress on "Environment and Soil Resources Conservation", 17-19 October 2018. – Almaty: U.U. Uspanov Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry of Kazakhstan, 2018. – Pp. 144-144.

11. Khaidapova D., **Klyueva V.,** Khitrov N. The rheological properties of undisturbed samples of Typical Chernozem and Vertic Solonetz // Book of abstracts of 9th International Conference Biosystems Engineering 2018, 9-11 May, 2018. – Tartu: Estonian University of Life Sciences. 2018. – Pp.33-33.

12. **Klyueva V.**, Khaydapova D. Rheological properties of disturbed and undisturbed samples of soddy-podsolic soils // The proceedings of the International Congress on «Soil Science in International year of soils». 19-23 October, 2015.Sochi,Russia. – М.: Буки Веди, 2015. – С. 220-223.