

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Хирк Анастасия Вячеславовна

**Агрофизическая оценка структурного состояния и
эродируемость агросерых почв Владимирского Ополя**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре физики и мелиорации почв и на кафедре эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научные
руководители:

Карпова Дина Вячеславовна
доктор сельскохозяйственных наук

Хайдапова Долгор Доржиевна
кандидат биологических наук, доцент

Официальные
оппоненты:

Мазиров Михаил Арнольдович
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева», Институт агробиотехнологии, кафедра земледелия и методики опытного дела, профессор

Масютенко Нина Петровна
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии, руководитель

Комаров Андрей Алексеевич
доктор сельскохозяйственных наук, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», отдел управления агротехнологиями и агромониторинга, сектор систем управления агротехнологиями, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 21 октября 2025 года в 15 ч 30 мин на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 12, биологический факультет, аудитория М-1.

Тел: 8(495) 939-35-46 Электронная почта: nvkostina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3481>

Автореферат разослан «18» сентября 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат биологических наук

Костина Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Почва является сложной многокомпонентной системой обладающей иерархической структурой. В агросистемах разные по интенсивности приёмы и системы обработки почв оказывают не одинаковое воздействие на почву, что проявляется в структурном состоянии почв, что в свою очередь влияет на эродируемость. Оценка устойчивости структуры почв к механическим и водным воздействиям является актуальной задачей агрофизики в условиях изменяющегося климата и увеличения частоты ливневых осадков. Устойчивость взаимосвязи между почвенными частицами, микроагрегатами и органическим веществом можно оценить с помощью методов реологии.

Владимирское Ополье является районом старого освоения с плодородными почвами, здесь ведутся работы по усовершенствованию адаптивно-ландшафтного подхода в земледелии (Волощук, 2001; Окорков, 2003, 2006; Кирюшин, 2004), исследуется влияние систем обработки на структурное состояние агросерых почв (Зинченко, 2019, 2020, 2023). Пространственная вариабельность агрофизических характеристик комплекса почв Владимирского Ополья детально рассмотрена в работах (Тымбаев, 2004; Буева, 2005; Гончаров, 2010), особо исследованы изменчивость водопроницаемости (Дядькина, 2004) и устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям (Николаева, 2016).

Цель работы: дать характеристику структурного состояния, реологических свойств и эродируемости агросерых почв Владимирского Ополья и оценить влияние на них систем обработки почвы.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Провести оценку агрегатного состава агросерых почв; сравнить структурное состояние агросерой почвы и агросерой со вторым гумусовым горизонтом; оценить влияние систем обработки на структурное состояние почв;
2. Определить механическую прочность агрегатов агросерых почв;
3. Определить реологические свойства агросерых почв методом амплитудной развертки на реометре MCR-302; оценить влияние систем обработки на реологические свойства агросерых почв;
4. Определить критическую скорость разбрызгивания дождевых капель для агросерых почв и оценить потери почвенного материала при ней;
5. Оценить давление дождевых капель на почву при критической скорости разбрызгивания и сравнить давление капли с реологическими показателями агросерых почв;
6. Провести расчёт фактора эродируемости агросерых почв и оценить влияние систем обработки на эродируемость почв.

Научная новизна работы

Получены реологические характеристики агросерых почв Владимирского Ополья при разных системах обработки методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria)¹. Показано, что предел текучести можно считать качественной характеристикой начального этапа эрозии почв, так как давление капли при критической скорости разбрызгивания P_k ниже энергии связи между частицами при пределе текучести.

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

Теоретическая и практическая значимость работы

Оценены различия в структуре агросерых почв при разных системах обработки. Показано влияние систем обработки на эродированность почв через их структурное состояние. Полученные в работе результаты могут быть использованы для прогнозирования изменчивости структурного состояния и эродированности почв, а также оптимизации агротехнических приёмов и систем обработки.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования явились агросерые почвы, а предметом исследования было структурное состояние этих почв.

Методология диссертационного исследования

В работе были использованы лабораторные методы агрофизики для работы с почвами, а также методы эрозиоведения. Полученные результаты подвергались статистической обработке.

Личный вклад автора заключается в анализе научных работ по теме исследования, проведении полевых и лабораторных исследований, обработке полученных экспериментальных данных, обобщении полученных данных, представлении результатов исследования на научных конференциях, подготовке публикаций в журналах и сборниках.

Степень достоверности

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.

Положения, выносимые на защиту

1. Наиболее однородный агрегатный состав агросерых почв с высокими значениями коэффициента структурности сформировался при комбинированно-плоскорезной системе обработки.
2. Агросерые почвы на склоне оказывают меньшее сопротивление сдвигу, чем на приводораздельном участке.
3. Предел текучести можно считать характеристикой начального этапа эрозии почв, так как давление капель на почву ниже, чем энергия связи между частицами при пределе текучести.
4. Эродированность агросерых почв ниже при комбинированно-плоскорезной системе обработки.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследования были изложены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: «Докучаевские чтения» 2018, 2020, 2021; Международные научные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» в 2018, 2019, 2020; Международная конференция «European Geosciences Union General Assembly», 2021; Научная интернет-конференция с межд. участием, посвященная 90-летию со дня рождения заслуженного профессора Е.А. Дмитриева «Природная и антропогенная неоднородность почв и статистические методы ее изучения», 2022; Международная научно-практическая конференция «Экология речных бассейнов», 2023; Международная научная конференция «Фундаментальные концепции физики почв:

развитие, современные приложения и перспективы» к 80-летию образования кафедры физики и мелиорации почв МГУ имени М.В.Ломоносова, 130-летию профессора Н.А. Качинского, 2024.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных WoS, Scopus и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова. В статьях, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Объем и структура диссертации

Работа состоит из следующих разделов: «Введение», «Обзор литературы», «Объекты и методы исследования», «Результаты и обсуждения», «Заключение», «Выводы», «Список литературы», «Приложения». Работа изложена на 129 страницах, содержит 30 таблиц, 33 рисунка и 5 приложений. Список литературы включает 113 источников.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю Д.В. Карповой за помощь в исследовании, обсуждении и написании статей. Автор благодарит научного руководителя Д.Д. Хайдапову за руководство в работе на реометре, оформлении результатов и подготовке диссертации. Автор благодарит М.С. Хирка за помощь с расчетами в разделе “Устойчивость пахотного горизонта агросерых почв к разбрызгиванию”. Автор выражает благодарность сотрудникам Верхневолжского ФАНЦ И.М. Щукину, Р.Д. Петросяну, С.И. Зинченко за помощь в организации полевых работ и консультации. Автор признателен заведующему лабораторией эрозии почв, ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева в.н.с., к.г.н. А.П. Жидкину за обсуждение и рекомендации по вопросам эродированности почв.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении изложена актуальность темы работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Обзор литературы состоит из двух глав. В первой главе рассматривается структурная организация почв, влияние различных факторов на устойчивость межчастичных связей. Понятие эродированности почв как интегральной характеристики, зависящей от гранулометрического состава, содержание гумуса и структурной организации почв. Во второй главе рассматриваются особенности почвообразовательного процесса почв Владимирского Ополья и теории возникновения второго гумусового горизонта.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Для исследования агрофизических свойств агросерых почв были выбраны два участка на полях Верхневолжского ФИЦ (Владимирская обл., г. Суздаль).

Первым объектом исследования является пахотный горизонт агросерых почв на участке опытного поля по изучению адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ) Верхневолжского ФИЦ. Опыт является многофакторным – здесь используются пять севооборотов, четыре системы обработки почв и дифференцированное внесение удобрений. Опыт проводится уже 30 лет, с 1995 года (Кирюшин, 2004; Окорков, 2006). Почвенный покров представлен агросерыми почвами разной степени оподзоленности и агросерыми почвами со вторым

гумусовым горизонтом. На рисунке 1 представлена схема отбора образцов агросерых почв на участке опыта АЛСЗ. Для оценки влияния систем обработки на агрегатный состав агросерых почв, образцы отбирались из слоёв 0-20 и 20-40 см, которые в наибольшей степени подвержены воздействиям при обработках.

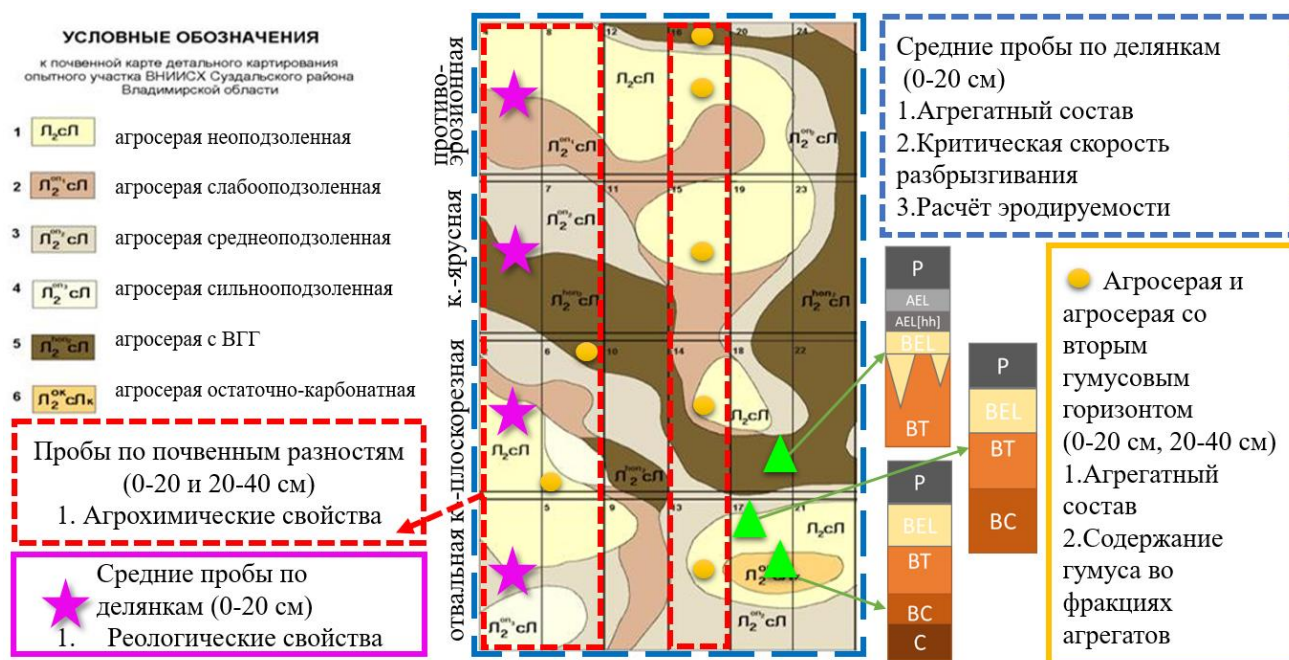


Рисунок 1. Объект исследования 1) Опыт АЛСЗ

На опыте применяются четыре системы обработки почв: отвальная, комбинированно-плоскорезная, комбинированно-ярусная, противоэрозионная. Из пяти шестипольных севооборотов в данной работе исследованы три (табл. 1).

Таблица 1. Системы обработки на участке АЛСЗ

система обработки	севообороты			приёмы
	зерно-паротравяной	зернотравяной	зернотравяной	
отвальная	под все культуры			отвал. вспашка 20-22 см
комбинированно-плоскорезная	черный пар	занятый пар	яр. пшеница	плоскорез. обраб. 10-12 см
	оз. пшеница	оз. рожь	овёс	плоскорез. обраб. 10-12 см
	овёс+мн. травы	овёс+мн. травы	ячмень+мн. травы	плоскорез. обраб. 10-12 см
	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	-
	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	-
	ячмень	яр. пшеница	оз. рожь	отвал. вспашка 20-22 см
комбинированно-ярусная	черный пар	занятый пар	яр. пшеница	плоскорез. обраб. 10-12 см
	оз. пшеница	оз. рожь	овёс	плоскорез. обраб. 10-12 см
	овёс+мн. травы	овёс+мн. травы	ячмень+мн. травы	плоскорез. обраб. 10-12 см
	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	-
	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	-
	ячмень	яр. пшеница	озимая рожь	ярусная вспашка 25-27 см
противо-эрозионная	черный пар	занятый пар	яр. пшеница	глуб. рыхление 25-27 см
	оз. пшеница	оз. рожь	овёс	глуб. рыхление 25-27 см
	овёс+мн. травы	овёс+мн. травы	ячмень+мн. травы	глуб. рыхление 25-27 см
	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	мн. травы 1 г.п.	-
	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	мн. травы 2 г.п.	-
	ячмень	яр. пшеница	оз. рожь	отвал. вспашка 20-22 см

Второй объект расположен на склоне (1-1.5°) к реке Каменка, на нём были заложены три разреза и описаны почвы: агросерая типичная, агроём языковатый,

агросерая глееватая почва (табл. 2), также были взяты пробы пахотного слоя в 48 точках.

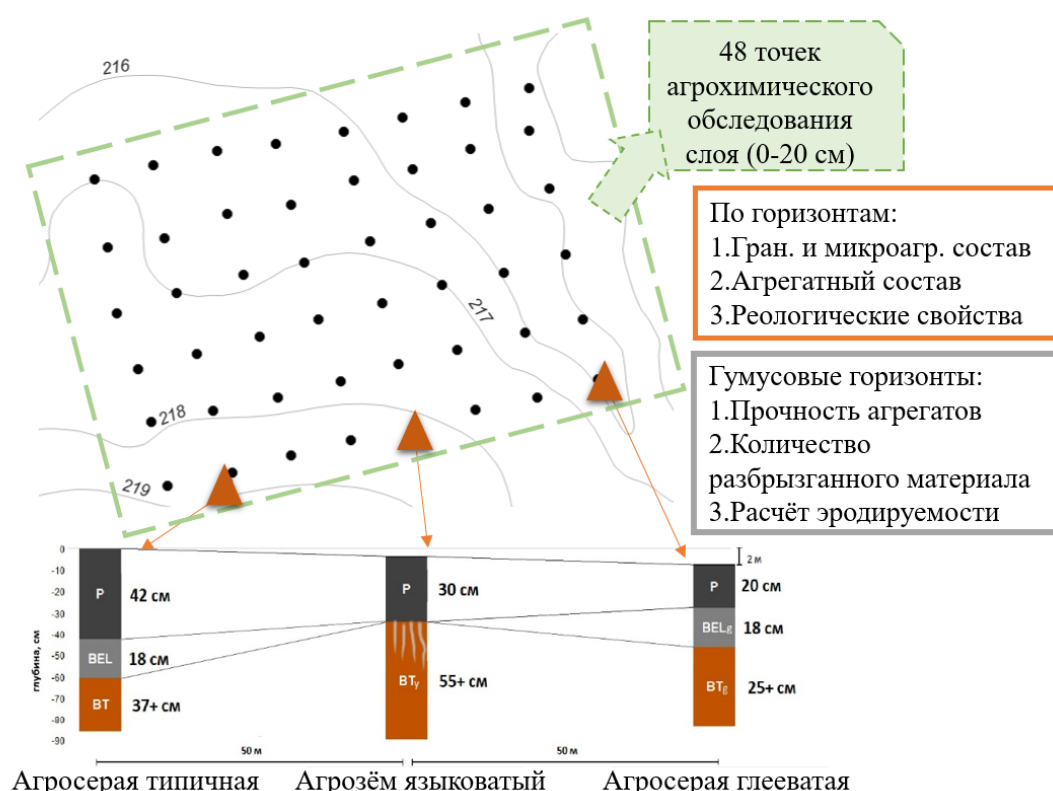


Рисунок 2. Объекты исследования 2) Поле на склоне

Таблица 2. Названия почв, координаты разрезов

№	Названия почв, координаты разрезов
1	1977: Серая лесная обычная мощная освоенная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках 2004: постлитогенная текстурно-дифференцированная агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках, 56.416723, 40390007
2	1977: Серая лесная обычная среднемогучная освоенная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках 2004: постлитогенный агрозём текстурно-дифференцированный языковатый среднепахотный среднесуглинистый лёссовидных суглинках, 56.417041, 40392407
3	1977: Серая лесная глеевая грунтово-глееватая почва маломощная освоенная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках 2004: постлитогенная текстурно-дифференцированная агросерая глееватая мелкопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках, 56.417361, 40394844

Методы определения агрохимических характеристик. Определение почвенной кислотности проводилось в водной вытяжке потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85 Почвы); содержания азота в аммонийной и нитратной формах по методу ЦИНАО (ГОСТ 26488-85 Почвы); подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО; содержание гумуса по методу Тюринга в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91 Почвы);

Методы определения агрофизических характеристик. Плотность сложения определялась цилиндром с заданным объёмом в трёхкратной повторности

(Вадюнина, 1986). Гранулометрический состав был определен двумя методами: седиментационным методом пипетки (Полевые и лабораторные методы, 2001) и методом лазерной дифракции (ЛД) частиц на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) (Юдина и др., 2017).

Анализ структуры и водопрочности проводился методом Н.И. Саввинова для пахотного (0-20 см) и подпахотного слоев (20-40 см) на участке АЛСЗ. Просеивание воздушно-сухих агрегатов образцов склонового поля было проведено на виброгрохоте Anallysette 3 Spartan (Фомин и др., 2019). Обработка результатов проводилась методом главных компонент в программе STATISTICA.

Определение прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов склоновых почв проводилось на коническом пластометре П.А. Ребиндера (Хайдапова и др., 2022). Анализировалась прочность агрегатов размером 3-5 мм из каждого горизонта. Предельное напряжение сдвига P_m (кг/см²) рассчитывается по формуле (1), где K_α - коэффициент площади соприкосновения конуса с агрегатом, для воздушно-сухих 4.4, для насыщенных 1.108, F (кг) – нагрузка на конус, h (см) – глубина погружения конуса, в данном случае средний диаметр агрегатов.

$$P_m = K_\alpha \frac{F}{h^2} \quad (1)$$

Реологические параметры изучали методом амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Реологические параметры: значение деформации, сопротивление сдвигу τ , модули упругости G' и вязкости G'' определялись в диапазоне вязкоупругого поведения, в точке максимального сопротивления сдвигу и точке пересечения модулей упругости и вязкости (рис. 3), в которой происходит полное разрушение межчастичной структуры и почва переходит в текучее состояние (предел текучести) (Хайдапова и др., 2022).

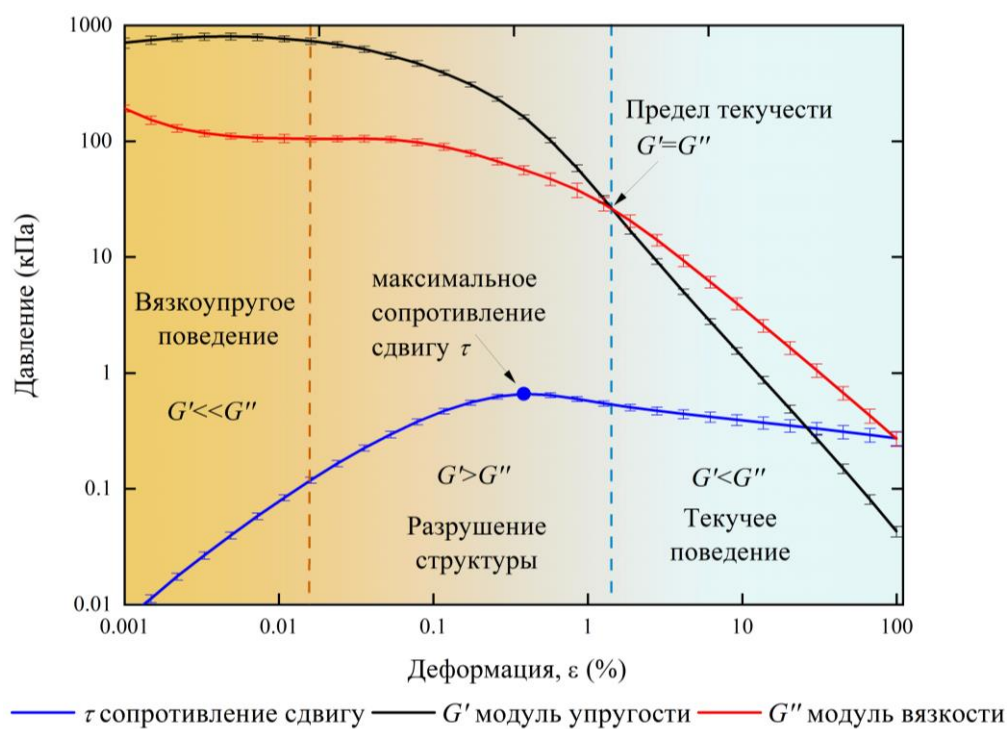


Рисунок 3. Схема реологического поведения почвы

Эксперимент по дождеванию проводился на лабораторной дождевальной установке. Каплеобразователи на рабочей поверхности расположены по спирали

Архимеда. Диаметр образуемых капель равен 2.6 мм. Дождевание производилось дистиллированной водой, расход воды 4.0 мм/мин. Время дождевания одного образца – 30 минут.

Расчёт фактора эродированности проводился по алгоритму для модели WaTEM/SEDEM. Фактор эродированности почв (К-фактор) рассчитывается по формуле:

$$K = 2.76 * 10^{-7} M^{1.14} (12 - OM) + 0.0043 * (s - 2) + 0.0033 * (p - 3), \quad (2)$$

где М – фактор гранулометрического состава, который вычисляется как:

$(m_{(0.002-0.05mm)} + m_{(0.05-0.1mm)}) * (100 - m_{(<0.002mm)})$;

ОМ (%) – содержание органического вещества, гумуса;

S – Структурный класс;

P – Класс водопроницаемости.

Коэффициент эродированности почвы выражается в кг*ч*МДж⁻¹мм⁻¹.

Статистическая обработка данных. Для обработки данных агрохимического состояния агросерых почв участка АЛСЗ был выбран непараметрический метод U-критерий Манна-Уитни. Обработка результатов анализа состава агрегатов проводилась методом главных компонент. Для определения взаимосвязей между агрофизическими показателями использовался корреляционный анализ.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Агрохимические свойства пахотного слоя агросерых почв

Агрохимические свойства пахотного слоя агросерых почв АЛСЗ на приводораздельном участке исследованы по почвенным разностям в двух слоях 0-20 см и 20-40 см. Сравнение агрохимических свойств проведено с помощью непараметрического метода – U-критерий Манна-Уитни. По сравнению со слоем 0-20 см в слое 20-40 см почвенные разности различаются не только по содержанию гумуса, нитратного азота, но и по показателям обменной кислотности, рН, суммы оснований. В слое 20-40 см имеются достоверные различия связанные со степенью оподзоленности почвы, что проявляется в таких показателях, как обменная кислотность, рН, сумма оснований. Например, в сильнооподзоленной почве сумма оснований значительно ниже, чем у других почвенных разностей. Также в слое 20-40 см в почве со вторым гумусовым горизонтом содержание гумуса и связанного с ним нитратного азота выше, чем в других почвенных разностях.

На склоновом поле в 48 точках были определены следующие параметры пахотного слоя: плотность, содержание гумуса, рН и обменная кислотность, содержание подвижных форм калия и фосфора. Плотность пахотного слоя находилась в благоприятном диапазоне от 1 до 1.3 кг/м³ по А.Г. Бондареву (1985). В ложбине плотность пахотного слоя несколько выше, чем на остальном поле и составляет до 1.3 кг/м³. В точках с высоким содержанием гумуса плотность ниже. Содержание гумуса находится в диапазоне от 2.5% до 5.5%. Содержание гумуса в ложбине <3%. Видны пятна микропонижений с содержанием гумуса >4% и микроповышения с содержанием гумуса <3%. Пахотный слой имеет слабокислую реакцию от 6.25 до 6.5. Вниз по склону рН_{Н2О} повышается равномерно. Характер распределения значений рН_{КСl} отличается от рН_{Н2О}. В ложбине наблюдаются высокие показания рН_{КСl}. Подвижные формы калия и фосфора накапливаются в ложбине. Также наблюдается полоса высоких содержаний подвижных форм калия и фосфора, не связанная с рельефом. Можно предположить, что такая полоса могла

явиться артефактом внесения удобрений или обработки поля, так как это повышение находится в нижней части поля, на развороте техники и произошло механическое накопление.

Содержание подвижных форм фосфора имеет среднюю связь (0.6) с pH_{KCl} и слабую с pH_{H_2O} (0.3). Также содержание подвижных форм калия имеет слабую связь (0.4) с содержанием фосфора. Также существует связь между водной и солевой кислотностью (0.4), а также обратная зависимость между pH_{H_2O} и содержанием гумуса (-0.3).

Гранулометрический и микроагрегатный состав агросерых почв

Гранулометрический состав (рис. 4) типичен для почв Владимирского Ополя (Окорков, 2010). Содержание крупной пыли составляет >40%, средней пыли – 10-20%, илистой фракции 10-30%. По классификации Н.А. Качинского пахотные горизонты среднесуглинистые крупнопылеватые. Количество физической глины увеличивается вниз по профилю. Содержание ила в горизонтах ВТ примерно в два-три раза выше, чем в горизонтах Р и ВЕL. Разница между пипет-методом (ПМ) и лазерной дифракции (ЛД) содержания фракции ила в горизонтах ВТ составляет более 20%.

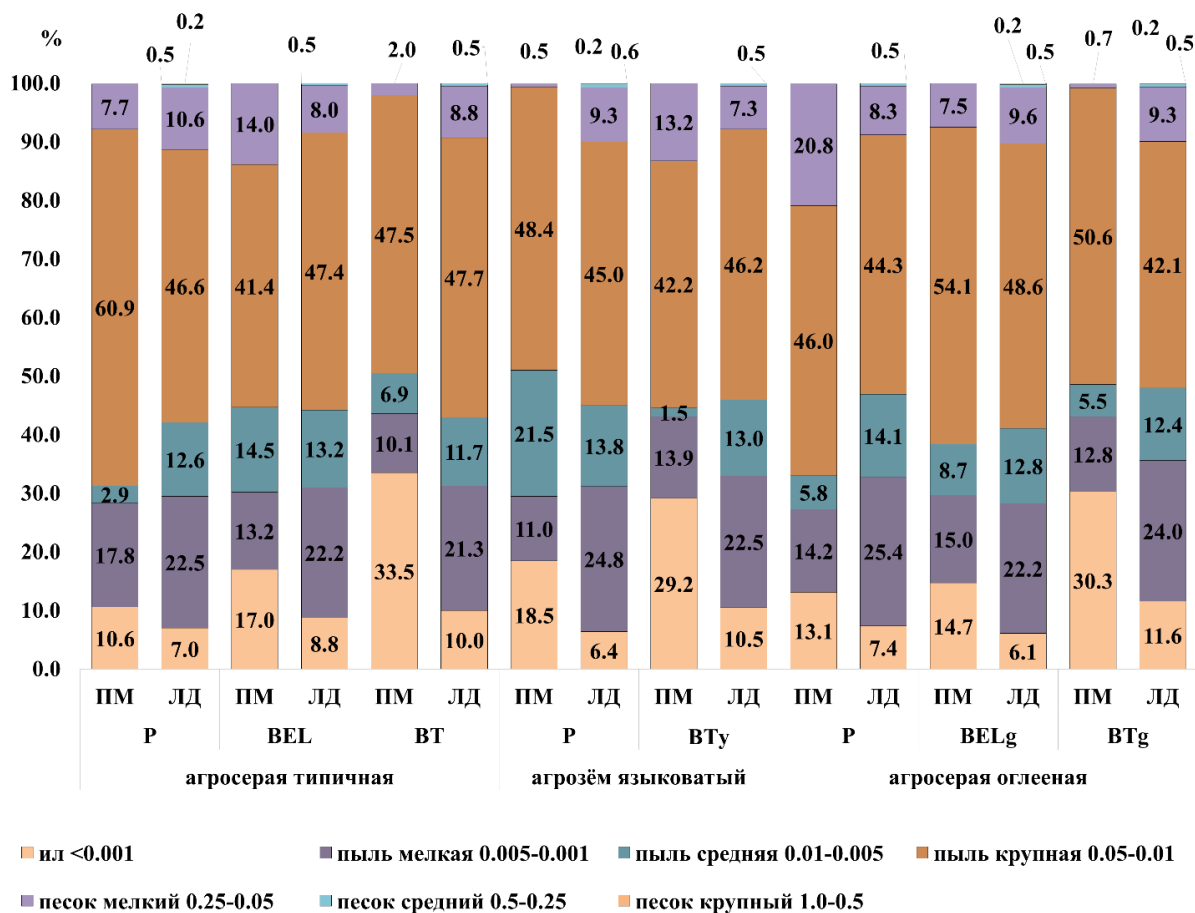


Рисунок 4. Гранулометрический состав;

ПМ - метод седиментометрии, ЛД – метод лазерной дифракции.

Микроагрегатный анализ показал, что в пахотных горизонтах содержится больше микроагрегатов, чем в подпахотных горизонтах. Однако содержание микроагрегатов в горизонте ВТу агрозёма языковатого (20.5%) находится на уровне пахотных горизонтов (20-22%). Средневзвешенный диаметр микроагрегатов (СВД), составляет от 170.9 до 244.0 мкм. Максимальный СВД (244.0 мкм) характерен для

горизонта BELg агросерой глееватой почвы, но при этом содержание микроагрегатов в этом горизонте (17.8%), наименьшее среди исследованных почв (22.6-17.8%). Наиболее крупными микроагрегатами среди пахотных горизонтов обладает агросерая типичная почва (200.9 мкм).

Структурное состояние агросерых почв

Влияние систем обработок на агрегатный состав агросерых почв АЛСЗ

Влияние систем обработок на агрегатный состав пахотного слоя агросерых почв исследовано на участке опыта АЛСЗ. С 24 делянок были отобраны образцы слоя 0-20 см. В пахотном слое агросерых почв содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА) составляет от 69 до 93% (табл. 3). Средневзвешенный диаметр агрегатов (СВД) составляет от 3.6 до 6.1 мм. Самое низкое среднее значение коэффициента структурности ($K_{стр.}$) при отвальной системе обработки – 3.7. Наибольший $K_{стр.}$ при комбинированно-ярусной системе обработки – 4.6. Коэффициент водоустойчивости ($K_{в-уст.}$) у агросерой почвы при противоэрозионной системе обработке 47.7, что выше, чем при остальных системах обработки 35.2-43.7. Однако при противоэрозионной системе наблюдается самый высокий коэффициент вариации показателей структурного состояния, что говорит о большей неоднородности структуры агросерой почвы при этой системе обработки. Самая низкая вариация показателей структурного состояния у агросерой почвы при комбинированно-плоскорезной системе обработки, что свидетельствует о том, что при этой системе обработки формируется однородная почвенная структура.

Таблица 3. Характеристика структурного состояния

Показатель	Среднее	Минимум	Максимум	Станд. ошибка	Коэф. вариации
Отвальная система обработки					
СВД, мм	5.1	4.5	5.3	0.3	5.8
АЦА, %	79.7	73.0	93.0	7.3	9.2
$K_{стр.}$	3.7	2.7	5.0	0.9	23.9
$K_{в-уст.}$	40.3	26.0	53.0	10.7	26.5
Комбинированно-плоскорезная система обработки					
СВД, мм	4.3	3.6	4.8	0.5	10.9
АЦА, %	80.3	76.0	84.0	3.1	3.9
$K_{стр.}$	4.2	3.1	5.4	0.8	20.3
$K_{в-уст.}$	43.7	38.0	53.0	6.5	15.0
Комбинированно-ярусная система обработки					
СВД, мм	4.5	3.9	5.4	0.6	13.2
АЦА, %	80.3	72.0	86.0	6.3	7.8
$K_{стр.}$	4.6	2.5	6.2	1.7	36.8
$K_{в-уст.}$	35.2	19.0	47.0	9.3	26.6
Противоэрозионная система обработки					
СВД, мм	4.9	3.6	6.1	0.8	17.3
АЦА, %	77.7	69.0	88.0	7.7	10.0
$K_{стр.}$	4.4	2.3	7.4	1.7	39.5
$K_{в-пр}$	47.7	15.0	81.0	25.3	53.0

Результаты определения содержания агрегатов были обобщены с помощью метода главных компонент (МГК). Данные по агрегатному составу были рассмотрены для трёх звеньев севооборота: черный пар, занятый пар и пшеница. Метод главных компонент показал, что, структурное состояние агросерой почвы на черном пару отличается большей дисперсией, чем на занятом пару и пшенице.

Влияние системы обработки почв на структуру проявляется больше в соотношении водоустойчивых, чем воздушно-сухих агрегатов.

Особенности агрегатного состава почвы со вторым гумусовым горизонтом.

Для выявления различий агрегатного состава агросерой и агросерой почвы со вторым гумусовым горизонтом (ВГГ) были отобраны образцы с участка АЛСЗ в слое 0-20 см и слое 20-40 см. Показатели структурного состояния агросерой и агросерой со вторым гумусовым горизонтом почв в слое 0-20 см имеют близкие значения (табл. 4). Значение показателей структурного состояния агросерой почвы в слое 20-40 см несколько ниже, а вариация их выше, чем в слое 0-20 см. Однако, у почвы со вторым гумусовым горизонтом в слое 20-40 см коэффициент структурности и содержание агрономически ценных агрегатов выше, а средневзвешенный диаметр и водоустойчивость ниже, чем в слое 0-20 см. Такие различия показателей структурного состояния могут быть связаны с содержанием гумуса.

Содержание гумуса в пахотном и подпахотном слоях выше в агросерой почве со вторым гумусовым горизонтом, чем в агросерой почве. При этом содержание гумуса в агросерой почве со вторым гумусовым горизонтом в слое 20-40 см выше в среднем на 0.5%, чем в слое 0-20 см. Содержание гумуса также не одинаково в разных фракциях агрегатов, особенно велика разница в содержании гумуса во фракции >10 мм между слоями и составляет 1.2%. Вероятно, это связано с тем, что в глыбы >10 мм слипаются не агрегированная масса частиц, которые при этом могут иметь большое содержание гумуса.

Таблица 4. Характеристики структуры агросерой и агросерой почвы с ВГГ

Показатель	Среднее	Минимум	Максимум	Станд. ошибка	Коэф. вариации
Агросерая, слой 0-20 см					
D, мм	4.5	3.5	5.4	0.9	19.0
K _{стр}	4.0	2.8	5.3	1.1	27.8
K _{в-уст}	3.6	2.5	4.3	0.8	21.9
АЦА, %	78.0	73.0	82.0	4.2	5.4
Агросерая, слой 20-40 см					
D, мм	4.0	2.9	4.8	0.9	23.3
K _{стр}	3.2	2.4	4.7	1.0	30.1
K _{в-уст}	2.8	2.2	3.4	0.5	17.3
АЦА, %	76.2	70.0	86.0	7.4	9.7
Агросерая со вторым гумусовым горизонтом, слой 0-20 см					
D, мм	4.5	3.0	6.0	2.1	47.1
K _{стр}	3.4	2.3	4.4	1.5	44.3
K _{в-уст}	3.7	2.6	4.7	1.5	40.7
АЦА, %	74.0	69.0	79.0	7.1	9.6
Агросерая со вторым гумусовым горизонтом, слой 20-40 см					
D, мм	2.8	1.8	3.7	1.3	48.9
K _{стр}	4.6	3.8	5.4	1.1	24.6
K _{в-уст}	2.0	1.6	2.3	0.5	25.4
АЦА, %	85.0	83.0	87.0	2.8	3.3

Анализ методом главных компонент был проведён для воздушно-сухих и водоустойчивых агрегатов в двух слоях 0-20 см и 20-40 см. Анализ главных компонент показал, что при комбинированно-плоскорезной обработке формируется агрегатный состав с меньшим количеством агрегатов >7 мм по сравнению с другими

системами обработки. Агрегатный состав почв со вторым гумусовым горизонтом в слое 20-40 см отличается большим количеством мелких агрегатов, чем в почвах без второго гумусового горизонта.

Агрегатный состав агросерых почв склонового поля

На поле, расположенном в нижней части склона к р. Каменка (объект 2), структурный состав был проанализирован для пахотного и подпахотных горизонтов. Наиболее однородной по агрегатному составу (табл. 5) почвой является агрозём языковатый: в пахотном и ВТу горизонтах близки содержание и средний диаметр микроагрегатов и агрономически ценных агрегатов. Эта почва отличается высокой водоустойчивостью. Пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной отличается от пахотного горизонта агрозёма меньшим диаметром агрегатов. Пахотный горизонт агросерой глееватой отличается большим количеством глыб >10 мм и мелких агрегатов <0.25 мм, водоустойчивость агрегатов несколько ниже, чем у агрозёма языковатого и агросерой типичной глубокопахотной.

Таблица 5. Интегральные показатели структуры

Почва	горизонт	Возд-сух. агрегаты		Водоуст. агрегаты (5-0.25 мм)		микроагрегаты	
		СВД, мм	АЦА, %	СВД, мм	Содерж., %	СВД, мкм	Содерж., %
агросерая типичная	Р	3.3	90	1.0	54	200.9	20.1
	ВЕL	6.2	70	1.2	48	195.9	18.8
	ВТ	7.2	71	1.0	37	213.4	19.6
агрозём языковатый	Р	4.8	81	0.9	59	189.6	20.5
	ВТу	4.8	92	1.5	54	170.9	21.6
агросерая глееватая	Р	6.1	67	0.8	46	183.2	22.6
	ВЕLg	5.9	74	1.1	47	244.0	17.8
	ВТg	8.9	50	0.8	30	188.8	19.7
Корреляции							
Возд-сух. агрегаты	СВД, мм						
	АЦА, %	-0.9*					
Водоуст. агрегаты	СВД, мм	-0.3	0.6				
	Содерж., %	-0.9	0.9	0.4			
Микроагрегаты	СВД, мкм	0.1	-0.1	-0.1	-0.2		
	Содерж., %	-0.2	0.2	-0.1	0.2	-0.8	

*Отмечены значимые различия при $p < 0.05$

Метод главных компонент показал, что соотношение агрегатов в горизонтах пахотных, элювиальных и иллювиальных отличается друг от друга. При этом наибольший разброс в агрегатном составе наблюдается в иллювиальных горизонтах, а наименьший - в элювиальных.

Прочность почвенных агрегатов агросерых почв

Прочность почвенных агрегатов, как способность оказывать сопротивление внешнему механическому воздействию, показывает особенности межчастичного взаимодействия в агрегатах. Прочность агрегатов изменяется при увлажнении и иссушении. Рассмотрены два крайних случая: воздушно-сухие агрегаты (4-7%) и капиллярно-насыщенные (24-27%). Результаты анализа прочности воздушно-сухих

и капиллярно-насыщенных агрегатов агросерых почв, а также их корреляции с содержанием ила, физической глины и гумуса представлены в табл. 6.

Таблица 6. Прочностные характеристики агрегатов

Почва	горизонт	Сорг, %	Гранулометрич. состав		Воздушно- сухие		Капиллярно- насыщенные	
			<0.001 мм	<0.01 мм	W%	Pm, кг/см ²	W%	Pm, кг/см ²
агросерая типичная	P (0-42 см)	3.57	10.60	31.34	4.71	13.48	28.09	0.45
	BEL(42-60 см)	0.51	16.99	44.66	3.75	23.93	24.37	0.31
	BT (60-85 см)	0.85	33.53	50.53	4.69	27.50	21.43	0.81
агрозём языковатый	P (0-30 см)	2.04	18.54	18.08	3.95	24.61	27.59	0.35
	BTy (30-85 см)	0.68	29.21	44.56	7.14	29.15	24.44	0.68
агросерая глееватая	P (0-20 см)	2.55	13.06	33.14	4.17	18.40	29.41	0.28
	BELg (20-38 см)	2.21	14.72	38.37	4.00	19.11	26.89	0.60
	BTg (38-75 см)	0.34	30.34	48.71	7.14	21.86	24.51	0.52
Корреляции								
Возд.-сух.	Pm, кг/см ²	-0.80*	0.78	0.38	0.33			
Кап.-нас.	Pm, кг/см ²	-0.34	0.71*	0.59	0.44	0.47	-0.71*	

*Отмечены значимые различия при $p < 0.05$

Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет разброс от 13.48 кг/см² в пахотном горизонте агросерой типичной глубокопахотной почвы, до 29.15 кг/см² в горизонте BTy агрозёма языковатого. Прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв. Прочность иллювиальных горизонтов почти в два раза больше, чем у гумусовых, это связано с увеличением содержания ила и уменьшением количества гумуса. Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет прямую зависимость от содержания илистой фракции (0.78) и обратную с содержанием гумуса (-0.80).

При капиллярном насыщении значительно снижается прочность агрегатов. Агрегаты при капиллярном насыщении на два порядка менее прочные, чем в воздушно-сухом состоянии. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов имеет разброс от 0.28 кг/см² в пахотном горизонте агросерой глееватой, до 0.81 кг/см² в горизонте BT агросерой типичной почвы. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов имеет отрицательную корреляцию с влажностью (-0.71) и положительную с содержанием илистой фракции (0.71).

Таким образом, прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв в соответствии с увеличением количества илистых частиц, между которыми формируются прочные конденсационные связи, при отсутствии плёнок органического вещества. Органическое вещество аккумулирует большое количество воды, вследствие чего влажность пахотных горизонтов выше, чем у BT горизонтов. Плёнки воды расклинивают микроагрегаты и частицы, в результате прочность капиллярно-насыщенных агрегатов гумусированных горизонтов в два-три раза ниже, чем у нижележащих горизонтов. Прочность насыщенных агрегатов пахотных горизонтов уменьшается в ряду: агросерая типичная, агрозём языковатый, агросерая глееватая.

Реологические свойства агросерых почв

Влияние систем обработок на реологические свойства агросерых почв АЛСЗ.

Влияние систем обработок на реологические свойства пахотного слоя (0-20 см) агросерых почв было исследовано для четырёх обработок на участке опыта АЛСЗ.

Диапазон линейного вязкоупругого поведения — это область на реологической кривой в виде плато, где модули упругости и вязкости имеют постоянные значения. Структура образца не нарушается с увеличением деформации, и данная область считается диапазоном устойчивости образца к сдвигу, а упругое поведение преобладает над вязким. Диапазон вязкоупругого поведения агросерых почв при отвальной, комбинированно-плоскорезной и комбинированно-ярусной системах обработки составил 0.007% деформации (рис. 5), но при противоэрозионной системе обработки был больше (0.011%). Сопротивление сдвигу τ в конце вязкоупругого диапазона при отвальной, комбинированно-плоскорезной и комбинированно-ярусной системах обработки составило от 56 Па до 61 Па, а для почвы при противоэрозионной системе обработки было выше – 83 Па. Модули упругости G' в конце вязкоупругого поведения при всех системах обработки имели близкие значения (833-769 кПа).

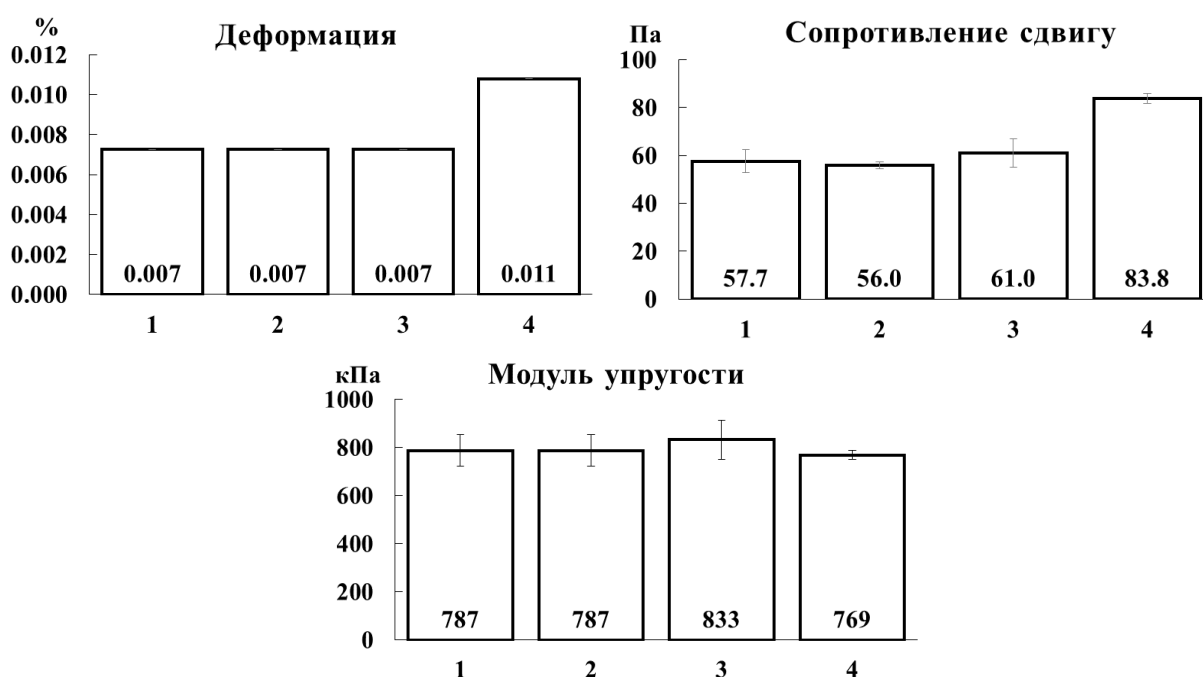


Рисунок 5. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в пределах вязкоупругого диапазона; 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4 – противоэрозионная

Максимальное сопротивление сдвигу τ_{max} это точка, в которой наблюдается наибольшая устойчивость микроструктуры почвы к сдвиговым деформациям. Максимальное сопротивление сдвигу τ_{max} (рис. 6) наблюдалось при деформации 0.39% при всех системах обработки кроме отвальной (0.45%). Значение максимального сопротивления сдвигу τ_{max} агросерой почвы при отвальной (652 Па) и комбинированно-плоскорезной (633 Па) системах обработки было ниже, чем при комбинированно-ярусной (687 Па) и противоэрозионной (676 Па) системах обработки. Среднее значение модуля упругости G' в точке максимального сопротивления сдвигу в агросерой почве при отвальной системе обработки (141 кПа) было несколько ниже, чем при остальных обработках (156-166 кПа).

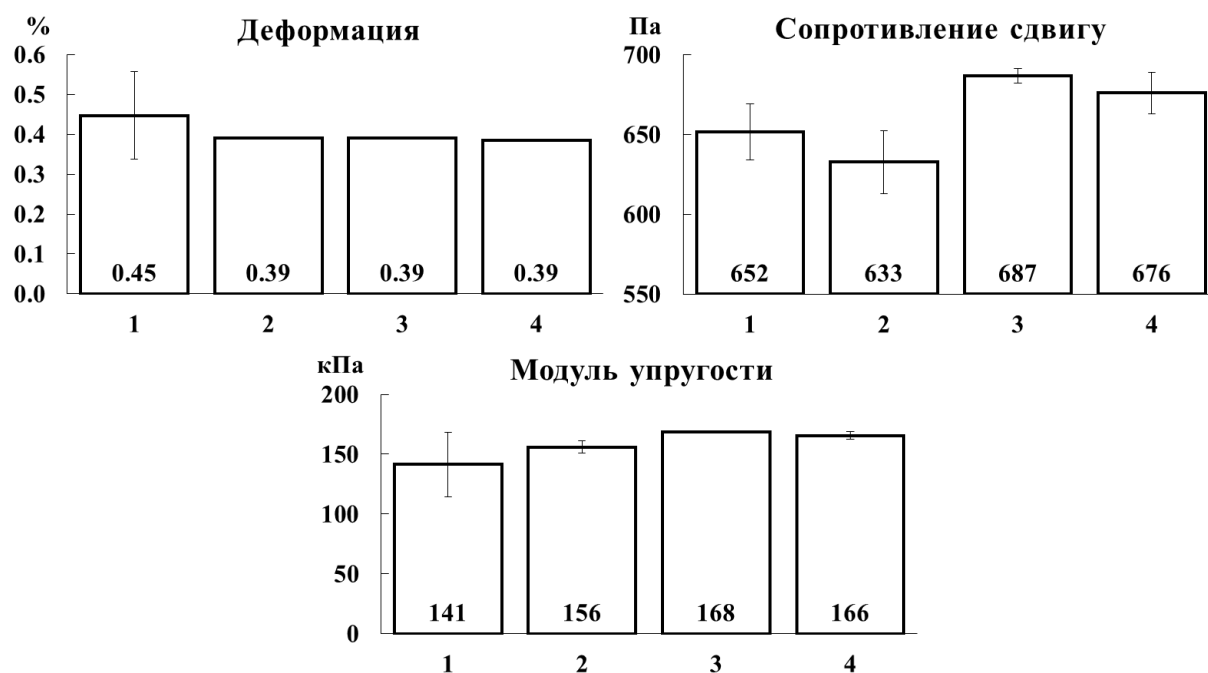


Рисунок 6. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в точке максимального сопротивления сдвигу; 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4 – противоэрозионная

При пересечении модулей упругости G' и вязкости G'' заканчивается разрушение межчастичных связей, и почва переходит в текучее состояние, т.е. эта точка является пределом текучести (рис. 7). Предел текучести наблюдался у агросерых почв при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки при деформации (1.2-1.3%), что меньше, чем у агросерых почв при отвальной и комбинированно-плоскорезной системах обработки (1.6-1.7%).

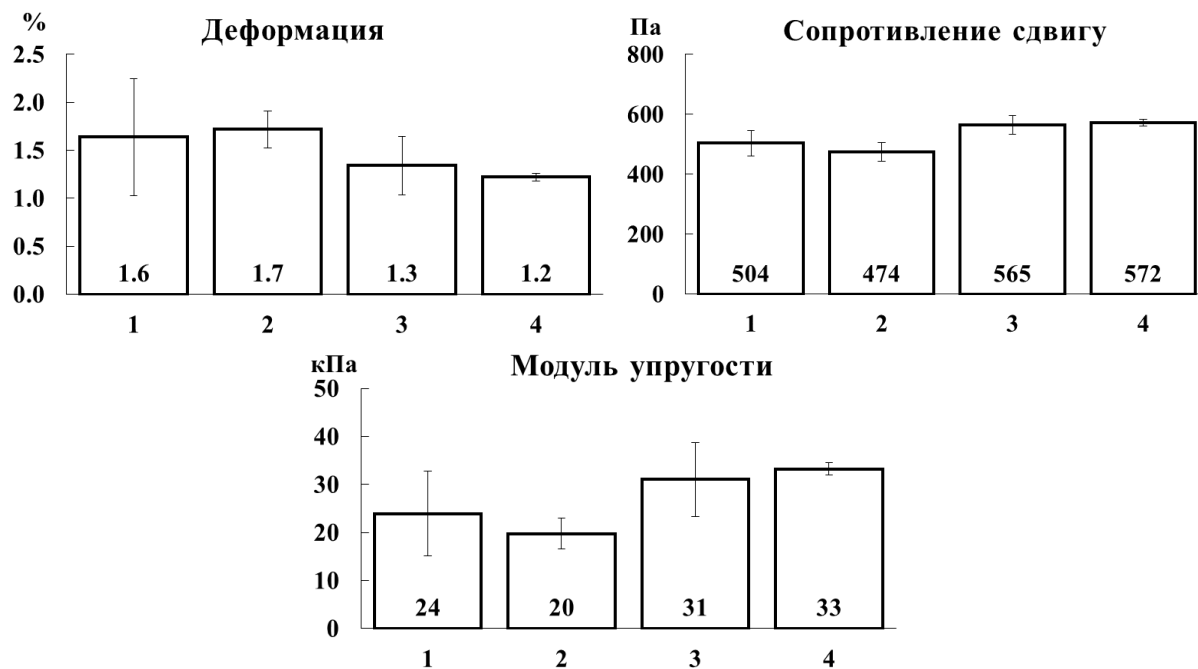


Рисунок 7. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в точке пересечения модулей упругости и вязкости; 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4 – противоэрозионная

При этом сопротивление сдвигу τ и модуль упругости G' у агросерых почв при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки были выше, чем у агросерых почв при отвальной и комбинированно-плоскорезной системах обработки.

Корреляционный анализ показал, что существует связь между реологическими свойствами агросерых почв и их агрегатным строением. Эта связь проявилась в том, что в точке максимального сопротивления сдвигу и при пределе текучести значение модуля упругости G' коррелировало со средневзвешенным диаметром агрегатов (0.8 и 0.7), коэффициентом структурности (0.6 и 0.7) и водоустойчивости структуры (0.7 и 0.7).

Реологические свойства агросерых почв на склоне

Реологические свойства агросерых почв на склоне были исследованы в пахотном, элювиальном и иллювиальном горизонтах.

Диапазон вязкоупругого поведения (рис. 8) пахотного горизонта у агросерой типичной почвы и агрозёма языковатого составляет 0.007% деформации, но у пахотного горизонта агросерой глееватой почвы он в среднем больше в два раза (0.014%) и близок к величине диапазона вязкоупругого поведения в элювиальном горизонте (0.011-0.013%). Диапазон вязкоупругого поведения в иллювиальных горизонтах занимает промежуточное значение между элювиальными и пахотными горизонтами и составляет (0.08-0.10%). В соответствии с величиной диапазона вязкоупругого поведения сопротивление сдвигу τ и модуль упругости G' в конце вязкоупругого диапазона наибольшие у элювиальных горизонтов, а наименьшие у пахотных.

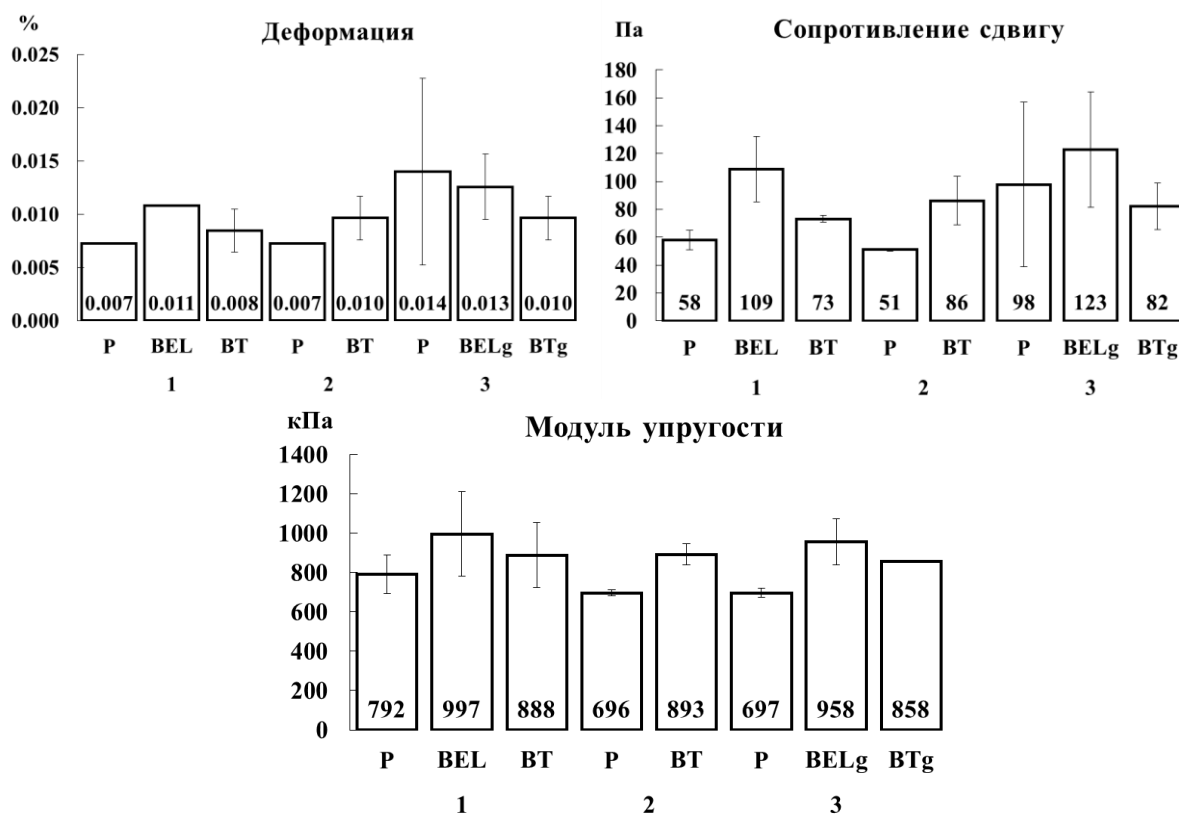


Рисунок 8. Реологические свойства агросерых почв в пределах вязкоупругого диапазона; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая

Точка деформации с максимальным сопротивлением сдвигу τ_{max} (рис. 9) почти у всех горизонтов была близка к 0.38% деформации, кроме элювиального (0.17%) и иллювиального (0.26%) горизонтов агросерой типичной почвы. Максимальное сопротивление сдвигу τ_{max} близко у всех горизонтов и составляет в среднем 630 Па. Значение модуля упругости G' в точке деформации с максимальным сопротивлением сдвигу почти у всех горизонтов составляет от 140 до 186 кПа, кроме элювиального 289 кПа и иллювиального 227 кПа горизонтов агросерой типичной почвы.

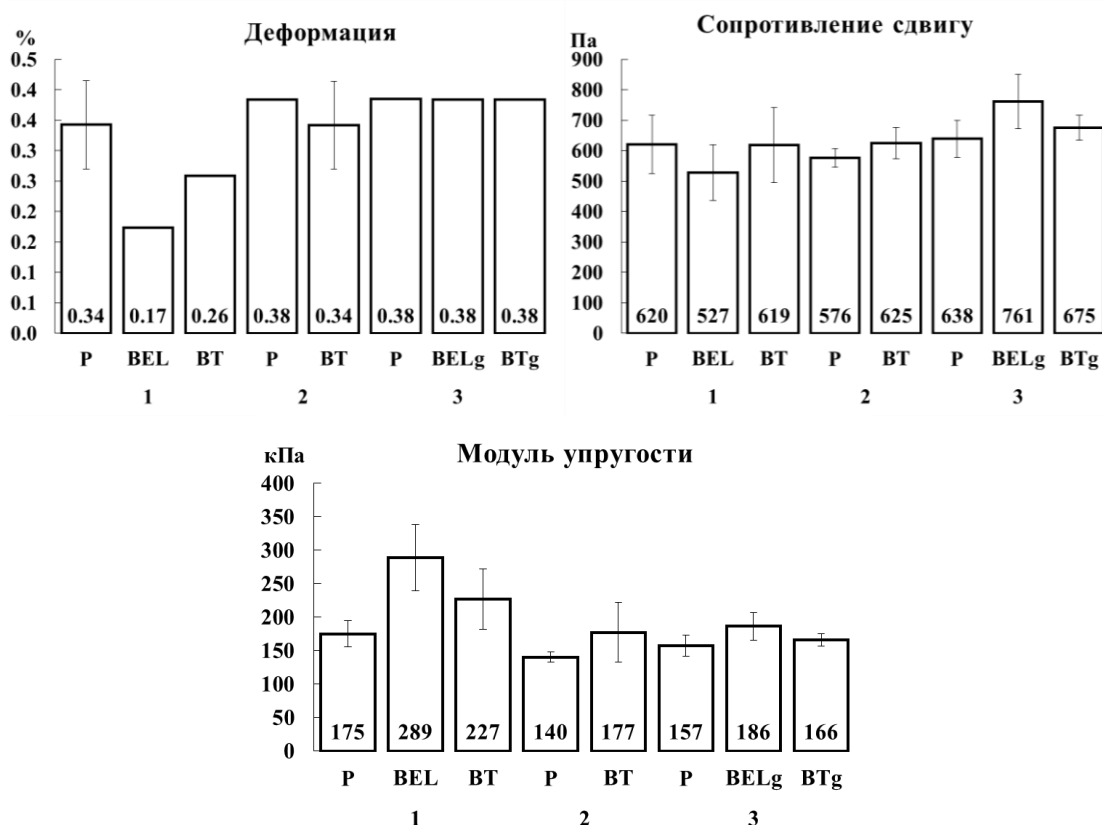


Рисунок 9. Реологические свойства агросерых почв в точке максимального сопротивления сдвигу; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая

Предел текучести (рис. 10) наблюдался при наибольшей деформации (2.1%) в пахотном горизонте агросерой типичной почвы, что свидетельствует о более пластичных связях между частицами благодаря большому содержанию гумуса. Предел текучести при наименьшем значении деформации наблюдался в элювиальных горизонтах, что говорит о хрупкости в них межчастичных связей. В остальных горизонтах предел текучести отмечен при деформации от 1.6% до 1.8%. Сопротивление сдвигу при пределе текучести было несколько ниже среднего у пахотного 353 Па и элювиального 338 Па горизонтов агросерой типичной почвы. Наибольшее сопротивление сдвигу при пределе текучести наблюдалось у элювиального горизонта 588 Па агросерой глееватой почвы. Минимальное значение модуля упругости G' при пределе текучести установлено для пахотного горизонта 12 кПа агросерой типичной почвы, так как за счёт более пластичной структуры этого горизонта значение модуля структурности снижается равномернее, чем у других горизонтов. У элювиальных горизонтов значение модуля упругости G' высокие,

особенно у агросерой глееватой почвы 30 кПа, что говорит о наибольшей хрупкости этого горизонта по сравнению с остальными.

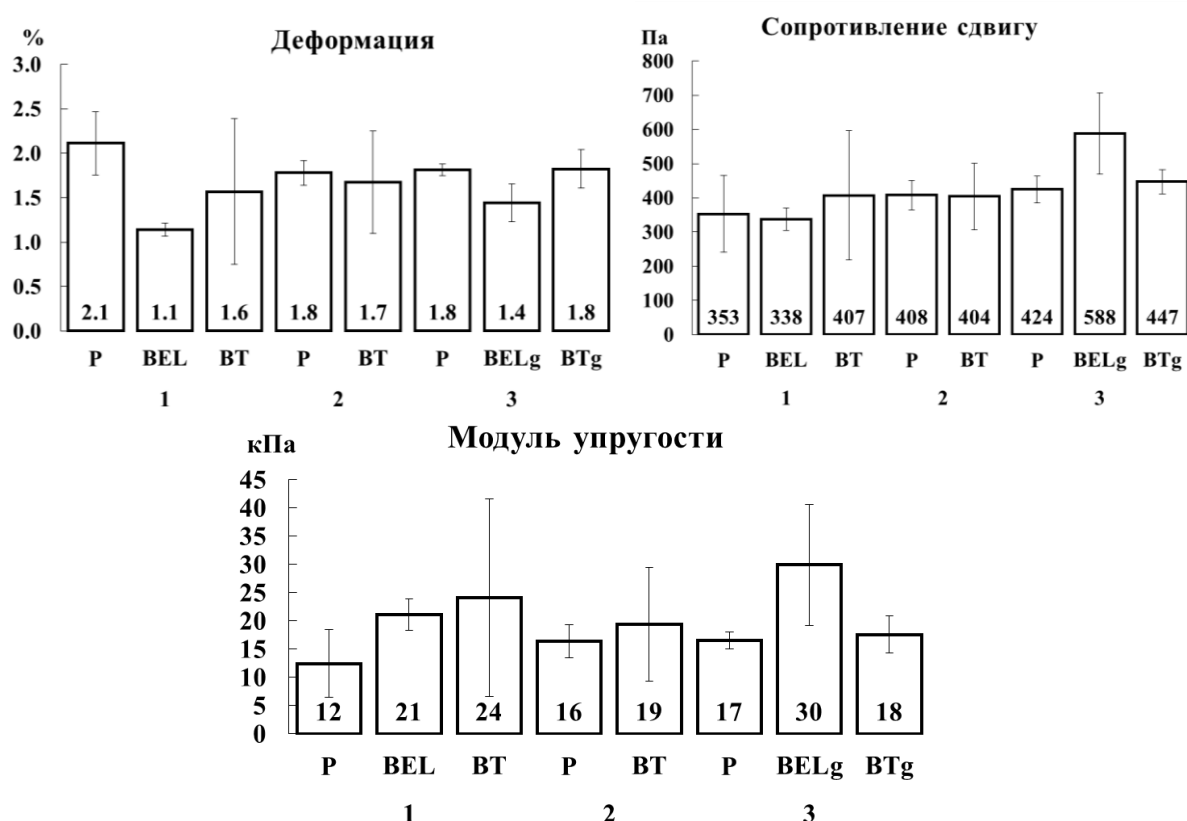


Рисунок 10. Реологические свойства агросерых почв в точке пересечения модулей упругости и вязкости; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая

Корреляционный анализ показал, что крупные частицы оказывают большее сопротивление сдвиговым деформациям. Модуль упругости в диапазоне вязкоупругого поведения обратно зависит от содержания гумуса (-0.6), а деформации при пределе текучести прямо зависит (0.6). Несмотря на то, что эти зависимости, несколько ниже уровня значимости, можно предположить, что с увеличением содержания органического вещества снижается прочность межчастичных связей и увеличивается диапазон пластичного поведения.

По реологическим свойствам агросерые почвы Владимирского Ополья отличаются от соседствующих с ними дерново-подзолистых почв. Диапазон линейного вязкоупругого поведения больше у агросерых почв Владимирского Ополья 0.07-0.10%, чем у дерново-подзолистых почв 0.04-0.06% (Клюева и др., 2020; Умарова и др., 2021). При этом элювиальный горизонт агросерых почв демонстрирует поведение аналогичное элювиальному горизонту в дерново-подзолистых почвах. Структура связей между частицами этих горизонтов жесткая, но слабо устойчива к деформациям. По сравнению с черноземом 0.15-0.25% диапазон упругого поведения у агросерой почвы значительно меньше (Хайдапова и др., 2016, 2021). Предел текучести наблюдается у чернозема при значительно больших деформациях 3-10%, чем у агросерой почвы 1-2%. Таким образом, агросерые почвы Владимирского Ополья более устойчивы к механическим нагрузкам, чем дерново-подзолистые почвы, но существенно менее устойчивы, чем чернозёмы.

Устойчивость пахотного горизонта агросерых почв к разбрызгиванию

Критическая скорость разбрызгивания v_k для агросерых почв

На лабораторной дождевальной установке был проведен эксперимент по измерению потерь массы почвы μ при разных скоростях дождевых капель. Использовались образцы пахотного слоя агросерой почвы (0-20 см) опытного участка АЛСЗ. Размер выборки составил 24 образца. Из данных эксперимента была построена зависимость потерь массы почвы μ от квадрата скорости капель v^2 (рис. 11) и определена критическая скорость разбрызгивания v_k – скорость при которой начинается массовый отрыв частиц от поверхности почвы.

Критическая скорость разбрызгивания v_k определялась путем пересечения линейных аппроксимаций двух участков данных, отвечающих за неразбрызгивающие (а) и разбрызгивающие скорости (б).

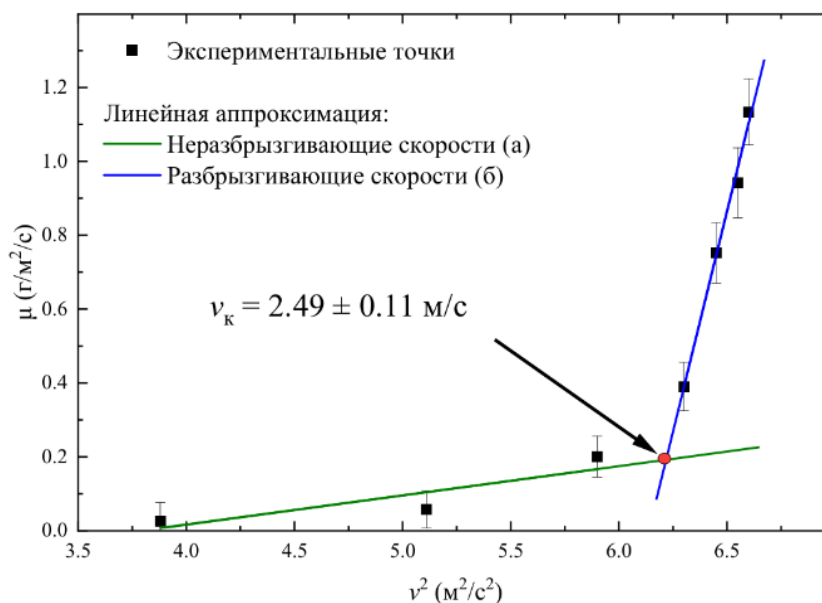


Рисунок 11. Зависимость потерь почвенного материала μ от квадрата скорости капли v^2 .

В результате, полученная величина критической скорости разбрызгивания для пахотного слоя агросерой почвы составила $v_k = 2.49 \pm 0.11$ м/с. Полученная величина с учетом погрешности согласуется с результатом, приведенным в работе М.С. Кузнецова (2015). В данной работе величина критической скорости разбрызгивания для серой лесной среднесуглинистой почвы Владимирской области $A_{\text{пах}}$ (5–20 см) составила $v_k = 2.38$ м/с. Полученное значение критической скорости для агросерой почвы находится между критическими скоростями для чернозема $v_k = 3.0$ м/с и для легкосуглинистых дерново-подзолистых почв $v_k = 2.25$ м/с, определенных в работе (Хан, Кузнецов, 1991).

Было проведено исследование количества потерь почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k для пахотного горизонта почв, входящих в комплекс агросерых почв (агросерой типичной, агрозёма языковатого и агросерой глееватой) (рис. 12). Средние потери почвенного материала составили для агросерой типичной $\mu = 1.05$ (г/м²) *с, агрозёма языковатого $\mu = 0.96$ (г/м²) *с и для агросерой глееватой $\mu = 1.18$ (г/м²) *с. Однако статистически значимых различий в потерях почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k обнаружено

не было. Это может быть обусловлено тем, что разбрызгивание является сложным физическим процессом взаимодействия капель с поверхностью почвы, которая имеет высокую неоднородность. Для выявления данных различий (если они есть) необходимо увеличение количества повторностей для исследуемых почв.

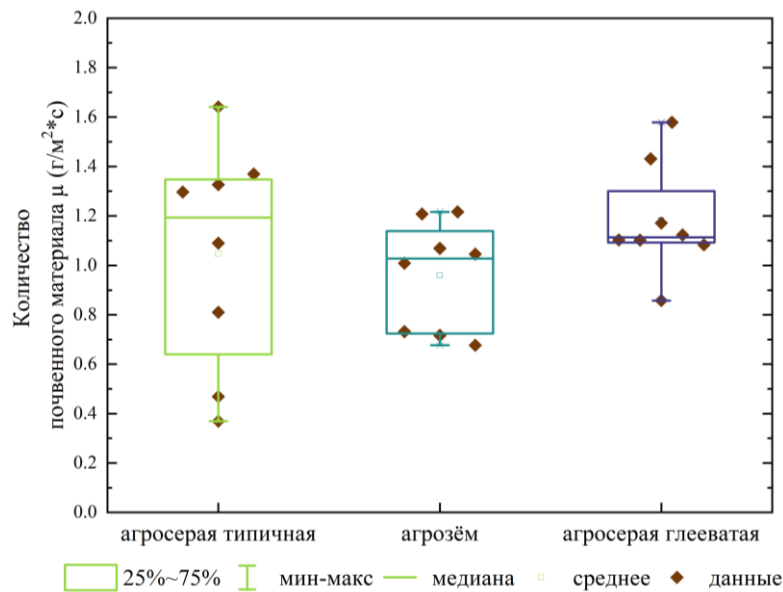


Рисунок 12. Количество потерь почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k

Таким образом, критическая скорость разбрызгивания v_k для агросерых почв ниже, чем у чернозёмов, но выше, чем у легкосуглинистых дерново-подзолистых почв. Статистически достоверных различий в количестве разбрызганного почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k у трёх почв, входящих в комплекс агросерых почв выявлено не было, но агросерая типичная почва продемонстрировала больший разброс в значениях разбрызганного почвенного материала, чем агрозём языковатый и агросерая глееватая почва.

Давление капли дождя при критической скорости разбрызгивания v_k

Общеизвестно, что средняя сила $\bar{f}$ одной капли, с которой она падает на поверхность почвы есть изменение величины ее импульса Δp за время соударения с поверхностью почвы Δt :

$$\bar{f} = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (3)$$

Изменение импульса капли при соударении можно выразить следующим образом:

$$\Delta p = (\alpha + 1)m_0 v \quad (4)$$

где $m_0 \approx \rho \frac{4}{3} \pi r_0^3$ – масса одной капли, ρ – плотность воды, r_0 – радиус капли, v – скорость капли, а параметр α принимает значения от 0 до 1 и характеризует степень упругости соударения ($\alpha = 0$ – соударение абсолютно неупругое, $\alpha = 1$ – соударение абсолютно упругое). Характерное время соударения капли с поверхностью почвы можно оценить как $\Delta t \sim \frac{r_0}{v}$.

Таким образом, среднее давление, которое окажет капля на почву при соударении с ней равняется средней силе, деленной на площадь сечения упавшей капли ($\sigma \approx \pi r_0^2$):

$$\bar{P} = \frac{\bar{f}}{\sigma} = \frac{4}{3}(\alpha + 1)\rho v^2 \quad (5)$$

Как видно из полученного уравнения, среднее давление капли $\bar{P}$, оказываемое на почву при соударении, главным образом зависит от её скорости. Оценочные ограничения на давление капли можно получить, рассмотрев два предельных случая, отвечающие различным параметрам α и Δt (рис. 12). При $\alpha = 1$ и $\Delta t = \frac{2r_0}{v}$, что соответствует случаю абсолютно неупругого соударения за максимальное время, мы имеем нижнюю границу оценки среднего давления капли $P_k \approx 4$ кПа. При $\alpha = 0$ и $\Delta t = \frac{r_0}{v}$ (абсолютно упругое соударение за минимальное время) имеем верхнюю границу $P_k \approx 16$ кПа. Таким образом, давление капли при критической скорости разбрызгивания v_k имеет величину порядка $P_k \sim 10^3$ - 10^4 Па.

Реологические свойства агросерых почв и давление капли при критической скорости разбрызгивания v_k

Под воздействием механических нагрузок, которыми в том числе являются и удары капель о поверхность почвы, происходит разрушение связей между частицами почвы. Это разрушение описывается реологическими кривыми зависимостей модулей упругости G' и вязкости G'' от степени деформации почвы (рис. 13).

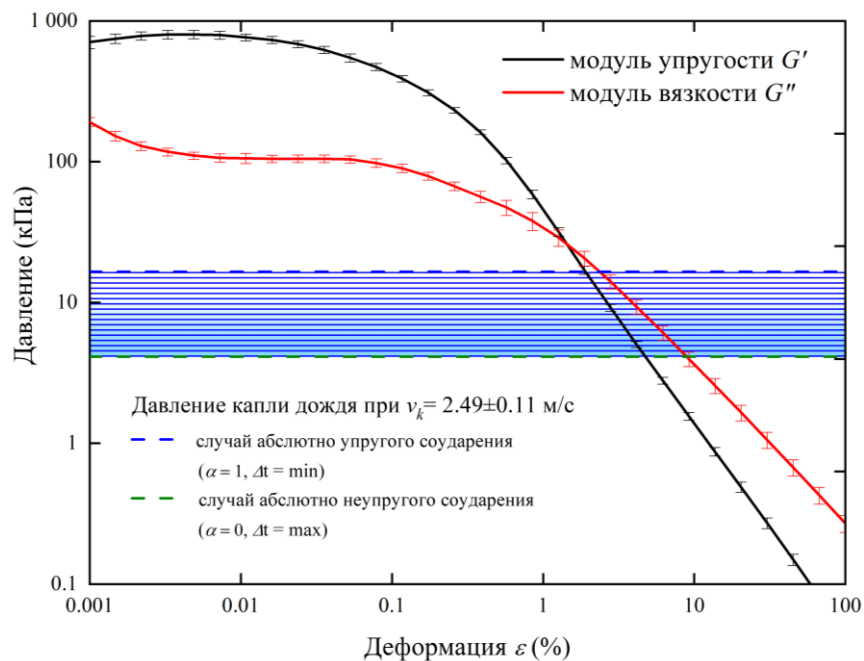


Рисунок 13. Реологические свойства агросерой почвы и давление капли при критической скорости разбрызгивания v_k

Давление капли при критической скорости разбрызгивания P_k ниже, чем энергия связи между частицами при пересечении модулей упругости и вязкости (пределе текучести). Таким образом, реологически определенный предел текучести можно считать характеристикой начального этапа эрозии почв. После предела текучести связи между частицами уже настолько слабые, что под воздействием капель дождя они начинают массово отделяться от поверхности почвы, а в дальнейшем могут попасть в поток дождевых вод и быть перемещены им.

Расчёт фактора эродированности для модели WATEM/SEDEM

Разница между значениями К-фактора для исследованных агросерых почв на основе седиментации и лазерной дифракции составляет 15-26%. Вариация между значениями К-фактора при седиментации составляет всего 4%, а при лазерной дифракции – 8%. Таким образом, для почв, находящихся в одном комплексе, разница в гранулометрическом составе, определенном одним методом, существенного влияния на К-фактор не оказывает. Однако, нельзя использовать в одной работе значение К-фактора, определенные на основе методов седиментации и лазерной дифракции.

Значение К-фактора было рассчитано для агросерых почв опыта АЛСЗ, всего были использованы данные 27 образцов: содержание гумуса в слое 0-20 см, средний диаметр агрегатов и осредненные данные по гранулометрическому составу: по седиментации и лазерной дифракции. Среднее значение К-фактора (рис. 14 а) определенное по данным лазерной дифракции составило 73 кг*ч/(МДж*мм), что на 20% выше, чем по данным седиментации – 58 кг*ч/(МДж*мм). Так как наиболее распространённым методом определения грансостава в России является метод седиментации, далее будем использовать его результаты. Значение К-фактора для исследованных агросерых почв составляет от 49 кг*ч/(МДж*мм) до 64 кг*ч/(МДж*мм) и сопоставимо с К-фактором серых лесных почв Орловской области: темно-серые лесные почвы - 52 кг*ч/(МДж*мм), серые лесные – 61 кг*ч/(МДж*мм), светло-серые лесные – 63 кг*ч/(МДж*мм) (Фомичева и др., 2024).

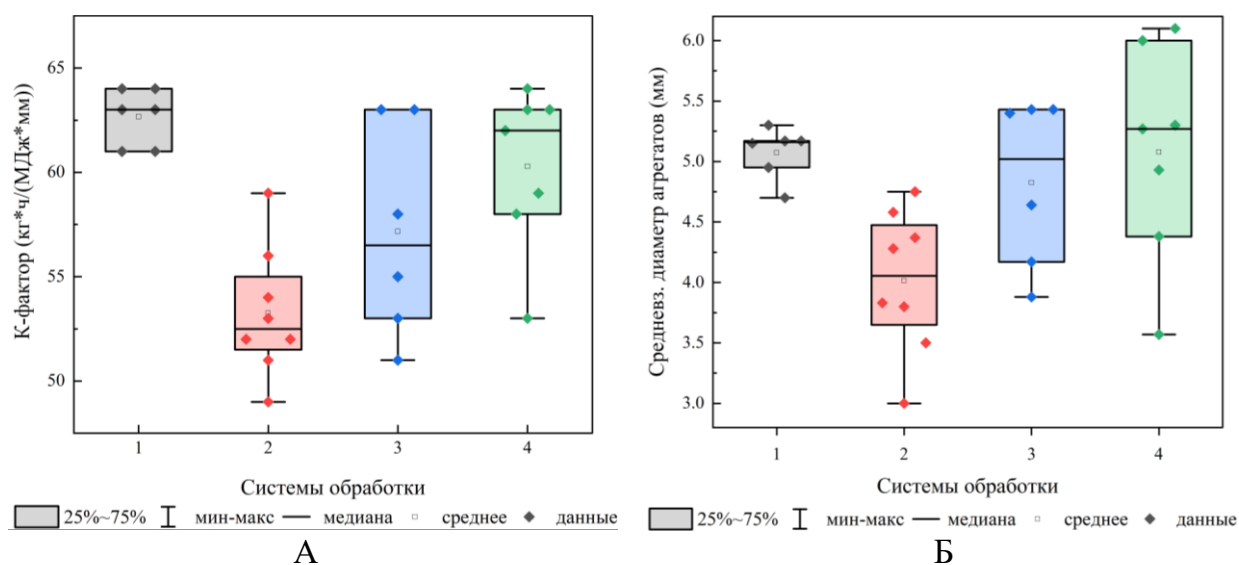


Рисунок 14. а) К-фактор; б) Средний диаметр агрегатов; при системах обработки: 1-отвальная, 2-комбинированно-плоскорезная, 3- комбинированно-ярусная, 4- противоэрозионная

Обращает на себя внимание, что К-фактор примерно повторяет тенденцию среднего диаметра агрегатов (рис. 14 а,б). Средние значения К-фактора при отвальной и противоэрозионной обработках составляют 63 и 60 кг*ч/(МДж*мм) соответственно, а при комбинированно-плоскорезной и комбинированно-ярусной 54 и 56 кг*ч/(МДж*мм). Наименьший К-фактор при комбинированно-плоскорезной системе обработки. Положительное влияние мелких обработок на устойчивость почв к смыву подтверждается обзором противоэрозионных мероприятий в России (Жидкин и др., 2024), в котором показано, что при безотвальной обработке

происходит снижение смыва более чем на 70% по сравнению с отвальной обработкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агросерые почвы имеют высокие показатели структурности и водоустойчивости. Система обработки определяет структурное состояние агросерых почв в слое 0-20 см, что проявляется в соотношении водопрочных агрегатов. В слое 20-40 см большое влияние на агрегатный состав агросерых почв оказывает наличие второго гумусового горизонта. Слой 20-40 см, у агросерой почвы со вторым гумусовым горизонтом более агрегирован, чем слой 0-20 см. Это связано с тем, что у агросерой почвы со вторым гумусовым горизонтом содержание гумуса в слое 20-40 см выше в среднем на 0.5%, чем в слое 0-20 см.

Метод главных компонент показал, что соотношение агрегатов в пахотных, элювиальных и иллювиальных горизонтах отличается друг от друга. При этом наибольший разброс в агрегатном составе у иллювиальных горизонтов, а наименьший у элювиальных.

Наиболее однородный агрегатный состав агросерых почв с высокими значениями коэффициента структурности сформировался при комбинированно-плоскорезной системе обработки. При плоскорезной системе обработки формируется агрегатный состав агросерых почв с меньшим количеством агрегатов крупнее 7 мм.

Агрегаты агросерых почв при капиллярном насыщении водой на два порядка менее прочные, чем в воздушно-сухом состоянии. Прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв, в соответствии с увеличением количества илистых частиц. Прочность насыщенных агрегатов пахотных горизонтов уменьшается с уменьшением содержания гумуса.

Системы обработки почв оказывают влияние на реологические свойства пахотного горизонта агросерых почв, но это влияние не одинаково на разных этапах разрушения структуры межчастичных связей. В диапазоне вязкоупругого поведения агросерая почва при противоэрозионной системе обработки оказывает большее сопротивление сдвигу. Предел текучести достигается быстрее в агросерой почве при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки, что говорит о большей хрупкости связей между почвенными частицами пахотного горизонта при этих системах обработки.

По реологическим свойствам агросерые почвы Владимирского Ополья отличаются от соседствующих с ними дерново-подзолистых почв. Диапазон линейного вязкоупругого поведения больше у агросерых почв Владимирского Ополья, чем у дерново-подзолистых почв. При этом элювиальный горизонт агросерых почв, как и в дерново-подзолистых почвах, имеет жесткие связи между частицами, но узкий диапазон деформаций и демонстрирует хрупкое поведение. По сравнению с черноземом диапазон упругого поведения у агросерой почвы значительно меньше. Однако прочность межчастичных связей у агросерой почвы выше, чем у чернозема. Предел текучести наблюдается у чернозема при значительно больших деформациях, чем у агросерой почвы. Таким образом, агросерые почвы Владимирского Ополья более устойчивы к механическим нагрузкам, чем дерново-подзолистые почвы, но существенно менее устойчивы, чем чернозёмы.

Сравнение реологических свойств показало, что пахотный слой агросерых почв на приводораздельном участке (АЛСЗ) и на склоне имеет схожее реологическое

поведение, но есть ряд различий. Диапазон линейного вязкоупругого поведения имеет одинаковую продолжительность у пахотного слоя агросерых почв на участке АЛСЗ и на склоне. Также максимальное сопротивление сдвигу наблюдается при одинаковой деформации. Однако само максимальное сопротивление сдвигу τ_{max} у агросерых почв на склоне ниже, чем на участке АЛСЗ. Переход почвы в текучее состояние наступал быстрее у агросерых почв при ярусной и противоэрозионной системах обработки, чем у почв на склоне. Однако, сопротивление сдвигу τ в точке пересечения модулей упругости и вязкости у агросерых почв на склоне ниже, чем у агросерых почв на участке АЛСЗ.

Величина критической скорости разбрызгивания для пахотного слоя агросерой почвы составила $v_k = 2.49 \pm 0.11$ м/с. Статистически достоверных различий в количестве разбрызганного почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k у трёх почв, входящих в комплекс агросерых почв не выявлено, но агросерая типичная почва продемонстрировала больший разброс в значениях разбрызганного почвенного материала, чем агрозём языковатый и агросерая глееватая почва.

Давление капли при критической скорости разбрызгивания P_k ниже, чем энергия связи между частицами при пересечении модулей упругости G' и вязкости G'' (пределе текучести). Таким образом, предел текучести, можно считать характеристикой начального этапа эрозии почв, когда под воздействием капель дождя, которые движутся с критической скоростью разбрызгивания v_k от поверхности почвы, начинают массово отделяться частицы.

Фактор эродированности (К-фактор) для агросерых почв Владимирского Ополья при определении методом лазерной дифракции на 15-26% больше, чем при седиментационном определении. Значение К-фактора при одном методе определения грансостава имеют вариацию 4-8%. На значение К-фактора оказывают влияние системы обработок почв, в первую очередь через агрегатный состав пахотного слоя. Корреляция К-фактора со средним диаметром агрегатов составила 0.68 для агросерых почв Владимирского Ополья. Значение эродированности (К-фактор) агросерой почвы ниже при комбинированно-плоскорезной системе обработки.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее однородный агрегатный состав агросерой почвы с высоким значением коэффициента структурности сформировался при комбинированно-плоскорезной системе обработки. При плоскорезной системе обработки формируется агрегатный состав с меньшим количеством агрегатов крупнее 7 мм.
2. Диапазон линейного вязкоупругого поведения у пахотного слоя агросерых почв составляет 0.07-0.010%, предел текучести наблюдается при деформации 1-2%. Агросерые почвы Владимирского Ополья более устойчивы к механическим нагрузкам, чем дерново-подзолистые почвы, но существенно менее устойчивы, чем чернозёмы. Диапазон линейного вязкоупругого поведения у агросерых почв одинаков на склоне и на приводораздельной территории. Сопротивление сдвигу τ у агросерых почв на склоне меньше, чем у почв на приводораздельной территории.

3. Предел текучести наступает раньше в агросерой почве при ярусной и противоэрозионной системах обработки по сравнению с комбинированно-плоскорезной и отвальной системами обработки.
4. Величина критической скорости разбрызгивания для пахотного слоя агросерой почвы составила $v_k = 2.49 \pm 0.11$ м/с.
5. Предел текучести можно считать качественной характеристикой начального этапа эрозии почв, так как давление капли при критической скорости разбрызгивания P_k ниже энергии связи между частицами при пределе текучести.
6. Фактор эродированности (К-фактор) для агросерых почв Владимирского Ополя составляет от 54 до 63 кг*ч/(МДж*мм). Значение эродированности (К-фактор) агросерой почвы ниже при комбинированно-плоскорезной системе обработки.

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus и RSCI:

1. **Мищенко А.В.**, Карпова Д.В., Иванова Е.А., Абдулханова Д.Р., Петросян Р.Д. Структурное состояние пахотных серых лесных почв Владимирского ополя при различных способах обработки // *Агрохимический вестник*. — 2020. — № 5. — С. 9-16. EDN: YXRUDN Импакт-фактор 0.850 (РИНЦ). Вклад автора в печатных листах: (0.5/0.4). (Здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах).
2. Хайдапова Д.Д., **Мищенко А.В.**, Карпова Д.В. Реологические свойства почв как одна из характеристик физической среды обитания растений // *Агрофизика*. — 2022. — № 1. — С. 17–21. EDN: QVKZAM Импакт-фактор 0.396 (РИНЦ) (0.3/0.15)
3. **Хирк А.В.**, Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В., Петросян Р.Д. Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополя: состав и прочность // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. — 2024. — № 120. — С. 107-135. EDN: MQGTZJ Импакт-фактор 1.293 (РИНЦ) (1.63/1.3)