

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи

Хирк Анастасия Вячеславовна

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

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научные руководители:

доктор сельскохозяйственных наук

Карпова Дина Вячеславовна;

кандидат биологических наук, доцент

Хайдапова Долгор Доржиевна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	9
1.1. Структура почв и эродированность.....	9
1.2. Особенности агросерых почв Владимирского Ополья.....	15
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	18
2.1. Физико-географические условия и климат Владимирского Ополья.....	18
2.2. Объекты исследований.....	21
2.2.1. Участок опыта по Адаптивно-ландшафтным системам земледелия.....	22
2.2.2. Объект 2. Агросерые почвы на склоне к реке Каменка.....	30
2.3. Методы исследования.....	35
2.3.1. Агрохимические характеристики.....	35
2.3.2. Агрофизические характеристики.....	36
2.3.3. Реологические параметры.....	38
2.3.4. Определение эродированности.....	40
2.3.5. Статистическая обработка данных.....	42
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ.....	44
3.1. Агрохимические свойства пахотного слоя агросерых почв.....	44
3.1.1. Объект 1. Участок опыта АЛСЗ.....	44
3.1.2. Объект 2. Склоновое поле.....	52
3.2. Гранулометрический и микроагрегатный состав агросерых почв.....	55
3.3. Структурное состояние агросерых почв.....	58
3.3.1. Влияние обработок на структуру пахотного слоя агросерой почвы	58
3.3.2. Особенности агрегатного состава почвы со вторым гумусовым горизонтом.....	64
3.3.3. Структурное состояние агросерых почв на склоне.....	70
3.3.4. Прочность почвенных агрегатов агросерых почв.....	74
3.4. Реологические свойства агросерых почв.....	77

3.4.1. Влияние систем обработок на реологические свойства агросерых почв.....	77
3.4.2. Реологические свойства агросерых почв на склоне.....	82
3.5. Устойчивость пахотного горизонта агросерых почв к разбрызгиванию.....	90
3.5.1. Критическая скорость разбрызгивания v_k для агросерых почв.....	90
3.5.2. Давление капли дождя при критической скорости разбрызгивания v_k	93
3.5.3. Реологические свойства агросерых почв и давление капли при критической скорости разбрызгивания v_k	94
3.6. Расчёт эродируемости агросерых почв для модели WATEM/SEDEM.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	103
ВЫВОДЫ.....	106
ЛИТЕРАТУРА.....	107
ПРИЛОЖЕНИЯ	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Владимирское Ополье является районом старого освоения с плодородными почвами. Использование агросерых почв в сельскохозяйственном производстве в условиях изменяющегося климата приводит к изменению их структурного состояния. Разные по интенсивности приёмы и системы обработки почв оказывают неодинаковое воздействие на почву, что проявляется в структурном состоянии почв. От структурного состояния почвы зависит её эродлируемость. Оценка устойчивости структуры почв к механическим и водным воздействиям является актуальной задачей агрофизики в условиях изменяющегося климата и увеличения частоты ливневых осадков.

Степень разработанности темы исследования. Почвенный покров Владимирского Ополья отличается высокой неоднородностью и наличием второго гумусового горизонта. Владимирское Ополье – это район старого освоения с плодородными почвами, в котором ведётся активная разработка и усовершенствование адаптивно-ландшафтного подхода в земледелии (Волощук, 2001; Окорков, 2003; Кирюшин, 2004), исследуется влияние систем обработки на структурное состояние агросерых почв (Зинченко, 2019, 2020, 2023). Одна из первых работ посвящена агрохимической характеристике почв Владимирского Ополья (Еремин, 1967), вопросы почвообразования и палеокриогенеза рассмотрены в работах (Алифанов, 1992; Гугалинская, 1997; Макеев, 2005). Разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия для Владимирского Ополья посвящены кандидатские диссертации (Кулинский, 1994; Савастру, 1999) и докторская диссертация (Волощук, 2001). Оценка агроэкологического состояния почв Владимирского Ополья посвящены кандидатские диссертации (Морев, 2017; Щукин, 2017) и докторская диссертация (Карпова, 2009), биологическая оценка почв проведена в кандидатской диссертации (Зинченко, 2011). Пространственная вариабельность агрофизических характеристик комплекса почв Владимирского Ополья детально рассмотрена в кандидатских диссертациях

(Тымбаев, 2004; Буюева, 2005), в докторской диссертации (Гончаров, 2010), особо исследованы изменчивость водопроницаемости (Дядькина, 2004) и устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям (Николаева, 2016), однако в этих работах не проводились исследования реологических свойств почв Владимирского Ополья и влияния систем обработок через структурное состояние на эродируемость почв.

Цель и задачи. Целью настоящей работы явилось исследование структурного состояния, реологических свойств и эродируемости агросерых почв Владимирского Ополья и оценка влияния на них систем обработки почвы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы 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. Получены реологические характеристики агросерых почв Владимирского Ополья при разных системах обработки методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria). 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.

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

Объект и предмет исследования. Объектом исследования явились агросерые почвы, а предметом исследования стало структурное состояние этих почв.

Методология диссертационного исследования. В работе были использованы лабораторные методы агрофизики, а также методы эрозиоведения. Полученные результаты подвергались статистической обработке.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Наиболее однородный агрегатный состав агросерых почв с высоким значением 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. Эродируемость почв ниже при комбинированно-плоскорезной системе обработки.

Степень достоверности и апробация результатов. 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 0.05, выводы достоверны. 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.

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.

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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Структура почв и эродлируемость

Эрозии подвержено 1094 млн. га площади земного шара, в то время как от водной эрозии страдает 751 млн. га земель (Lal, 2003). Важность проблемы эрозии почв будет только возрастать из-за нестабильности климата (Lal, 2001). Рост температур и изменение характера осадков будут оказывать всё большее влияние на производство биомассы растениями, влажность почвы, скорость инфильтрации и сток воды, а, следовательно, и на эрозию почвы (Li, Fang, 2016; Guerra et al., 2017). К новым условиям необходимо адаптировать землепользование и управление сельскохозяйственными культурами. Проблема эрозии почв – одна из основных угроз для продовольственной безопасности в мире (Gobin et al., 2004).

В России эрозия почв также является одной из основных причин деградации сельскохозяйственных земель. В результате эрозии почв происходит загрязнение и деградация речных сетей. Эрозионные потери в РФ составляют более 500 млн тонн плодородного почвенного вещества (Иванов и др., 2020). В течение последних 20 лет темпы прироста эродированных земель каждые пять лет составляют 6–7%, то есть примерно 1.5 млн га в год (Глушко, 2010). Водная эрозия является преобладающим типом эрозии почв на Восточно-Европейской равнине. Изменения климата привели к трансформации значимых для эрозии элементов климата: повысилась температура воздуха, увеличилось количество осадков и частота ливней, что привело к изменению эрозионного потенциала дождя и слоя склонового талого стока (Жидкин и др., 2023).

Эрозия почв – это сложное многофакторное природно-антропогенное явление. Технологические, экономические и социальные аспекты имеют не меньшее значение, чем природные факторы – растительность, климат, геоморфологические условия и почвы. Так, несмотря на увеличение

эрозионного потенциала дождей, уменьшение площади пашни привело к уменьшению суммарного смыва на сельскохозяйственных землях. Для исследуемой Владимирской области сокращение площади пашни составило на 2014 г. 18.3% по сравнению с 1980 г. При этом убыль обрабатываемой пашни составила 45.0%, в результате чего интенсивность смыва уменьшилась на 19.5% (Литвин, 2017). Сейчас ведутся программы по возвращению залежных земель в пашню, что требует серьезного планирования противоэрозионной организации территорий и применения противоэрозионных технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Для этого необходимо всестороннее исследование факторов, влияющих на эрозию почв: рельефа, климата, эродированности почв, систем землепользования и противоэрозионных мероприятий.

Почва – это сложная многокомпонентная система, обладающая иерархичным строением. В структуру организовано твердое вещество почвы, представленное элементарными почвенными частицами, микро- и макроагрегатами (Bronick, Lal, 2005; Yudina, Kuzyakov, 2023). Почва постоянно подвергается большому количеству разнообразных напряжений и деформаций, приводящих к перемещению почвенной массы. В результате эрозионных процессов почвенная масса может быть перенесена на значительные расстояния до нескольких тысяч метров (Макаров, 2024).

Податливость почвы разрушающему действию талых, дождевых и ирригационных вод называется эродированностью (Швебс, 1981; Кузнецов, Глазунов, 2019). Это понятие обратно противоэрозионной устойчивости. Эродированность поверхности отличается для почв разных генетических типов, подтипов и разновидностей (Мирцхулава, 1970; Заславский, 1983; Кузнецов, 1994). Эродированность почв зависит от структуры, текстуры и агрегатного состава почв и прочности агрегатов, а также от широкого спектра почвенных свойств: от содержания и состава гумуса, количества оксидов железа, марганца, алюминия и других катионов в поглощающем комплексе, наличия карбонатов и солей.

Таким образом, эродлируемость является комплексной характеристикой для почв. Эродлируемость можно определять экспериментально, но эти определения являются очень трудо- и энергозатратными (Прущик и др., 2019). Определяют эродлируемость с помощью специальных полевых и лабораторных установок по созданию искусственного дождя и потоков (Сухановский и др., 2015). При моделировании эрозии расчёт эродлируемости почв проводится на основе данных о гранулометрическом составе и содержании гумуса. Наибольший вклад в эродлируемость почв вносит содержание гумуса, а остальные свойства тесно связаны с гранулометрическим составом. Однако сводить эродлируемость только к содержанию гумуса и гранулометрическому составу – упрощение, так как почва является структурно организованной средой. Структура почв обладает эмерджентностью и иерархичностью, которые проявляются на всех уровнях организации структуры почвы и соответствующих им типах агрегатов: элементарных почвенных частиц, микро- и макроагрегатов. Почвенные агрегаты различаются по механизмам формирования, устойчивости и продолжительности жизни, а значит, и по функциям (Bronick, Lal, 2005; Yudin, Kuzyakov, 2023). Типы почвенной структуры и формы макроагрегатов почв зависят в первую очередь от особенностей процессов почвообразования. При этом тип землепользования влияет на структуру почвы. При сельскохозяйственном использовании происходит трансформация почв на всех уровнях организации.

Тип землепользования влияет на размер структурных фракций. Например, содержание глыбистой фракции в пахотных вариантах дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного оказалось больше, чем в аналогах с естественной растительностью (Умарова и др., 2021).

На сельскохозяйственных полях нарушается естественный процесс образования агрегатов. Длительная обработка почвы и севооборот влияют на форму агрегатов и характеристики пор. Так при разнообразном севообороте пористость агрегатов выше, а их форма более округлая, чем при монокультуре

кукурузы (Lars et al., 2016). Чем лучше агрегирована почва, тем устойчивее она к эрозионному разрушению (Misra, Teixeira, 2001).

Оптимальные физические условия для растений обеспечивает хорошая агрономически ценная структура. Для произрастания растений наиболее подходящей считается округлая зернистая форма агрегатов пахотного горизонта. Важно соотношение агрегатов разного размера. Агрономически ценными считаются агрегаты размером от 10 до 0.25 мм (Теории и методы физики почв, 2000). Перетирание почвы при обработках, уплотнение при проходе техники, большие дозы удобрений ведут к разрушению почвенных агрегатов, увеличению количества глыб и пыли. Пахотный горизонт становится непригодным для растений. В результате меньшей связи между частицами почвы, возрастает риск водной эрозии.

Первым этапом ливневой эрозии почв является отрыв частиц от поверхности почвы в результате удара капли дождя о поверхность почвы. На деструктивное воздействие дождя на оголенную почву указывал основоположник почвоведения В.В. Докучаев (Докучаев, 1949) и многие его последователи. Эллисон (Гудзон, 1974) утверждал, что основное действие дождя заключается в отделении частиц почвы от поверхности, а поверхностного потока в перемещении этих частиц. Х.Х. Беннет и Н.И. Сус писали, что капли дождя разбивают почвенные агрегаты и образуют на почвенной поверхности тонкий разжиженный слой, который закупоривает поры и, тем самым, ослабляет впитывание влаги (Сус, 1949). У.Х. Твенхофел (Твенхофел, 1936). дал подробное описание действия падающей капли на влажные глину и песок. Он описал размер и форму ямок, производимых каплями при падении. Он указывал на то, что при падении с какого-либо предмета, капли становятся крупнее, а ямки от них – круглее из-за потери горизонтальной составляющей. Г.И. Швебс свёл все влияние капель дождя к разрушению структуры, заплыванию почвы, образованию корки и затруднению впитывания за счет кольматажа. Разбрызгивание, по мнению Г.И. Швебса, совместно с ударами капель, увеличивает мутность потока

(Швебс, 1968). Дж. Мойерсонс и Дж. Де Плой (Торнз, 1984) описывали следующий тип процесса разбрызгивания, который называли ползучестью при капельной эрозии или капельным крипом. Этот процесс характеризуется горизонтальными движениями частичек по влажному склону, в результате чего и происходит смещение слоя вниз. Явление оползания, в противоположность сальтации, зависит от длины склона и характеризуется прерывистым перемещением отдельных частиц. Явление капельного крипа было подтверждено Р.П. Морганом, который экспериментально определял интенсивность капельно-дождевой эрозии на склонах 6–11°. Капли падают на склон, в несколько секунд покрывая его толстым слоем грязи, а затем этот слой дробится на мелкие части, которые дальше сдвигаются под действием ветра (Morgan, 1978). В книге «Теоретические основы эрозиоведения» Г.И. Швебс указывал, что эрозия разбрызгивания происходит, если преобладает перемещение частиц вдоль склона. Частицы перемещаются вместе с брызгами капель дождя, падающими на влажную почву (Швебс, 1981).

Таким образом, эрозия является для почв дезагрегирующим агентом. Под воздействием дождевых капель и потока происходит разрушение почвенных агрегатов. Устойчивость агрегатов к разрушению зависит от прочности связей внутри агрегатов.

Прочность взаимосвязи между почвенными частицами, микроагрегатами и органическим веществом можно оценить с помощью методов реологии. На жесткость, структурную стабильность и поведение при сдвиге оказывают влияние содержание органического вещества, гранулометрический состав почвы, минеральный состав, наличие карбонатов и состав катионов (Tarchitzky, Chen, 2002; Carotenuto, Minale, 2016). При влажности, близкой к полной влагоёмкости, высокое содержание гумуса обеспечивает эластичность связей между почвенными частицами. В результате чего для достижения предела текучести необходима большая деформация почвы. Однако при меньшей влажности почвы эта связь была менее четкой (Markgraf et al., 2012; Pértile et al., 2016).

Реологическое поведение частиц пахотного горизонта отличается от поведения частиц в ненарушенном гумусовом слое. В естественных почвах в значительной степени выражены конденсационно-кристаллизационные типы структурных связей, а в пахотных горизонтах преобладают коагуляционные структуры (Клюева, Хайдапова, 2020).

Почвы Владимирского Ополя обладают высоким потенциалом. По характеристикам они близки к чернозёмам, что отмечал ещё В.В. Докучаев, описывая «Юрьевский чернозём». Однако агросерые почвы менее устойчивы, чем чернозёмы. Поэтому важно оценивать влияние разных видов обработки на структурное состояние агросерых почв. Высокая пестрота почвенного покрова ведёт к тому, что на поле разные участки могут реагировать на механическое воздействие неодинаково.

По данным В.В. Окоркова процессы водной эрозии во Владимирском Ополе развиты на пашне с уклоном более 2-3°. Ранее площадь эродированных почв по области оценивалась в примерно 18.1%, включая около 5% дерново-подзолистых и более 40% серых лесных. Причины различной эродированности в значительной мере связаны с различиями в гранулометрическом составе этих почв. Серые лесные почвы отличаются от аллювиальных и дерново-подзолистых почв высоким содержанием крупной пыли около 40% и средней пыли 10-15% практически во всем почвенном профиле. Содержание илистой фракции составляет от 10 до 19% в пахотном слое серых лесных почв (Окорков, 2010). Высокое содержание ила делает серые лесные почвы Ополя склонными к переуплотнению. Так, в засушливые периоды плотность почвы в поверхностном слое 5-10 см составляет 1.35-1.40 г/см³, что превышает оптимальную плотность: 1.0-1.3 г/см³. Переуплотнение почв способствует развитию процессов водной эрозии (Окорков и др., 2017).

Разрушение структурного сложения является одной из причин обеднения почв активным органическим веществом. Серые почвы при нарушении структуры теряют органическое вещество быстрее, чем чернозёмы. Серая лесная почва менее устойчива к физическим воздействиям, чем чернозем

типичный. Степень физической защищенности содержащегося в серой лесной почве органического вещества меньше, чем в чернозёме (Семенов и др., 2015; Хайдапова и др., 2022). В сильноэродированных серых почвах снижается микробная биомасса и, скорость минерализации (Галицкая, 2010; Завьялова и др., 2020). Критический запас гумуса серых лесных почв Владимирского Ополья составляет 70.8 т/га в слое почвы 0-50 см. Ниже него использование для сельскохозяйственного производства этих почв нецелесообразно (Кузнецов, 2011).

Для снижения водно-эрозионных процессов на серых лесных почвах Ополья с уклоном пашни более 2-3° из-за высокого содержания крупно- и среднепылеватых частиц необходимо формирование водопрочной структуры почв. Для этого требуется дополнительное внесение на склоновую пашню органического вещества. Обогащение пашни органическим веществом может быть обеспечено путём внедрения специальных почвозащитных севооборотов с высоким удельным весом многолетних трав (Волощук, 2004). Создание мульчирующего слоя из оставленной на полях измельченной соломы зерновых культур может снизить скорость водного потока. Особая роль на склоновой пашне в повышении устойчивости серых лесных почв к разрушению водой принадлежит известкованию (Окорков, 2010).

1.2. Особенности агросерых почв Владимирского Ополья

Микрорельеф Владимирского Ополья представляет из себя регулярную сетку из мелких блюдцеобразных понижений и неясных повышений. Расстояние между западинами составляет 15-20 м. Образование такого микрорельефа характерно для всех ополей, бывших во времена оледенений перегляциальными тундрами. Существуют различные представления о причинах возникновения микрорельефа, но неоспоримо то, что он является причиной контрастности почв ополей на высоком таксономическом уровне. А.Н. Тюрюканов и Т.Л. Быстрицкая назвали эти два самостоятельных, но генетически сопряженных типа почв в повышениях и понижениях

микрорельефа – ополец и ополица и объясняли их образование палеопойменными процессами. (Тюрюканов, Быстрицкая, 1971) В.М. Алифанов (Алифанов, 2010) связывает образование темноцветного гумусового горизонта в западинах с гидроморфным этапом развития центра Русской равнины и палеокриогенезом, когда происходило мерзлотно-гидроморфное образование почв лугово-болотного типа в микропонижениях.

В понижениях реликтового криогенного микрорельефа находится второй гумусовый горизонт (Величко, Морозова, 1975). Второй гумусовый горизонт имеет почти черный цвет, плотное сложение, плитчато-крупитчатую структуру и резко выраженный гуматный состав гумуса. Характерную для второго гумусового горизонта языковатую нижнюю границу А.А. Величко и Т.Д. Морозова объяснили процессами морозобойного растрескивания и усыхания сезонного характера во время суббореального похолодания. При этом морозобойное растрескивание второго гумусового горизонта произошло уже после формирования полигонально-блочного рельефа, так как языковатость второго гумусового горизонта не связана со следующими элементами: клиновидная форма второго гумусового горизонта встречается и на блоках, и в межблочьях, и на склонах блоков.

А.Д. Макеев и И.В. Дубровина также считают второй гумусовый горизонт реликтом мерзлотно-гидроморфной стадии почвообразования позднеледникового времени, а формирование палеокриогенных западинных комплексов связывают с заключительными этапами лёссового осадконакопления. Таким образом, второй гумусовый горизонт был погребён в процессе финального осадконакопления (Макеев и др., 2006). В дальнейшем, во времена атлантического оптимума голоцена, когда уже был сформирован второй гумусовый горизонт в профиле серых лесных почв, наиболее сильно проявился процесс оподзоливания. Интенсивность оподзоливания максимальна в почвах со вторым гумусовым горизонтом и постепенно снижается при удалении от микропонижений, ими занятых. (Шеин и др., 2002).

Следовательно, комплекс можно описать таким образом: в центре микропонижения находится серая лесная почва со вторым гумусовым горизонтом. Эти участки видны на пашне по более темной окраске. Второй гумусовый горизонт часто припахан. При движении к повышенному участку мощность второго гумусового горизонта уменьшается, и он пропадает из профиля. При этом происходит и уменьшение мощности подзолистого горизонта и степени оподзоливания почвы до серых лесных, без признаков оподзоливания и серых лесных остаточных карбонатных на микроповышениях (Шишкина и др., 2001; Чижикова и др., 2009). В таком виде этот комплекс существует со времен атлантического оптимума. По сравнению с атлантическим оптимумом количество осадков уменьшилось. Активное сельскохозяйственное использование выравнило микрорельеф. Однако стабильность комплекса Ф.Р. Зайдельман объясняет поддержкой актуального водного режима почв, перераспределением поверхностного и внутрипочвенного стока по рельефу. Причем это перераспределение, как и во всех почвах Нечерноземья, наиболее активно происходит в весенний период (Зайдельман, Рыдкин, 2003).

На современном этапе почвообразования почвы Владимирского Ополья имеют признаки двух этапов развития: лесного и степного. Степной этап характеризуется мулловым типом гумуса во втором гумусовом горизонте и наличием первичных минералов. (Карпова и др., 2018). О лесном этапе почв Владимирского Ополья говорит наличие грубых растительных остатков древесного происхождения и гумусово-глинистых кутан в иллювиальных горизонтах. Основным процессом передвижения материала и дифференциации профиля является лессиваж. В илистой фракции доминируют смешаннослойные образования. Преобладающими компонентами тонкой и средней пыли серых лесных почв являются слюда, кварц, К-полевые шпаты. Во фракции тонкой пыли второго гумусового горизонта преобладающие минералы – кварц и полевой шпат. Наибольшее

количество элементов питания сосредоточено в илистой и тонкопылевой фракциях.

Таким образом, палеокриогенез как экологический фактор изменил направление почвообразовательного процесса на уровне почвенного типа и сформировал комплексную структуру почвенного покрова центральной России (Овчинникова и др., 2020). Почвы Владимирского Ополья имеют большую вариабельность в свойствах пахотных горизонтов. Например, они различаются по гидротермическому режиму: серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом прогреваются и остывают медленнее, чем фоновые серые лесные почвы, их температура отличается большей инертностью и меньшим размахом годовых колебаний (Архангельская, 2008).

Контрастность почвенного покрова Владимирского Ополья приводит к тому, что в агрономическом отношении комплекс серых лесных почв неоднороден. Потенциальное плодородие серых лесных почв микроповышений ниже, чем у почв микропонижений со вторым гумусовым горизонтом. (Шеин и др., 2017). Также особенности почвенного покрова, значение кислотности и содержание гумуса в пахотном горизонте могут играть значительную роль в распределении подвижных форм фосфора и калия (Карпова и др., 2016) и на их доступность для растений (Рогова и др., 2018). Доступность подвижного фосфора и обменного калия зависит от погодных условий, так как при высоких температурах и низкой влажности преобладают процессы иммобилизации (Окорков и др., 2015).

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Физико-географические условия и климат Владимирского Ополья

Владимирское Ополье представляет из себя плато с высотами водоразделов от 160 до 230 м над уровнем моря. Плато сильно расчленено глубоко врезынными речными долинами. Коренные породы Владимирского Ополья представлены в основном верхнеюрскими глинами, песчаниками и нижнемеловыми глауконитовыми песками. Коренные породы на водоразделах

залегают на отметках 130-150 м, а в долинах рек – 80-100 м. В переуглублениях рельефа встречаются субаквальные, водно-ледниковые отложения окского оледенения. Днепровская морена перекрывает все элементы доднепровского рельефа слоем около 10-15 м. Выше залегают флювиогляциальные, лимногляциальные и древнеаллювиальные породы (Окорков, 2021).

Рельеф представлен обширными водораздельными холмами с выположенными вершинами и пологими протяженными склонами. Водораздельные поверхности сильно расчленены системой балок с пологими задернованными склонами и плоским дном; молодых растущих оврагов практически нет. Индекс расчлененности составляет 0.9 – 2 км/км². Рельеф Ополья был сформирован ещё в доледниковый период. Плейстоценовые оледенения лишь несколько сгладили водоразделы. Ледниковые отложения перекрыты сплошным плащом покровных суглинков. Мощность покровных суглинков в среднем составляет 3-5 м, но в понижениях может достигать 7 м, а на возвышенностях мощность покровных суглинков может быть всего 30-40 см. Покровные суглинки являются почвообразующей породой.

Владимирское Ополье находится в зоне умеренно континентального климата. Годовая амплитуда среднемесячных температур составляет 29-30°C. Минимум температуры воздуха в конце января – начале февраля составляет -27-31°C, иногда до -45-48°C. Максимум июльских температур составляет +30-31°C, но может доходить до +36-38°C. Вегетационный период ($t > 10^0\text{C}$) составляет 120-140 дней. Сумма активных суточных температур с начала мая и до конца сентября составляет от 19000 до 22000. Средняя сумма осадков за год составляет около 550 мм, из них примерно 180 мм – это твёрдые осадки. Снежный покров становится устойчивым обычно в третьей декаде ноября, но в отдельные годы возможно ранее (28 октября) или позднее (19 января). Запасы влаги в снежном покрове составляют в среднем до 75-90 мм. Перед снеготаянием высота снежного покрова может составлять 30 см. Снеготаяние начинается в период с 4 по 12 апреля (Окорков, 2021). Согласно многолетним наблюдениям, в третьей декаде апреля почва бывает готова для обработки в

65-70%, а в первой декаде мая – уже в 90-95% случаев (Окорков, 2010). Микрорельеф агросерых почв Владимирского Ополя оказывает значительное влияние на равномерность созревания почвы (Архангельская, 2008).

Среднемноголетняя сумма осадков за весь вегетационный период составляет около 240-260 мм. Однако каждый четвертый год выпадает только половина указанного количества осадков, а каждый десятый год – одна треть. В отдельные редкие годы сумма осадков может составить всего 5%. Минимум осадков приходится на июнь. За период многолетних метеонаблюдений по Владимирской области гидротермический коэффициент 0.6-1.0 в июне наблюдался в 25-30% лет, а менее 0.5 возможен в 15-20% случаев.

С 1990 года наблюдается постепенное повышение суммы активных температур за вегетационный период. По многолетним наблюдениям за температурой и осадками в ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ» за период с 1990 г. по 2000 г. средняя сумма активных температур составила 2058°C, в следующее десятилетие – 2121°C, а за 2007-2015 гг. – 2306°C. Одновременно с ростом суммы активных температур вырос гидротермический коэффициент с 1.28 до 1.36 (Окорков, 2017).

Владимирское Ополье находится в Среднерусской южно-таежной провинции дерново-подзолистых почв. Пахотные угодья во Владимирском Ополье занимают в основном плодородные серые лесные почвы 68%, ещё 30% дерново-подзолистые почвы, а 2% – пойменные и болотные почвы. Гранулометрический состав почв Владимирского Ополя в основном средне- и тяжелосуглинистый с содержанием физической глины (частиц <0.01 мм) от 30 до 45% (Окорков, 2021).

Серые почвы формируются под широколиственными лесами в Европейской России и под хвойно-мелколиственными лесами в Сибири. Также они встречаются в США и Канаде (Ковда, Розанов, 1988). По «Классификации и диагностике почв СССР» 1977 года (Егоров и др., 1977.) подтип серых лесных почв выделяется в типе Кислые сипаллитные профильно-дифференцированные почвы. Подтип делится на следующие рода: обычные,

остаточно-карбонатные, контактно-луговатые, пестро-цветные, со вторым гумусовым горизонтом. Почвы, находящиеся в сельскохозяйственном использовании, разделяются на: а) освоенные и б) окультуренные.

По «Классификации почв России» 2004 года тип серых почв выделяется в отделе текстурно-дифференцированных почв. Тип серых почв делится на три подтипа: типичные, со вторым гумусовым горизонтом, глееватые. Агросерые почвы являются самостоятельным типом. Они отличаются от естественных серых почв гомогенным агрогоризонтом, ниже которого залегает либо незапаханная часть гумусового горизонта, либо полностью или частично сохранившийся гумусово-элювиальный горизонт. Почвы имеют слабокислую реакцию в верхней части профиля и поглощающий комплекс, практически полностью насыщенный основаниями. Количество гумуса в пахотном горизонте составляет 2.5–3.5%, в его составе преобладают гуминовые кислоты (Сгк/Сфк 1.3–1.5).

В международной систематике ФАО серые почвы (Greyzems) разделяются на три подтипа: 1) Orthic greyzems — типичные; 2) Mollic greyzems — с сильно гумусированным верхним горизонтом; 3) Gleyic greyzems — с выраженным глеевым горизонтом.

2.2. Объекты исследования

Исследования агрофизических свойств агросерых почв проведены на двух объектах разных геоморфологических позиций: на приводораздельной территории и в нижней части склона к реке Каменка. Первым объектом исследования является пахотный горизонт агросерых почв на участке опытного поля по изучению адаптивно-ландшафтных систем земледелия Верхневолжского ФИНЦ. Опытное поле находится на приводораздельной территории. Почвы в подчинённой позиции исследованы на производственном поле того же подразделения (рис. 1).



Рисунок 1. Объекты исследования.

2.2.1 Участок опыта по адаптивно-ландшафтным системам земледелия

Опыт по изучению адаптивно-ландшафтных систем земледелия Верхневолжского ФИНЦ является многофакторным: здесь используются пять севооборотов, четыре системы обработки почв и дифференцированное внесение удобрений. Разработка и усовершенствование адаптивно-ландшафтных систем земледелия осуществляются в Верхневолжском ФИНЦ уже 30 лет – с 1995 года (Окорков, 2003; Кирюшин, 2004; Окорков, 2006).

Из пяти шестипольных севооборотов нами исследованы три: зернопаротвяной и два зернотравяных. Для каждого севооборота осуществляется своя схема внесения удобрений, представленная в табл. 1.

Таблица 1. Схема внесения удобрений на исследованных севооборотах

год		зерно - паротравяной		зернотравяной		зернотравяной	
1	Культура	Черный пар		Занятый пар		Яровая пшеница	
	Норма удобрения	-	-	N40	N60	N60 P60 K60	N90 P90 K90
2	Культура	Озимая пшеница		Озимая рожь		Овёс	
	Норма удобрения	Навоз 40т + N30	Навоз 40т + N60	Навоз 40т + N60	Навоз 40т+N60 + (NPK) 40	N60 P60 K60	N80 P80 K80
3	Культура	Овёс + мн. травы		Овёс + мн. травы		Ячмень + мн. травы	
	Норма удобрения	-	N30 P30 K30	N30 P30 K30	N45 P45 K45	N45 P45 K45	N45 P45 K45
4	Культура	Мн. травы 1 г.п.		Мн. травы 1 г.п.		Мн. травы 1 г.п.	
	Норма удобрения	-	-	-	-	-	-
5	Культура	Мн. травы 2 г.п.		Мн. травы 2 г.п.		Мн. травы 2 г.п.	
	Норма удобрения	-	-	-	N30	N60	N60
6	Культура	Ячмень		Яровая пшеница		Озимая рожь	
	Норма удобрения	-	N30 P30 K30	N40 P40 K40	N60 P60 K60	N60 P60 K60	N90 P90 K90

На опыте используется четыре системы обработки почв: общепринятая отвальная, комбинированно-плоскорезная, комбинированно-ярусная и противоэрозионная (табл. 2).

- Общепринятая отвальная – вспашка на глубину 20-22 см под все культуры, а под 5-ю культуру (черный или занятый пар) - глубокое рыхление на 25-27 см.

- Комбинированно-плоскорезная. Плоскорезная обработка на 10-12 см осенью и последующее весеннее глубокое рыхление на 25-27 см. Перед многолетними травами 1 года пользования (г.п.) весной проводят плоскорезную обработку, на глубину 10-12 см. Многолетние травы 2 г.п. возделываются без обработки. Под ячмень и яровую пшеницу проводится дискование с последующей вспашкой на 20-22 см. Обработка под чёрный и занятый пар включает в себя плоскорезную обработку на 10-12 см осенью, затем плоскорезную обработку на 10-12 см и весеннее глубокое рыхление 25-

27 см, затем повторную плоскорезную обработку на 10-12 см. Пред посевом яровой пшеницы проводят плоскорезную обработку на 10-12 см.

Таблица 2. Схема основных приёмов обработки на исследованных севооборотах

Система обработки	Севообороты	Приёмы
	зерно-паротравяной	
Отвальная	Под все культуры	Отвальная вспашка (20-22 см)
Комбинированно-плоскорезная	1	Плоскорезная обработка 10-12 см
	2	Плоскорезная обработка 10-12 см
	3	Плоскорезная обработка 10-12 см
	4	-
	5	-
	6	Отвальная вспашка (20-22 см)
Комбинированно-ярусная	1	Плоскорезная обработка 10-12 см
	2	Плоскорезная обработка 10-12 см
	3	Плоскорезная обработка 10-12 см
	4	-
	5	-
	6	Ярусная вспашка (25-27 см)
Противоэрозионная	1	Глубокое рыхление (25-27 см)
	2	Глубокое рыхление (25-27 см)
	3	Глубокое рыхление (25-27 см)
	4	-
	5	-
	6	Дискование, вспашка (20-22 см)

• Комбинированно-ярусная. Перед посевом овса проводится плоскорезная обработка на 10-12 см, а затем весеннее глубокое рыхление на 25-27 см. Перед многолетними травами 1 г.п. проводится вспашка на 20-22 см. После многолетних трав 2 г.п. перед посевом ячменя и яровой пшеницы проводят дискование и ярусная вспашка на 25-27 см. Обработка под пары включает плоскорезную обработку на 10-12 см, повторную плоскорезную обработку на 10-12 см., затем весеннее глубокое рыхление 25-27 см. и

плоскорезную обработку на 10-12 см. Перед посевом яровой пшеницы проводят дискование и вспашку на 20-22 см.

- Противозероэрозийная обработка. Под овёс проводится осеннее и весеннее глубокое рыхление на 25-27 см. Перед посевом многолетних трав 1 г.п. проводится рыхление на 25-27 см. После уборки многолетних трав 2 г.п. проводится дискование и весенняя вспашка на 20-22 см перед высевом ячменя и яровой пшеницы. Обработка паровых полей – глубокое рыхление на 25-27 см. Перед посевом яровой пшеницы проводят весеннее глубокое рыхление на 25-27 см.

На рисунке 2 представлена схема отбора образцов агросерых почв на участке опыта АЛСЗ. Для оценки влияния систем обработок на агрегатный состав агросерых почв образцы отбирались из слоя 0-20 и 20-40 см, которые в наибольшей степени подвержены обработкам.

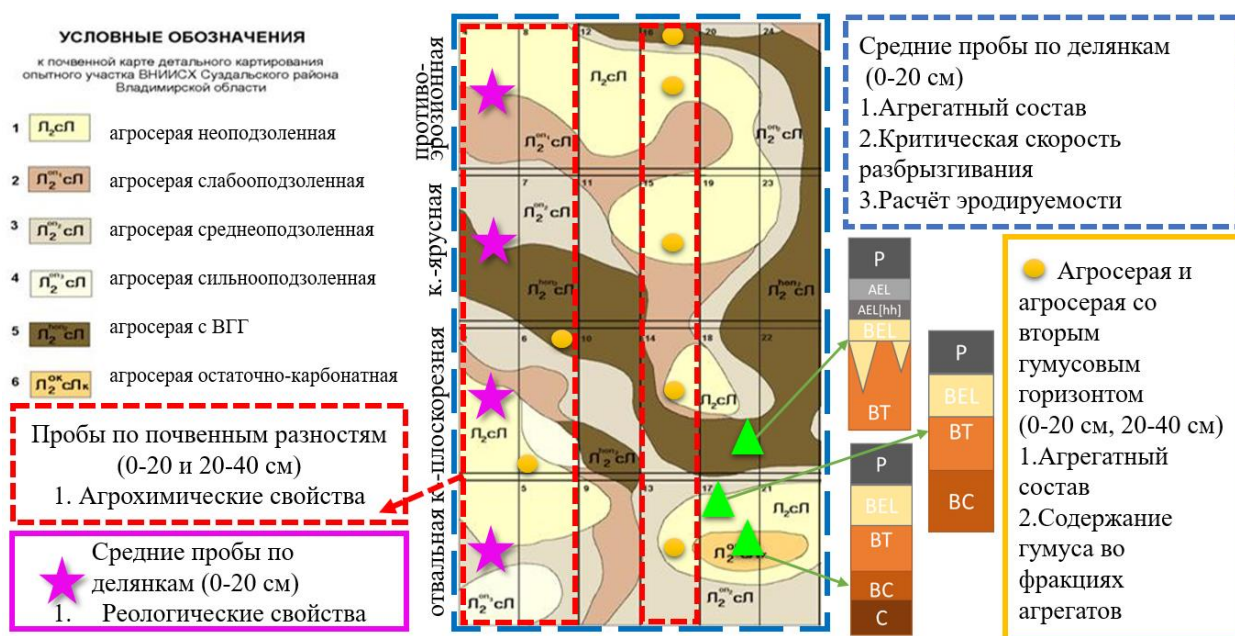


Рисунок 2. Схема участка исследования на опытном поле АЛСЗ

На участке были описаны три почвы: агросерая почва со вторым гумусовым горизонтом (рис 3) и две агросерые среднепахотные почвы (рис 4, 5).

Морфологическое описание почв объекта 1 (опыт АЛСЗ)

Разрез 1. 1977: Серая лесная собственно со вторым гумусовым горизонтом мощная освоенная среднесуглинистая на покровном суглинке.
2004: Агросерые со вторым гумусовым горизонтом среднепахотная сверхглубокая среднесуглинистая на покровном суглинке.

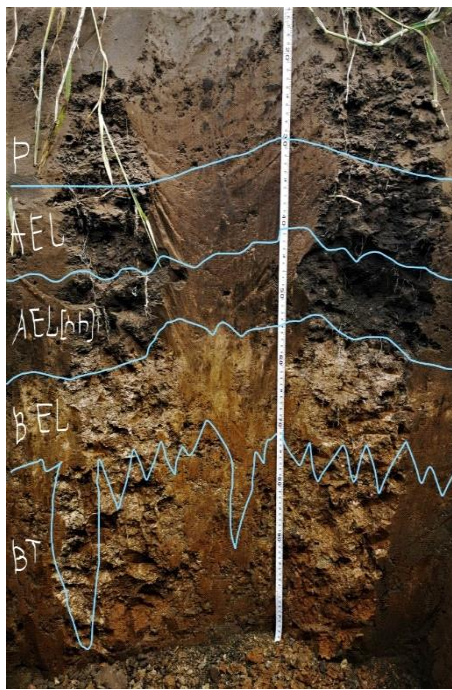


Рисунок 3. Агросерые почвы со вторым гумусовым горизонтом

Координаты: 56.386070; 40.408002

Р 0-30 см Сухой, пылит, однородной окраски, серый, средний суглинок, комковато-зернистой структуры, агрегаты твердоватые (с трудом крошатся пальцами); сложение уплотненное структурное (во влажном состоянии рыхлое структурное), пор нет, корней много, много растительных остатков разной степени разложенности (запаханная стерня, мертвые корни), новообразования: копролиты, червороины; трещины с поверхности до 40 см, шириной до 1 см, граница ровная, переход постепенный.

AEL 30-40 см Сухой, однородной окраски, серый, средний суглинок, плитчатая структура, белесая скелетана, в остальном характеристики как у Р.

AEL[hh] 40-55 см Свежий, однородной окраски, серый, темнее Р и АЕ, с белесой присыпкой, средний суглинок, ореховато-порошистая структура, агрегаты мягкие, сложение рыхлое структурное, много мелких корней,

новообразования: кремнезёмистая скелетана, копролиты, червороины; граница волнистая, переход ясный.

BEL 55-70 см Свежий, неоднородной окраски: на светло-бежевом фоне белёсые языки, средний суглинок, структура: плитчато-порошистая в белёсых языках, а между ними ореховатая, мелкопористый, обильная белёсая кремнезёмистая скелетана, обильные кутаны по граням структурных отдельностей, копролиты, червороины, сложение рыхло-структурное, граница языковатая, переход заметный.

BT 70-100 см Свежий, рыже-охристый, тяжелый суглинок, ореховато-призматическая структура, уплотненное структурное сложение, агрегаты твердоватые, много мелких пор, кутаны по граням структурных отдельностей, копролиты, червороины, Отбеленные языки горизонта BEL до 100 см.

Разрез 2. 1977: Серая лесная собственно остаточно-карбонатная среднемощная освоенная среднесуглинистая на покровном суглинке.

2004: Агросерая типичная среднепахотная среднесуглинистая на покровном суглинке

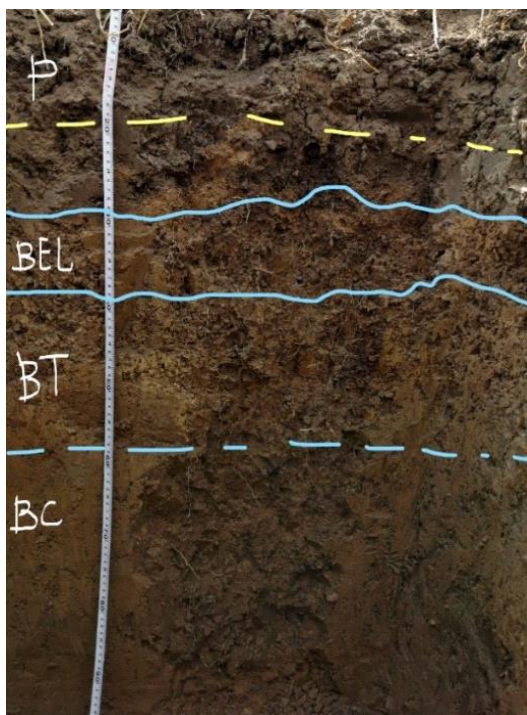


Рисунок 4. Агросерая почва среднепахотная

Координаты 56.386154; 40.407789

Р 0-30 см Сухой, осыпается, однородный серый, среднесуглинистый, комковато-порошистый, мягкие агрегаты, сложение рыхлое структурное, много мелких корней, много растительных остатков разной степени разложённости, копролиты, червороины, бусины по корням, трещины с поверхности на мощность Р, плужная подошва (30-40 см) плотная, призматическая форма агрегатов, граница ровная, переход резкий. В нижней части припахана часть нижележащего горизонта.

ВЕР 30-40 см Сухой, однородной окраски, светло-охристый, средний-суглинок, комковато-ореховатой структуры, рыхлого структурного сложения, агрегаты твердоватые, корней среднее количество, меньше чем в Р, белёная кремнезёмистая скелетана, кутаны, копролиты, червороины, граница волнистая, переход заметный.

ВТ 40-60 см Свежий, неоднородной окраски: темно-охристый фон и коричневатые пятна кутан, тяжелый суглинок, мелко-ореховатой структуры, рыхло-структурного сложения, агрегаты твердоватые, корней среднее количество, обильные кутаны по граням структурных отдельностей, кремнезёмистая скелетана, граница волнистая, постепенный переход по структуре.

ВС 60-102 см Свежий, однородной окраски, светло-коричневый, тяжелый суглинок, призматической структуры, рыхлое-структурное сложение, мягкие агрегаты, редкие корни, много мелких пор, карбонатные стяжения плотные и рыхлые с глубины 100 см. Карбонатной пропитки нет.

Разрез 3. 1977: Серая лесная собственно остаточная-карбонатная среднесуглинистая на покровном суглинке
2004: Агросерая типичная среднепахотная среднесуглинистая на покровном суглинке

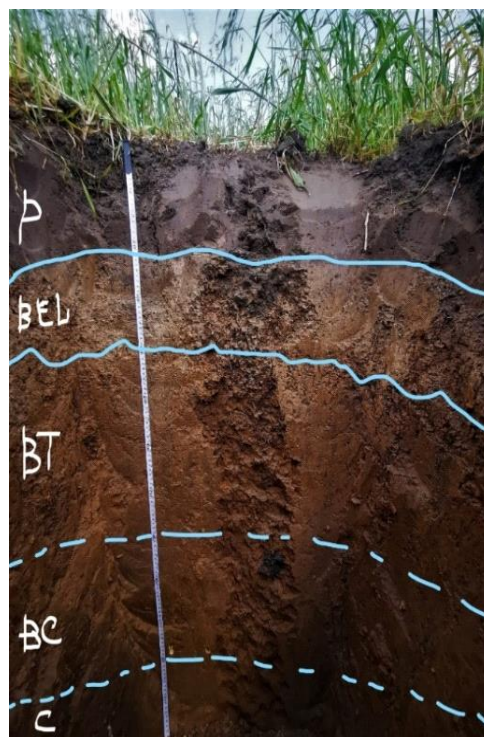


Рисунок 5. Агросерая почва среднепахотная
Разрез 3 56.386236; 40.408250

Р 0-20 см Сухой, однородной окраски, серый, комковато-зернисто-порошистой структуры, средний суглинок, уплотненный, агрегаты твердые, сложение уплотненное структурное, трещины с поверхности на глубину 20 см, много мелких корней, червороины, копролиты, граница волнистая, зоотурбированная, переход резкий, плужная подошва не выделяется, т.к. Р переуплотнён и пересушен.

BEL 20-40 см Сухой, однородной окраски светло-бежевый, облегчённый средний суглинок, мелко-ореховатой структуры, рыхлого структурного сложения, среднее количество мелких корней, белесая кремнезёмистая скелетана, кутаны по граням структурных отдельностей, копролиты, червороины, граница волнистая, переход по цвету заметный.

BT 40-80 см Свежий, однородной окраски светло-коричневый, тяжелый суглинок, призмовидно-ореховатой структуры, мелкопористый, мягкие агрегаты, сложение уплотнённое структурное, редкие корни, копролиты, червороины, кутаны на гранях структурных отдельностей, много мелких пор, переход постепенный по структуре.

ВС 80-110 см Свежий, однородной окраски светло-коричневый, призмовидной структуры, сложение плотное структурное, агрегаты мягкие, много мелких пор, единичные корни, плотные карбонатные новообразования на глубине 110 см, кротовина на глубине 110 см, заполненная темно-серым гумусовым материалом с зернистой структурой, переход по структуре постепенный.

С 110-115 см Свежий, однородной окраски светло-коричневый, бесструктурный, сложение плотное, мелкопористый, единичные корни, карбонатная пропитка.

В трёх разрезах нами вскрыты почвы, относящиеся к разным подтипам по классификации почв России 2004 года: со вторым гумусовым горизонтом и остаточно-карбонатные. Почвы резко отличаются по проявлению процессов оподзоливания, наиболее активно оно протекает в почве со вторым гумусовым горизонтом, что диагностируется наличием горизонтов AEL, BEL, языков отбеленного материала, доходящих до дна разреза. В разрезах 2 и 3 горизонта AEL не было обнаружено, имеется горизонт BEL, но без языков отбеленного материала. Горизонт ВТ вскрыт во всех трёх разрезах, но в почве со вторым гумусовым горизонтом ВТ располагается значительно глубже, чем в остаточно карбонатных почвах. Карбонатные конкреции были обнаружены в разрезе 2 и 3 с глубины 100-110 см. Плотные конкреции имели диаметр до 3-4 см. В разрезе 3 с глубины 115 см вскрыт горизонт С полностью пропитанный карбонатами. Таким образом карбонатные конкреции располагаются по нижней границе ВС горизонта.

2.2.2. Объект 2. Агросерые почвы на склоне к реке Каменка

Второй объект исследования находится на склоне к реке Каменка, на полях Верхневолжского ФАНЦ (56.416723, 40390007). На поле были заложены три разреза в характерных точках (Рис. 6).

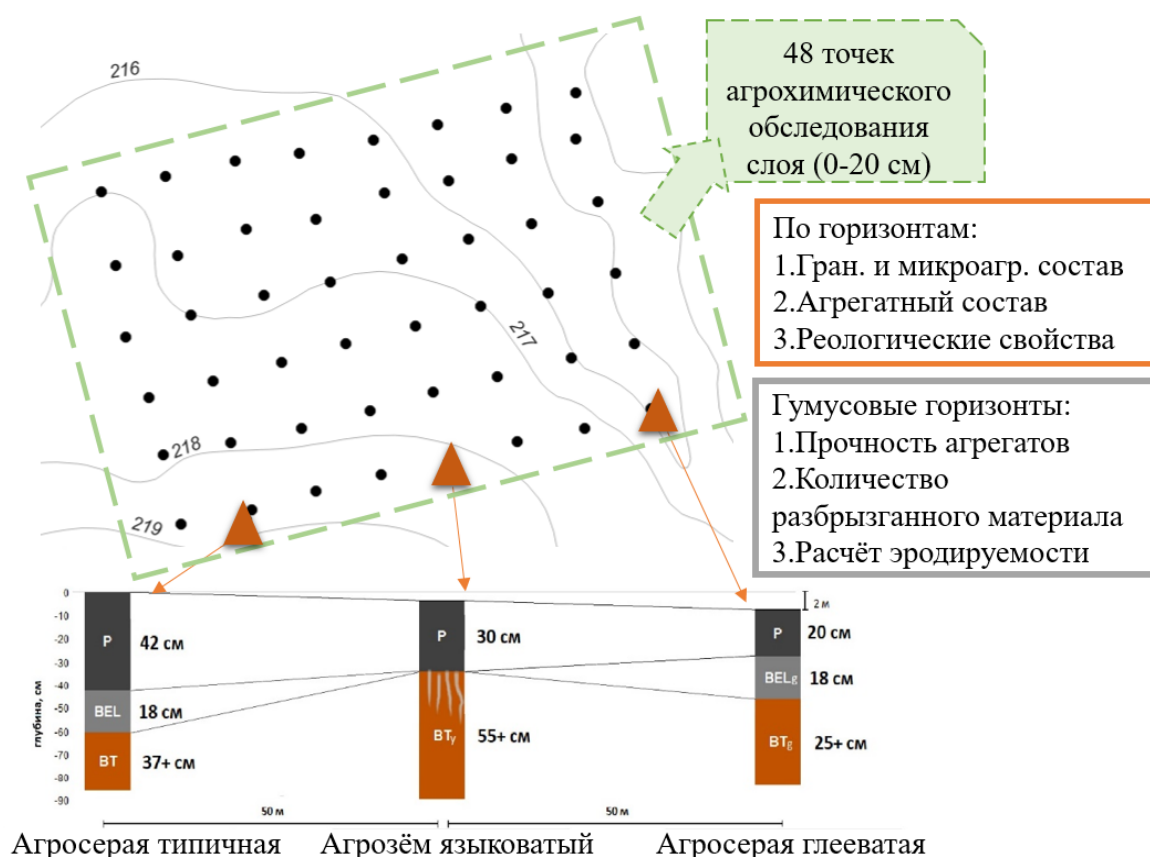


Рисунок 6. Схема расположения почвенных разрезов

Первый разрез находился в верхней части склона в темном пятне пашни (рис.7) , второй – в 50 м от него в светлом пятне пашни (рис 8). Третий – в ложбине в 100 м от первого (рис 9). Превышение между первым и третьим разрезами составляет 2 м. На момент исследования поле находилось под чистым паром, и поверхность почвы представляла из себя чередование темно-серых и светло-серых пятен 10-15 м в диаметре, что соответствует приведенным выше описаниям особенностей почвенного покрова Владимирского Ополя с чередованием почв, сформированных в микрозападинах и на микроповышениях.

Разрез 1. 1977: Серая лесная обычная мощная освоенная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках.

2004: постлитогенная текстурно-дифференцированная агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва на лёссовидных суглинках.

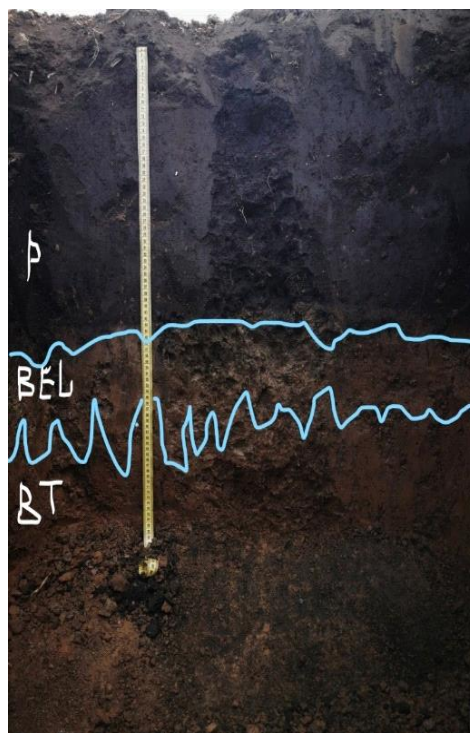


Рисунок 7. Агросерая типичная глубокопахотная среднесуглинистая почва

Координаты: 56.416723, 40390007

Р 0-42 см 0-5 см пересушенный, пылит и осыпается, далее свежий, темно-серый (темнее Р 2 разрез), средний суглинок, структура: глыбисто-зернистая, мягкий, структурно-рыхлый, много корней и растительных остатков, червораины, копролиты, антропогенные включения кирпич, камень, известь, ровная зоотурбированная граница.

BEL 42-60 см языки уходят глубже 85 см Свежий, на коричневатом фоне белёная (светло-серая) присыпка, облегченный средний суглинок, призматически-плитчатая структура в белёных языках, ореховатая между ними, уплотненный, структурное сложение, червораины, копролиты, корней и растительных остатков меньше чем в Р, присыпка и кутаны по граням структурных отдельностей, граница языковатая, переход по структуре.

BT 60-85 см Свежий, коричневатом-охристый, средний суглинок, структура столбчато-ореховатая, мягкий, уплотненный, сложение плотное

структурное, кутаны по граням структурных отдельностей, коричневые кутаны, агрегаты охристые внутри, встречаются редкие корни.

1977: Серая лесная обычная среднемошная освоенная среднесуглинистая на лёссовидных суглинках.

2004: постлитогенный агрозём текстурно-дифференцированный языковатый среднепахотный среднесуглинистый лёссовидных суглинках.

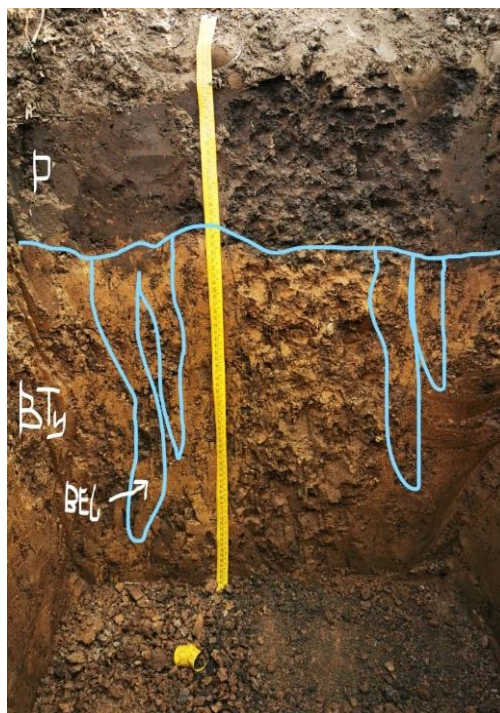


Рисунок 8. Агрозём текстурно-дифференцированный языковатый

Координаты: 56.417041, 40392407

Р 0-30 см Свежий, однородной серой окраски, в нижней части пятна ВТ, верхние 5-10 см пересушены осыпаются и пылят, среднесуглинистый, комковато-зернисто-порошистый, уплотненный, сложение рыхлое структурное, корней и растительных остатков среднее количество, встречается запахана стерня, копролиты, червороины, граница ровная (с ходами червей).

ВТу 30-85 см Свежий, неоднородной окраски: на коричневато-охристом фоне серые прожилки, тяжелый суглинок, структура: столбчато-мелкоореховатая (столбик делится на мелкие (квадраты) орехи), сложение

плотное структурное, агрегаты твердоватые, обильные коричневые кутаны по граням структурных отдельностей (агрегаты внутри светло-охристые), корней и растительных остатков меньше, чем в Р, червороины, копролиты, мелкопористый, пор много. В верхней части 30-45 см языки отбеленного мягкого материала в виде белёсой присыпки по граням структурных отдельностей.

1977: Серая лесная глеевая грунтово-глееватая почва маломощная освоенная среднесуглинистая на лессовидных суглинках

2004: постлитогенная текстурно-дифференцированная агросерая глееватая мелкопахотная среднесуглинистая почва на лессовидных суглинках

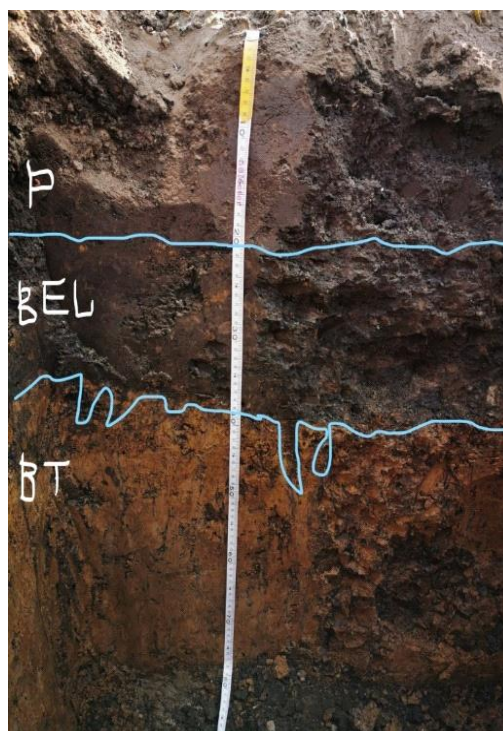


Рисунок 9. Агросерая глееватая почва

Р 0-20 см Свежий, однородной темно-серой окраски, комковато-зернистой структуры, средний суглинок, уплотненный, мягкий, сложение рыхлое структурное, множество корней разного размера и растительных остатков разной степени разложенности, на глубине 5-10 см встречается запаханная стерня и свежие растительные остатки после боронования,

обильные червoroины и копролиты, антропогенные включения: кирпич, стекло, граница ровная, переход резкий по структуре и плотности.

BE_{Lg} 20-38 см Свежий, окраска неоднородная на темно-сером сизоватом фоне светло-охристые маленькие пятна (BT) и светло-серо-оливковые примазки-прослои (сложены легким пылеватым материалом), среднесуглинистый, структура: глыбисто-ореховатая, сложение структурное, плотнее P, много корней и растительных остатков, но меньше чем в P, много червoroин и копролитов, включения: угольки, граница волнистая, зоотурбированная, затеки гумуса по трещинам, переход резкий по цвету.

BT_g 38-75 см Влажноватый, неоднородной, мраморовидной окраски, на светло-рыже-охристом фоне прожилки и затёки темно-серого цвета по ходам корней и трещинам, сизоватость, структура столбчато-призмовидная, уплотненный, ближе к плотному, сложение плотное структурное, корней и растительных остатков мало, темно-серые с сизоватым отливом кутаны по граням структурных отдельностей, мелкопористый средне-тяжелосуглинистый, встречаются редкие железистые стяжения.

2.3 МЕТОДЫ

2.3.1 Агрохимические характеристики.

Основные агрохимические показатели агросерых почв определялись с использованием следующих методик:

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

2.3.2 Агрофизические характеристики.

Плотность сложения определялась цилиндром с заданным объёмом в трёхкратной повторности (Вадюнина, 1986). Гранулометрический состав определялся двумя методами – седиментационным методом пипетки (ПМ) (Полевые и лабораторные методы, 2001) и методом лазерной дифракции (ЛД) частиц на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) (Юдина и др., 2017). Образцы были растерты резиновым пестиком и просеяны через сито 1 мм. Для определения гранулометрического состава пипет-методом почва была диспергирована 4 %-ым раствором пиррофосфата натрия. Для определения гранулометрического состава методом лазерной дифракции пробу суспендировали (20 мг почвы в 15 мл дистиллированной воды) и обрабатывали ультразвуком на диспергаторе зондового типа Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США) со стандартным наконечником при энергии диспергации 500 Дж/мл. Для микроагрегатного анализа пробы суспендировали в дистиллированной воде и встряхивали на вортексе (Yudina et al., 2022)

Анализ структуры проводился для пахотного (0-20 см) и подпахотного горизонтов (20-40 см) образцов с участка АЛСЗ и по горизонтам для образцов со склонового поля. Масса пробы – 500г. Фракционирование почвы проводилось в воздушно-сухом состоянии на стандартной колонке сит: 10; 7; 5; 3; 2; 1; 0.5; 0.25 мм. После взвешивания каждой фракции рассчитывалось её содержание в % соотношении от массы образца. Для образцов склонового поля просеивание воздушно-сухих агрегатов было проведено на виброгрохоте Anallysette 3 Spartan (Фомин и др., 2019) в шести повторностях.

Определение водопрочности проводилось методом Н.И. Саввинова. Из всех фракций агрегатов, полученных при сухом просеивании была составлена средняя проба весом в 50г для каждого образца. Агрегаты насыщались водой на фильтровальной бумаге, чтобы при резком опускании в воду не происходил разрыв агрегатов. Просеивание проводили в воде набором сит: 5; 3; 2; 1; 0.5; 0.25 мм (Вадюнина, Корчагина, 1973).

Оценка структурного состояния почвы проводилась по ряду показателей: средневзвешенный диаметр, содержание агрономически ценных агрегатов, коэффициент структурности, критерий водоустойчивости (Шеин, 2005). Средневзвешенный диаметр агрегатов представляет сумму произведений диаметров фракций на их процентное содержание (1).

$$D = \frac{\sum d * z}{100} \quad (1)$$

D – средневзвешенный диаметр агрегатов

d – диаметр фракции агрегатов

z – процентное содержание фракции агрегатов

Агрономически ценными считаются агрегаты от 0.25 мм до 10 мм. По сумме агрономически ценных агрегатов структурное состояние определяется как: >60% - отличное, 60-40 – хорошее, <40% - неудовлетворительное.

Коэффициент структурности ($K_{стр.}$), это отношение количества агрономически ценных агрегатов к фракциям >10 мм и <0.25мм (2).

$$K_{стр} = \frac{\sum (0.25\text{мм} - 10\text{мм})}{> 10\text{мм} + < 0.25\text{мм}} \quad (2)$$

Качественная оценка на основе $K_{стр}$ предполагает три уровня: >1.5 – отличное агрегатное состояние, 1.5–0.67 – хорошее, <0.67 – неудовлетворительное.

Критерий водоустойчивости — это количество агрегатов >0.25 мм, сохранившихся не распавшимися после просеивания в воде. Водоустойчивость структуры по сумме агрегатов >0.25 мм описывается как: <30% – неудовлетворительная, 30-40% – удовлетворительная, 40-75% – хорошая, >75 % – избыточно высокая.

Механическая прочность агрегатов анализировалась с помощью конического пластометра П.А. Ребиндера (Хайдапова и др., 2022). В качестве

объектов были выбраны агрегаты размером 3-5 мм, так как агрегаты этой размерности являются наиболее удобными по размеру среди агрономически ценных агрегатов. Механической прочности агрегатов определялась в воздушно-сухом и капиллярно-насыщенном состоянии. Анализ проводился в десятикратной повторности. Для капиллярного-насыщения агрегаты увлажнялись на фильтровальной бумаге 8 часов. После разрушения влажность агрегатов определялась термостатно-весовым методом.

$$P_m = K_\alpha \frac{F}{h^2} \quad (3)$$

Предельное напряжение сдвига P_m (кг/см²) рассчитывалось по формуле (3), 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.

2.3.3. Реологические параметры

Реологические параметры определялись методом амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Параметры измерения: программа Start Rheoplus – режим Amplitude Sweep, количество точек измерения – 30, длительность измерения одной точки – 15 с, угловая частота измерения – 0.5 Гц, диапазон деформации (напряжения). от 0.001 до 100% lg , контроль нормальной силы (сила воздействия верхнего плато) $NF < 5$ N для пастообразных образцов, постоянная температура 20°C. Постоянство температуры обеспечивали элементами Пельтье (Хайдапова и др., 2014). При подготовке паст образцы почв растирались пестиком с резиновым наконечником и просеивались через сито 1 мм. Затем цилиндры диаметром 25 мм, подобранные по размеру измерительной системы, наполняли 3г воздушно-сухого образца, слабо надавливая 3 раза поршнем, таким образом

выравнивая поверхность почвенной таблетки. Цилиндр с образцом устанавливался в кристаллизатор с дистиллированной водой для капиллярного насыщения в течение суток (Хайдапова и др., 2014). Определялись следующие параметры: значение деформации, сопротивление сдвигу, модули упругости и вязкости в диапазоне вязкоупругого поведения, в точке максимальной нагрузки и в точке кроссовера (предел текучести). Значение деформации (%) - это мера изменения образца под действием сдвига. Сопротивление сдвигу τ (Па) – это энергия, которая была сообщена образцу при деформации. Модуль упругости G' (Па) – это энергия деформации, сохраненная образцом во время процесса сдвига. Модуль вязкости G'' (Па) или потери – это энергия деформации, израсходованная образцом во время сдвигового процесса (Mezger, 2011). В диапазоне вязкоупругого поведения сохраняются межчастичные связи в образце и модуль упругости G' больше модуля вязкости G'' (рис. 10). При измерении определяется деформация, при которой начинается разрушение структуры межчастичных связей. В точке пересечения модулей упругости и вязкости происходит полное разрушение межчастичной структуры, и почва переходит в текучее состояние (предел текучести).

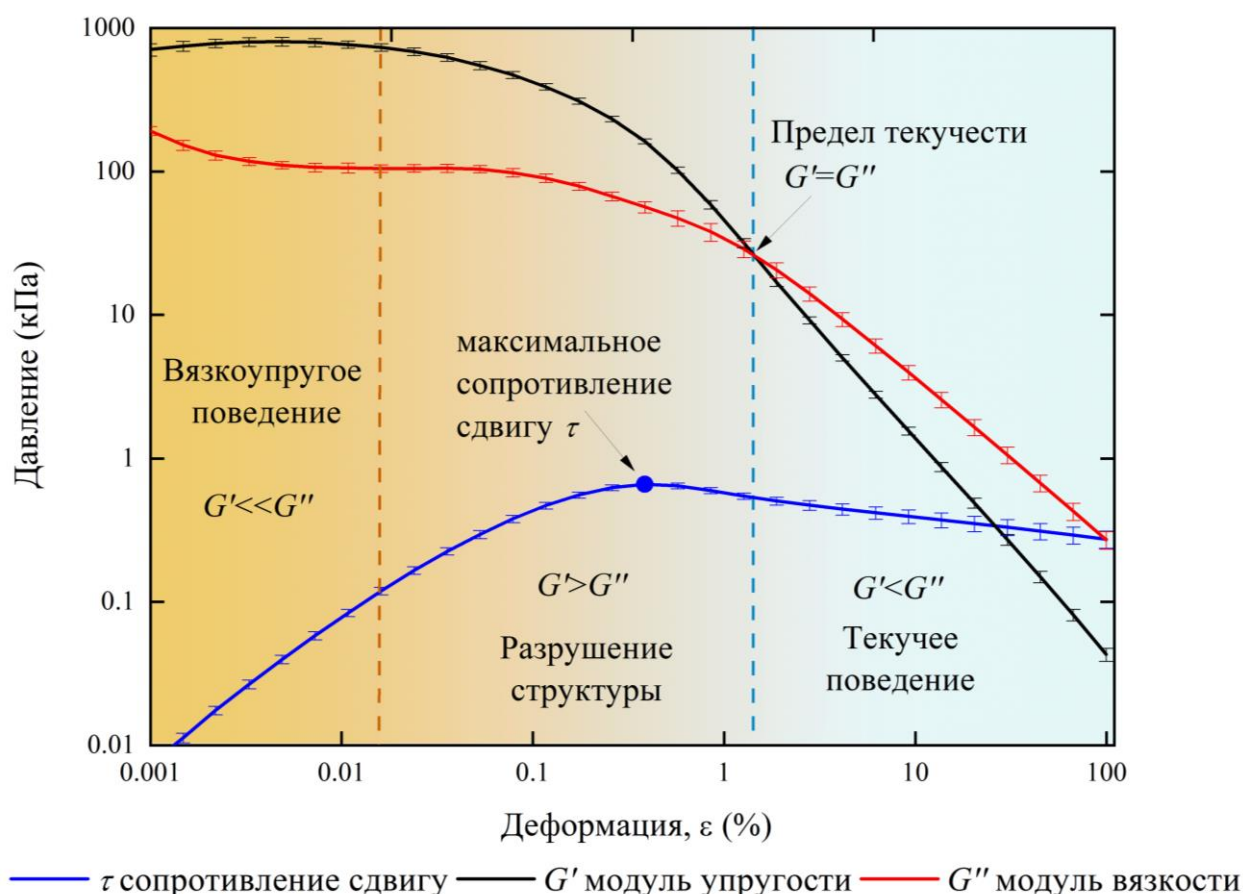


Рисунок 10. Схема реологического поведения почвы; G' – модуль упругости, G'' – модуль вязкости; τ – сопротивление сдвигу

2.3.4 Определение эродируемости

Эксперимент по дождеванию проводился на лабораторной дождевальной установке кафедры Эрозии и охраны почв (Патент на полезную модель 171157). Равномерное распределение капель дождя по стоковой площадке без образования углублений в почве обеспечиваются расположением каплеобразователей на рабочей поверхности по спирали Архимеда и автоматически раскачивающему устройству, вращающему установку. Диаметр образуемых капель равен 2.6 мм. Дождевание производилось дистиллированной водой, расход воды составил 4.0 мм/мин. Время дождевания одного образца 30 минут. Скорость падения капель регулируется высотой установки, на которой были использованы 7 высот: 1.75м, 1.5м, 1.25м, 1м, 0.7м, 0.5м, 0.3м. Перед дождеванием насыпные образцы насыщались водой

в кристаллизаторе 24 часа. Разлетающиеся частицы улавливались специальным воротом. Затем осадок собирался в бьюксы, просушивался и взвешивался.

Коэффициент эродированности рассчитывался для модели WATEM/SEDEM. Алгоритм расчета темпов ливневого смыва модели базируется на модифицированном универсальном уравнении смыва почв RUSLE (Panagos, 2017).

$$A=R*K*LS*C*P \quad (4)$$

A – расчетная потеря почвы на единицу площади, т/га в год;

R – эрозионный индекс осадков ($\text{МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$);

K – коэффициент эродированности почв;

LS – коэффициент соотношения длины и крутизны склона;

C – коэффициент землепользования;

P – коэффициент почвозащитной эффективности противоэрозионных мер.

Коэффициент эродированности почвы выражается в $\text{кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$ и рассчитывается по формуле:

$$K = 2.76 \times 10^{-7} * M^{1.14} (12 - \text{OM}) + 0.0043 * (s - 2) + 0.0033 * (p - 3), \text{ где} \quad (5)$$

M – фактор гранулометрического состава, который вычисляется как:

$$(m_{(0.002-0.05\text{мм})} + m_{(0.05-0.1\text{мм})}) * (100 - m_{(<0.002\text{мм})})$$

OM (%) – содержание органического вещества, гумуса

S – Структурный класс

P – Класс водопроницаемости

Структурный класс определяется по оценкам Европейской базы данных почв, в таблице приведен класс, размер агрегатов и оценки, характеризующие класс (табл. 3). Также по табл. 4, исходя из текстуры почвы, определяется класс водопроницаемости.

Таблица 3. Классы структуры Европейской базы данных почв

Класс	Размер	Агрегаты	Оценка	
1	1-2 мм	очень мелкозернистый	Хорошо	Sandy, Loamy sand, sandy loam
2	2-5 мм	Мелкозернистый	Нормально	Sandy clay, Sandy clay loam, Silty loam, Silt
3	5-10 мм	Среднезернистый	Удовлетворительно	clay loam, Silty clay loam
4	>10 мм	глыбистый, пластинчатый или массивный, а также перегнойный/торфяной верхний слой почвы	Плохо	Clay, Silty clay

Таблица 4. Класс водопроницаемости

Класс проницаемости	Характеристика	Текстура	проводимость, мм·ч ⁻¹
1	быстрый и очень быстрый	Sand	>61.0
2	умеренно-быстрая	Loamy sand, sandy loam	20.3–61.0
3	умеренный	Loam, silty loam	5.1–20.3
4	средне-низкий	Sandy clay loam, clay loam	2.0–5.1
5	медленная	Silty clay loam, sand clay	1.0–2.0
6	очень медленный	Silty clay, clay	<1.0

2.3.5 Статистическая обработка данных

Все определения агрохимических показателей проведены в трёхкратной повторности. Для обработки данных агрохимического состояния агросерых почв участка АЛСЗ был выбран непараметрический метод U-критерий Манна-Уитни в программе STATISTICA. Выбор этого метода был обусловлен рядом причин: во-первых, выборки по почвенным разностям неодинаковы по количеству наблюдений (от 9 до 30), во-вторых, при проверке на нормальность была выявлена неоднородность дисперсий по нескольким показателям в выборках, особенно в слое 20-40 см, а использование дисперсионного анализа представляет трудности. U-критерий Манна-Уитни используется для оценки различий между независимыми выборками по количественным признакам, при этом выборки могут содержать от 3 наблюдений. Для определения

взаимосвязей между агрофизическими показателями использовался корреляционный анализ в программе STATISTICA в выборках по слоям (N=99).

Обработка данных определения агрохимических показателей объекта 2 и построение распределений проводилось методом универсального кригинга в программе SAGA GIS.

Для оценки структурного состояния был использован метод главных компонент в программе STATISTICA. Для определения взаимосвязей между агрофизическими показателями использовался корреляционный анализ в программе STATISTICA. Также применялась программа OriginLab для построения графиков.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ¹

3.1 Агрохимические свойства пахотного слоя агросерых почв

3.1.1. Объект 1. Участок опыта АЛСЗ.

Для сельскохозяйственного производства важно иметь однородный пахотный слой, в котором нет существенных различий в пространстве агрохимических и физических свойств почвы. Для достижения такой однородности проводятся обработки и вносятся удобрения. Как уже указывалось выше, агросерые почвы Владимирского Ополья различаются по потенциальному плодородию. Среди них особенно выделяются почвы со вторым гумусовым горизонтом.

В слое 0-20 см во время обработок происходит перемешивание пахотного слоя. Поэтому число агрохимических показателей, по которым почвенные разности отличаются друг от друга меньше, чем в слое 20-40 см. Содержание гумуса в почве со вторым гумусовым горизонтом выше, чем у всех остальных почв. Выявлено, что достоверно отличаются по содержанию гумуса неоподзоленная и среднеоподзоленная почвы (табл. 5). Вторым параметром по количеству достоверных отличий оказалось содержание нитратного азота. По этому показателю отличается неоподзоленная от слабооподзоленной почвы, слабооподзоленная от средне- и сильнооподзоленной почв, а сильнооподзоленная от почвы со вторым гумусовым горизонтом (табл. 5,6,8). Наибольшее количество отличий от других почвенных разностей имеет

¹ Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованных в следующих научных статьях автора в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, WoS и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова:

1. Мищенко А.В., Карпова Д.В., Иванова Е.А., Абдулханова Д.Р., Петросян Р.Д. Структурное состояние пахотных серых лесных почв Владимирского ополья при различных способах обработки // Агрохимический вестник. — 2020. — № 5. — С. 9-16. EDN: YXRUDN (ИФ РИНЦ = 0.850). 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 (ИФ РИНЦ = 0.396) (0.3/0.15)
3. Хирк А.В., Хайдапова Д.Д., Карпова Д.В., Петросян Р.Д. Агрегатная структура агросерых почв Владимирского Ополья: состав и прочность // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2024. — № 120. — С. 107-135. EDN: MQGTZJ (ИФ РИНЦ = 1.293) (1.63/1.3)

среднеоподзоленная почва. По мере увеличения степени оподзоленности увеличивается кислотность, и среднеоподзоленная почва по pH и обменной кислотности отличается от неоподзоленной и слабооподзоленной почвы (табл. 5).

Таблица 5. U-тест Манна-Уитни, слой 0-20 см, почва серая

	Группа 1	серая N=30							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая слабо-оподзоленная N=21	Σ ранг 1	792	672*	738	692	736	786	823	848
	Σ ранг 2	535	654	589	635	590	541	504	478
	U	304	207	273	227	271	310	273	247
	Z	0.21	-2.06	-0.80	-1.68	-0.83	0.10	0.80	1.29
	p	0.83	0.04	0.42	0.09	0.41	0.92	0.42	0.20
серая средне-оподзоленная N=24	Σ ранг 1	742	839	675	803	979	747	622	727
	Σ ранг 2	743	647	810	682	507	739	864	759
	U	277	347	210	338	207	282	157	262
	Z	-1.44	0.23	-2.60	-0.37	2.66	-1.36	-3.53	-1.71
	p	0.15	0.82	0.01	0.71	0.01	0.17	0.00	0.09
серая сильно-оподзоленная N=9	Σ ранг 1	562	659	553	650	593	624	615	621
	Σ ранг 2	218	121	227	131	188	156	166	159
	U	97	76	88	86	128	111	121	114
	Z	-1.25	1.95	-1.55	1.63	-0.23	0.78	0.47	0.68
	p	0.21	0.05	0.12	0.10	0.82	0.43	0.64	0.49
	Группа 1	серая N=30							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	698	652	526	637	658	630	647	707
	Σ ранг 2	337	383	510	399	378	406	389	329
	U	217	187	61	172	193	165	182	209
	Z	0.18	-0.90	-3.95	-1.28	-0.77	-1.44	-1.04	0.39
	p	0.86	0.37	0.00	0.20	0.44	0.15	0.30	0.70

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

От обменной кислотности зависит подвижность фосфора и есть достоверные различия по фосфору при различиях в обменной кислотности, что наблюдается у среднеоподзоленной по сравнению с неоподзоленной, слабооподзоленной, сильнооподзоленной почвами (табл. 5,7). По содержанию калия достоверно отличаются слабо- и сильнооподзоленная почвенные разности (табл. 5). По сумме оснований и содержанию аммонийного азота достоверных различий не выявлено (табл. 5-8). Интересно, что не выявлено

различий между неоподзоленной и сильнооподзоленной почвами. Возможно, это обусловлено тем, что выборки имеют разный размер, сильнооподзоленная почва имеет малую выборку (N=9), а выборка неоподзоленной почвы больше в три раза (N=30).

Таблица 6. U-тест Манна-Уитни, слой 0-20 см, серая слабооподзоленная

	группа 1	серая слабооподзоленная N=21							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая средне-оподзоленная N=24	Σ ранг 1	417	572*	415	536	596	418	315	389
	Σ ранг 2	619	464	621	500	440	618	720	647
	U	186	164	184	200	140	187	84	158
	Z	-1.50	2.00	-1.55	1.18	2.55	-1.48	-3.81	-2.14
	p	0.13	0.05	0.12	0.24	0.01	0.14	0.00	0.03
серая сильно-оподзоленная N=9	Σ ранг 1	296	399	311	383	330	343	333	317
	Σ ранг 2	170	66	155	82	136	122	132	148
	U	65	21	80	37	91	77	87	86
	Z	-1.34	3.30	-0.66	2.58	0.16	0.77	0.32	-0.36
	p	0.18	0.00	0.51	0.01	0.87	0.44	0.75	0.72
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	394	409	278	372	385	340	344	371
	Σ ранг 2	272	258	389	295	281	326	322	296
	U	152	138	47	141	154	109	113	140
	Z	0.16	0.63	-3.55	-0.53	-0.10	-1.54	-1.41	-0.56
	p	0.87	0.53	0.00	0.60	0.92	0.12	0.16	0.57

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Таблица 7. U-тест Манна-Уитни, слой 0-20 см, серая среднеоподзоленная

	Группа 1	серая среднеоподзоленная N=24							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая сильно-оподзоленная N=9	Σ ранг 1	406	456	423	454	367	456	475*	452
	Σ ранг 2	155	105	139	107	194	105	86	109
	U	106	60	94	62	67	60	41	64
	Z	-0.06	1.92	0.57	1.84	-1.64	1.92	2.69	1.76
	p	0.95	0.05	0.57	0.07	0.10	0.05	0.01	0.08
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	530	452	407	438	427	445	494	504
	Σ ранг 2	250	328	373	342	353	335	286	277
	U	130	152	107	138	127	145	166	157
	Z	1.43	-0.79	-2.09	-1.20	-1.52	-1.00	0.39	0.66
	p	0.15	0.43	0.04	0.23	0.13	0.32	0.70	0.51

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Таблица 8. U-тест Манна-Уитни, слой 0-20 см, серая сильнооподзоленная

	Группа 1	серая сильнооподзоленная N=9							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	135	67*	69	80	111	89	93	110
	Σ ранг 2	166	234	231	220	190	211	207	191
	U	46	22	24	35	66	44	48	65
	Z	1.28	-2.71	-2.56	-1.91	-0.09	-1.37	-1.13	-0.15
	p	0.20	0.01	0.01	0.06	0.93	0.17	0.26	0.88

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Слой 20-40 см меньше, чем слой 0-20 см подвержен перемешиванию при обработке почвы, поэтому почвенные разности отличаются в этом слое по большему числу параметров. По содержанию нитратного азота и калия выявлено шесть попарных достоверных отличий между почвенными разностями (табл. 9-12).

Таблица 9. U-тест Манна-Уитни, слой 20-40 см, почва серая

	Группа 1	серая N=30							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая слабо-оподзоленная N=21	Σ ранг 1	785	672*	700	779	954	790	900	769
	Σ ранг 2	542	654	627	548	373	536	426	557
	U	311	207	235	314	142	305	195	304
	Z	0.08	-2.06	-1.53	-0.02	3.31	0.18	2.29	-0.20
	p	0.94	0.04	0.13	0.98	0.00	0.86	0.02	0.84
серая средне-оподзоленная N=24	Σ ранг 1	741	803	720	958	1062	876	802	696
	Σ ранг 2	744	682	766	527	424	610	684	789
	U	276	338	255	227	124	310	337	231
	Z	-1.45	-0.37	-1.83	2.31	4.11	0.87	-0.40	-2.24
	p	0.15	0.71	0.07	0.02	0.00	0.38	0.69	0.03
серая сильно-оподзоленная N=9	Σ ранг 1	553	639	552	683	696	680	549	576
	Σ ранг 2	228	142	229	97	84	100	232	205
	U	88	97	87	52	39	55	84	111
	Z	-1.57	1.27	-1.60	2.75	3.18	2.65	-1.70	-0.80
	p	0.12	0.21	0.11	0.01	0.00	0.01	0.09	0.42
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	623	530	485	797	707	630	705	598
	Σ ранг 2	412	505	550	239	328	405	330	437
	U	158	65	20	119	208	165	210	133
	Z	-1.60	-3.84	-4.92	2.55	0.40	-1.43	0.35	-2.20
	p	0.11	0.00	0.00	0.01	0.69	0.15	0.73	0.03

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Почва со вторым гумусовым горизонтом имеет отличия от всех почв по содержанию гумуса, калия и нитратного азота (табл. 9-12). Почва со вторым гумусовым горизонтом содержит больше гумуса в слое 20-40 см, чем все остальные почвенные разности.

Таблица 10. U-тест Манна-Уитни, слой 20-40 см, серая слабоподзоленная

	Группа 1	серая слабоподзоленная N=21							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая средне- оподзоленная N=24	Σ ранг 1	415	553	470	617*	523	535	381	401
	Σ ранг 2	620	483	566	419	513	501	654	635
	U	184	183	239	119	213	201	150	170
	Z	-1.54	1.57	-0.30	3.03	0.89	1.16	-2.31	-1.87
	p	0.12	0.12	0.77	0.00	0.37	0.25	0.02	0.06
серая сильно- оподзоленная N=9	Σ ранг 1	288	388	321	390	330	401	256	309
	Σ ранг 2	177	78	144	75	136	65	209	157
	U	57	33	90	30	91	20	25	78
	Z	-1.67	2.78	-0.18	2.90	0.16	3.37	-3.12	-0.75
	p	0.09	0.01	0.86	0.00	0.87	0.00	0.00	0.46
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	337	323	275	474	335	358	333	334
	Σ ранг 2	329	343	392	192	332	309	333	333
	U	106	92	44	72	104	127	102	103
	Z	-1.64	-2.09	-3.64	2.73	-1.72	-0.98	-1.76	-1.75
	p	0.10	0.04	0.00	0.01	0.09	0.33	0.08	0.08

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Содержание нитратного азота и калия в почве со вторым гумусовым горизонтом меньше чем в неоподзоленной и слабооподзоленной почве, но выше чем в среднеоподзоленной и сильнооподзоленной почвах. Обменная кислотность достоверно выше у неоподзоленной почвы по сравнению с другими почвенными разностями, кроме почвы со вторым гумусовым горизонтом, но при этом по pH неоподзоленная почва достоверно отличается от почвы со вторым гумусовым горизонтом и среднеоподзоленной почвы (табл. 9). Насыщенность основаниями почвенного поглощающего комплекса неодинакова в слое 20-40 см. Выявлены достоверные отличия в сумме оснований сильнооподзоленной почвой от всех остальных почвенных разностей. У сильнооподзоленной почвы сумма оснований значительно ниже,

чем у других почвенных разностей. По содержанию подвижного фосфора слабоподзоленная почва отличается от всех почвенных разностей, кроме почвы со вторым гумусовым горизонтом (табл. 10). По содержанию аммонийного азота различий не выявлено, как и в слое 0-20 см.

Таблица 11. U-тест Манна-Уитни, слой 20-40 см, серая среднеподзоленная

	Группа 1	серая среднеподзоленная N=24							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая сильно- оподзоленная N=9	Σ ранг 1	391	444	413	440	385	457*	381	434
	Σ ранг 2	170	118	148	122	177	104	180	127
	U	91	73	103	77	85	59	81	82
	Z	-0.67	1.41	0.18	1.25	-0.93	1.96	-1.07	1.03
	p	0.50	0.16	0.86	0.21	0.35	0.05	0.28	0.30
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	472	365	364	508	404	415	486	454
	Σ ранг 2	308	415	417	273	376	366	294	327
	U	172	65	64	153	104	115	174	154
	Z	-0.22	-3.31	-3.35	0.78	-2.18	-1.88	0.16	-0.75
	p	0.83	0.00	0.00	0.44	0.03	0.06	0.87	0.45

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Таблица 12. U-тест Манна-Уитни, слой 20-40 см, серая сильнооподзоленная

	Группа 1	серая сильнооподзоленная N=9							
группа 2		N-NH ₄	NO ₃	C%	K ₂ O	pH _{KCl}	Σ осн.	P ₂ O ₅	pH
серая с ВГГ N=15	Σ ранг 1	119	49*	60	94	83	61	140	94
	Σ ранг 2	182	252	241	207	217	239	160	206
	U	62	4	15	49	38	16	40	49
	Z	0.33	-3.79	-3.13	-1.10	-1.73	-3.04	1.61	-1.07
	p	0.74	0.00	0.00	0.27	0.08	0.00	0.11	0.28

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Таким образом, в слоях 0-20 см и 20-40 см между почвенными разностями агросерых почв есть достоверные различия. Из-за перемешивания обрабатываемого слоя 0-20 см почвы в этом слое имеют меньше различий, чем в слое 20-40 см. Но есть показатели, по которым почвы отличаются в обоих слоях – это содержание гумуса и нитратного азота. В обоих слоях в почве со вторым гумусовым горизонтом содержание гумуса выше, чем в других

почвенных разностях. В слое 20-40 см имеются достоверные различия, связанные со степенью оподзоленности почвы, что проявляется в таких показателях, как обменная кислотность, рН, сумма оснований.

Таблица 13. Корреляция физико-химических свойств в слое 0-20 см

N=99	рН	рН _{KCl}	Σ осн	NO ₃	N-NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅
рН _{KCl}	-0.76*						
Σ осн	0.26	-0.003					
NO ₃	-0.13	0.09	0.02				
N-NH ₄	-0.02	0.04	-0.16	0.04			
K ₂ O	0.22	-0.26	0.04	0.04	-0.01		
P ₂ O ₅	0.53	-0.58	0.42	0.42	0.06	0.5	
гумус	-0.003	0.37	0.62	0.62	0.02	-0.02	0.13

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

В слое 0-20 обменная кислотность имеет сильную обратную связь с рН (табл. 13), что объясняется связью между этими видами кислотности. Содержание обменного фосфора имеет положительную среднюю связь с рН и отрицательную - с обменной кислотностью. Известно, что на доступность фосфора влияет кислотность почв. В данном случае, чем больше обменная кислотность, тем меньше содержание подвижного фосфора. Содержание гумуса имеет среднюю положительную связь с суммой оснований и содержанием NO₃: чем больше оснований и азота, тем больше содержание гумуса, что наблюдается в почве со вторым гумусовым горизонтом и неоподзоленной почве по сравнению с почвами разной степени оподзоленности.

В слое 20-40 см, корреляций между агрохимическими показателями меньше, чем в слое 0-20 см (табл. 14). В подпахотном слое имеется сильная прямая связь содержания гумуса и обменной кислотности, что связано со степенью оподзоленности, а в более оподзоленных почвах обменная кислотность ниже, как и содержание гумуса. Также имеется средняя прямая связь содержания гумуса с содержанием нитратного азота, как в слое 0-20 см.

Таблица 14. Корреляция физико-химических свойств в слое 20-40 см

N=99	pH	pH _{KCl}	Σ осн	NO ₃	N-NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅
pH _{KCl}	-0.29						
Σ осн	0.23	0.31					
NO ₃	0.14	0.46	0.45				
N-NH ₄	-0.01	0.26	0.11	0.22			
K ₂ O	-0.14	-0.29	0.26	0.01	0.06		
P ₂ O ₅	0.15	-0.18	-0.32	-0.17	0.24	-0.03	
гумус	0.34	0.73*	0.47	0.59	0.24	-0.35	-0.08

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Длительное сельскохозяйственное использование агросерых почв Владимирского Ополья уменьшает различия между почвенными разностями в обрабатываемом 0-20 см слое. Результаты согласуются с выводами, сделанными в работе (Гончаров, 2010), где исследовались агрофизические свойства, в результате которых в пахотном слое происходит выравнивание свойств почв, а в подпахотном слое различия между почвенными разностями сохраняются и оказывают влияние на рост и развитие растений. При внесении удобрений содержание питательных веществ в слое 0-20 см повышается по сравнению со слоем 20-40 см во всех почвенных разностях. Однако содержание подвижного фосфора в почвах имеет зависимость от обменной кислотности. В слое 20-40 см больше, чем в слое 0-20 см агрохимических показателей, по которым между почвенными разностями существуют различия. В подпахотном слое проявляются особенности почвенных разностей, связанные со степенью оподзоленности: pH, обменная кислотности и сумма оснований ниже при большей степени оподзоленности. В этом слое также почва со вторым гумусовым горизонтом содержит больше всего гумуса и связанного с ним нитратного азота.

3.1.2. Агрохимические свойства пахотного слоя агросерых почв на склоне

На склоновом поле в 48 точках были определены следующие параметры пахотного слоя: плотность, содержание гумуса, pH и обменная кислотность, содержание подвижных форм калия и фосфора. Рельеф оказывает влияние на кислотность и содержание гумуса в пахотном горизонте, а также на содержание и доступность для растений фосфора и калия. Для исследования особенностей распределения фосфора и калия в пахотном слое на склоне было обследовано поле в нижней части склона к реке Каменка (ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ»).

Плотность пахотного слоя (рис. 11а) была от 1 до 1.3 кг/м³, что соответствует оптимальному диапазону плотности для суглинистых почв по А.Г. Бондареву (Шейн, 2006). Наибольшее значение плотности 1.3 кг/м³ наблюдалось в ложбине. Прослеживается некоторое снижение плотности в точках с повышенным содержанием гумуса.

Содержание гумуса в пахотном слое (рис. 11б) составляет от 2.5% до 5.5%. Содержание гумуса в пахотном слое неравномерно. В ложбине содержание гумуса меньше 3%. На участке заметны пятна с содержанием гумуса больше 4%. И пятна с содержанием гумуса ниже 3%.

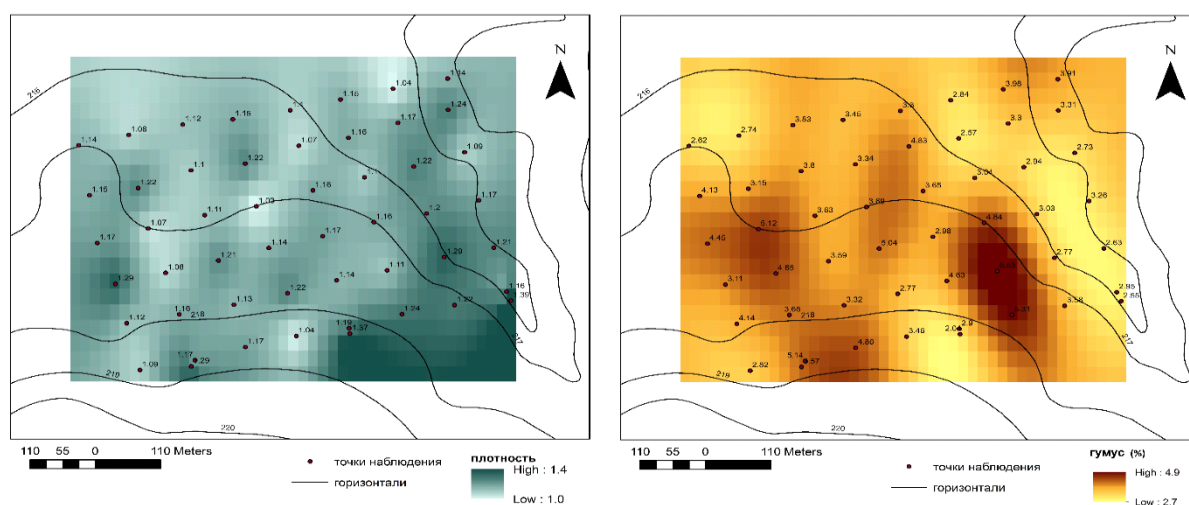


Рисунок 11. Распределение (а) плотности и (б) содержания гумуса в пахотном слое

Пахотный слой имеет слабокислую реакцию от 6.25 до 6.5. pH_{H_2O} вниз по склону повышается равномерно (рис. 12а). Обменная кислотность распределена не так равномерно, как pH_{H_2O} (рис. 12б) Высокие показания pH_{KCl} наблюдаются в ложбине и есть точка на поле с $pH_{KCl}=6.18$. Высокая обменная кислотность может говорить о накоплении подвижных форм фосфора и калия.

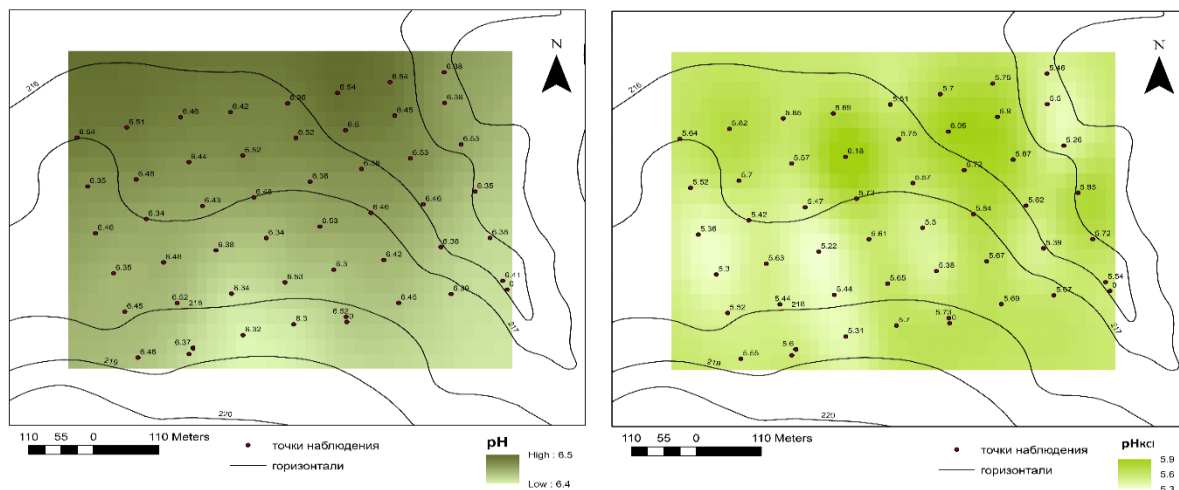


Рисунок 12. Распределение (а) pH_{H_2O} (б) pH_{KCl} пахотного слоя

Подвижные формы калия и фосфора (рис. 13) накапливаются в ложбине. Но 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, где на развороте техники и произошло механическое накопление. Также есть точка с содержанием фосфора, превышающим среднее значение более чем в два раза. Отбор проб методом конверта исключает случайный характер этого показания. Также в этой точке высокий pH_{KCl} , что подтверждает возможность накопления фосфора.

Содержание подвижных форм фосфора имеет среднюю связь с pH_{KCl} и слабую с pH_{H_2O} (табл. 15) Также содержание подвижных форм калия имеет слабую связь с содержанием фосфора.

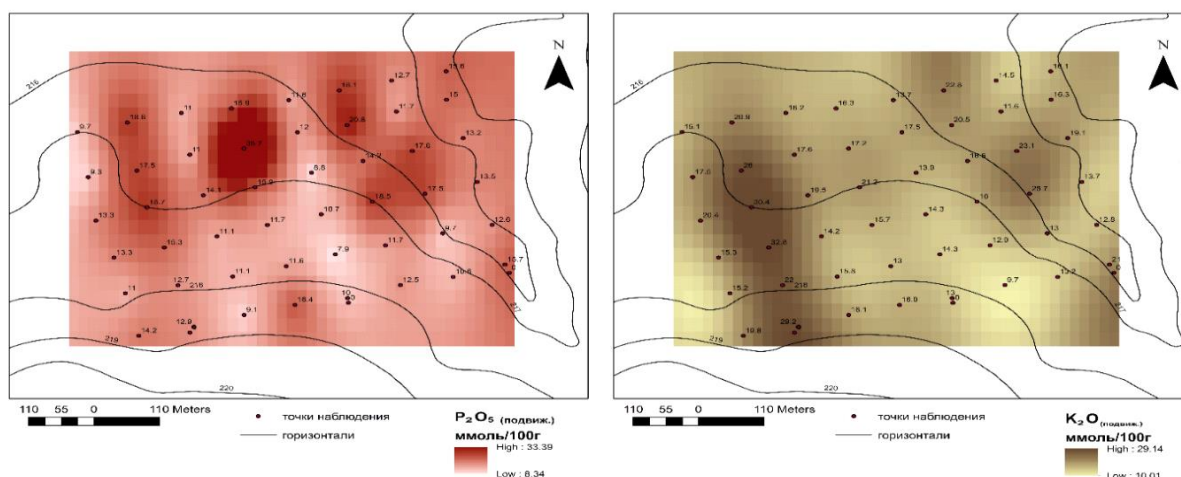


Рисунок 13. Распределение подвижных форм (а) калия и (б) фосфора

И также существует связь между водной и солевой кислотностью и обратная зависимость между pH_{H_2O} и содержанием гумуса. В точках с низким содержанием гумуса pH_{H_2O} ниже, что характерно для ложбины.

Таблица 15. Корреляционный анализ физико-химических свойств пахотного горизонта серой лесной почвы (0-20 см) Владимирского Ополя

	Среднее	pH_{KCl}	Гумус, %	P_2O_5	K_2O	Плотность
pH_{H_2O}	6.43 ± 0.07	0.39*	-0.31	0.29	0.16	-0.08
pH_{KCl}	5.61 ± 0.20		-0.16	0.57	-0.01	-0.05
Гумус, %	3.65 ± 0.83			-0.15	0.11	-0.23
P_2O_5 , ммоль/100г	13.84 ± 4.55				0.38	0.02
K_2O , ммоль/100г	17.70 ± 4.96					-0.26

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Таким образом, подвижность фосфора и калия зависит от кислотности пахотного слоя, которая, в свою очередь, связана с комплексностью почвенного покрова. В распределении подвижных форм фосфора и калия важную роль играет рельеф. Примером этого может быть наличие ложбины, в которой может происходить их накопление, как и в нашем случае. Агротехника как фактор влияет на механическое перемещение калия и фосфора в пахотном слое в составе почвенных агрегатов.

3.2 Гранулометрический и микроагрегатный состав агросерых почв

Гранулометрический состав исследованных почв методом седиментометрии (Рис. 14) типичен для почв Владимирского Ополя. Содержание крупной пыли составляет более 40%, средней пыли – 10-20%, илистой фракции – от 10 до 30%. Полученные результаты близки к данным, опубликованным в работе В.В. Окоркова (2010). В соответствии с классификацией Н.А. Качинского пахотные горизонты среднесуглинистые крупнопылеватые, горизонты ВТ тяжелосуглинистые крупнопылеватые. Горизонт BELg агросерой глееватой почвы – среднесуглинистый, а BELg агросерой типичной глубокопахотной – тяжелосуглинистый. Во всех трёх почвах количество физической глины увеличивается вниз по профилю, а содержание ила в горизонтах ВТ примерно в два-три раза выше, чем в горизонтах Р и BEL.

Гранулометрический состав исследованных почв при определении методом ЛД получился однородным, без существенных различий по горизонтам в отличие от результатов, полученных методом седиментометрии. Разница между определением пипет-методом (ПМ) и методом лазерной дифракции (ЛД) содержания фракции ила в горизонтах ВТ составляет более 20%. Подобные результаты при использовании классификации Н.А. Качинского к результатам ЛД были показаны в работе (Юдина и др., 2020).

Распределение микроагрегатов и элементарных почвенных частиц показано на рис. 15. В пахотных горизонтах содержится больше микроагрегатов, чем в подпахотных горизонтах. Однако содержание микроагрегатов в агрозёма языковатого у горизонтов ВТу и Р близко. Средневзвешенный диаметр микроагрегатов (СВД) составляет от 170.9 до 244.0 мкм (табл. 16).

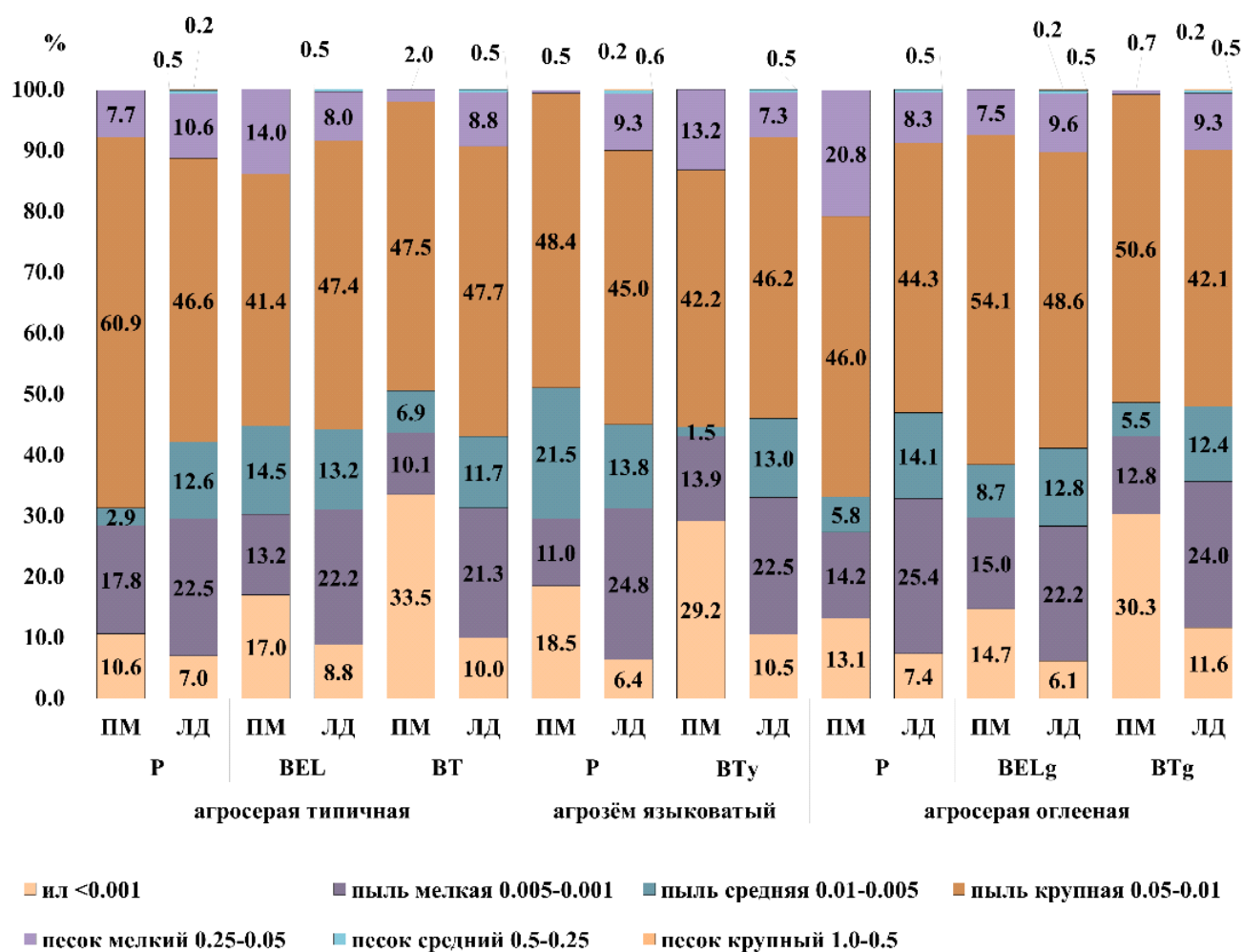


Рисунок 14. Гранулометрический состав; ПМ – метод седиментометрии, ЛД – метод лазерной дифракции.

Максимальный СВД характерен для горизонта BELg агросерой глееватой почвы, но содержание микроагрегатов в этом горизонте наименьшее. Наиболее крупные микроагрегаты из пахотных горизонтов у агросерой типичной глубокопахотной почвы. Был вычислен коэффициент дисперсности (Кд): отношение частиц <0.001 мм при гранулометрическом анализе к частицам <0.001 мм при микроагрегатном анализе в процентах. Наиболее дисперсным является горизонт Р агрозёма, а горизонт Р агросерой глееватой почвы, наоборот высоко оструктуренный, горизонты BEL и BT хорошо оструктурены.

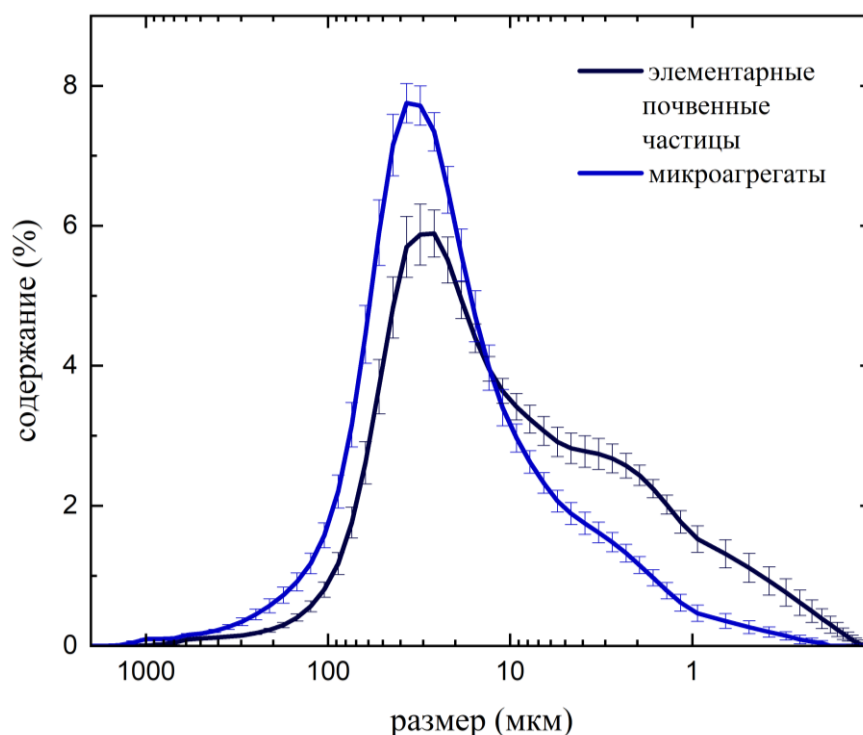


Рисунок 15. Дифференциальное распределение ЭПЧ и микроагрегатов агросерых почв на склоне.

Таблица 16. Характеристика микроагрегатного состава агросерых почв на склоне

Почва	агросерая типичная глубокопахотная			агрозём языковатый		агросерая глееватая мелкопахотная		
Горизонт	Р	BEL	BT	Р	BTy	Р	BELg	BTg
СВД, мкм	200.9	195.9	213.4	189.6	170.9	183.2	244.0	188.8
Содержание	20.1%	18.8%	19.6%	20.5%	21.6%	22.6%	17.8%	19.7%
Кд	18%	23%	22%	32%	19%	12%	15%	21%

Пахотные горизонты почв Владимирского Ополя имеют крупные микроагрегаты, их СВД в два раза больше, чем у серых лесных почв Тульской области (СВД=67-101 мкм) и близок к СВД чернозёмов Курской области (90-250 мкм). Однако содержание микроагрегатов в исследованных пахотных агросерых Владимирского Ополя почв ниже, чем в пахотных серых лесных почвах Тульской области (25%) и в два раза ниже, чем в пахотных горизонтах чернозёмов (50%) (Филиппова и др., 2019).

3.3. Структурное состояние агросерых почв

3.3.1. Влияние обработок на структуру пахотного слоя агросерой почвы

Влияние систем обработок на агрегатный состав пахотного слоя исследовано для агросерых почв на участке опыта АЛСЗ. С 24 делянок были отобраны образцы слоя 0-20 см.

Содержание агрономически ценных агрегатов в агросерой почве составляет от 69 до 93%, что соответствует отличному структурному состоянию (табл. 17). Средневзвешенный диаметр агрегатов (СВД) составляет от 3.6 до 6.1 мм. Самое низкое среднее значение коэффициента структурности 3.7 наблюдается при отвальной системе обработки, а наибольшее 4.6 – при комбинированно-ярусной системе обработки.

Таблица 17. 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
К _{стр}	3.7	2.7	5.0	0.9	23.9
К _{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
К _{стр}	4.2	3.1	5.4	0.8	20.3
К _{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
К _{стр}	4.6	2.5	6.2	1.7	36.8
К _{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
К _{стр}	4.4	2.3	7.4	1.7	39.5
К _{в-пр}	47.7	15.0	81.0	25.3	53.0

Коэффициент водоустойчивости при противоэрозионной системе обработке 47.7 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

большой неоднородности структуры агросерой почвы при данной системе обработки. Самая низкая вариация показателей структурного состояния у агросерой почвы – это вариация при комбинированно-плоскорезной системе обработки, что свидетельствует о формировании однородной почвенной структуры при данной системе обработки.

Однако используя эти коэффициенты для почв, имеющих такие высокие показатели, трудно оценить влияние систем обработки на структурное состояние, поэтому, чтобы сравнить соотношение всех фракций агрегатов был выбран анализ агрегатного состава методом главных компонент (МГК) (Мешалкина, 2008; Холодов, 2016).

Результаты определения содержания агрегатов были обобщены с помощью метода главных компонент (МГК). В статье (Мищенко и др., 2020) метод главных компонент был применен ко всему массиву данных, а в настоящем исследовании данные по агрегатному составу были рассмотрены отдельно для трёх севооборотов, в данном случае культурами были: черный пар, занятый пар и пшеница. На рисунке 17 представлено распределение агрегатного состава агросерых почв в воздушно-сухом состоянии.

Содержание фракций меньше 1 мм составляет меньше 10% в пахотном слое агросерых почв. На черном пару доминирующие фракции – >10 мм и 1-2 мм, их содержание составляет больше 15%. На занятом пару разброс в содержании агрегатов крупнее 5 мм и особенно >10 мм больше, чем на черном пару и пшенице. Под пшеницей содержание фракции >10 мм меньше, чем при парах, что может быть связано с обработками при посеве и действием корневых систем.

Большую часть дисперсии $>80\%$ обеспечивают две главные компоненты (ГК) (табл. 18). Первая главная компонента имеет больший вклад в дисперсию, чем вторая компонента на занятом пару и пшенице, а на черном пару значение вклада первой и второй компоненты различаются всего на 10%. Для воздушно-сухих агрегатов фракции крупнее 3 мм дают в основном положительный вклад в компоненты (табл. 18), кроме фракции >10 мм при занятом пару. Фракции

<3 мм вносят отрицательный вклад в компоненты. Только для первой главной компоненты значимы фракции 3-2, 2-1, 0.5-0.25 и <0.25 мм - они несут отрицательный вклад, а фракция 10-7 мм – положительный вклад в компоненту. Для второй главной компоненты во всех вариантах значима только фракция 5-3 мм. Таким образом, на координатной плоскости главных компонент крупные фракции смещают образец в правый верхний угол, а мелкие – в левый нижний (рис. 17).

Таблица 18. Вклад фракций агрегатов в компоненты

вариант	ГК	вклад, %	>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25
черный пар	1	48	0.7*	0.7	0.3	-0.3	-0.8	-1.0	0.0	-0.9	-0.9
	2	38	-0.65	0.6	0.8	0.9	0.6	0.0	-0.7	-0.5	0.0
занятый пар	1	60	0.3	0.9	0.6	0.3	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9
	2	32	-0.9	0.4	0.8	0.9	0.5	-0.1	0.0	0.1	0.5
пшеница	1	69	0.9	0.9	0.9	-0.1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.9	-0.9
	2	18	-0.1	-0.2	0.1	0.9	0.5	0.4	-0.4	-0.4	-0.4

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Агрегатный состав различен на вариантах культур: черный пар, занятый пар и пшеница. На черном и занятом пару разброс между агрегатным составом при одной обработке больше, чем под пшеницей. На черном пару при плоскорезной системе обработки преобладают мелкие агрегаты (рис. 16), а при противоэрозионной системе крупные фракции >5 мм. При комбинированно-ярусной и отвальной системах обработки, в одном из вариантов содержится больше мелких агрегатов. На занятом пару при комбинированно-плоскорезной и отвальной системах количество агрегатов <3 мм больше, чем при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки. Под пшеницей при отвальной системе обработки содержание агрегатов >5 мм больше, чем при других системах обработки. При комбинированно-плоскорезной системе обработки преобладают агрегаты <3 мм.

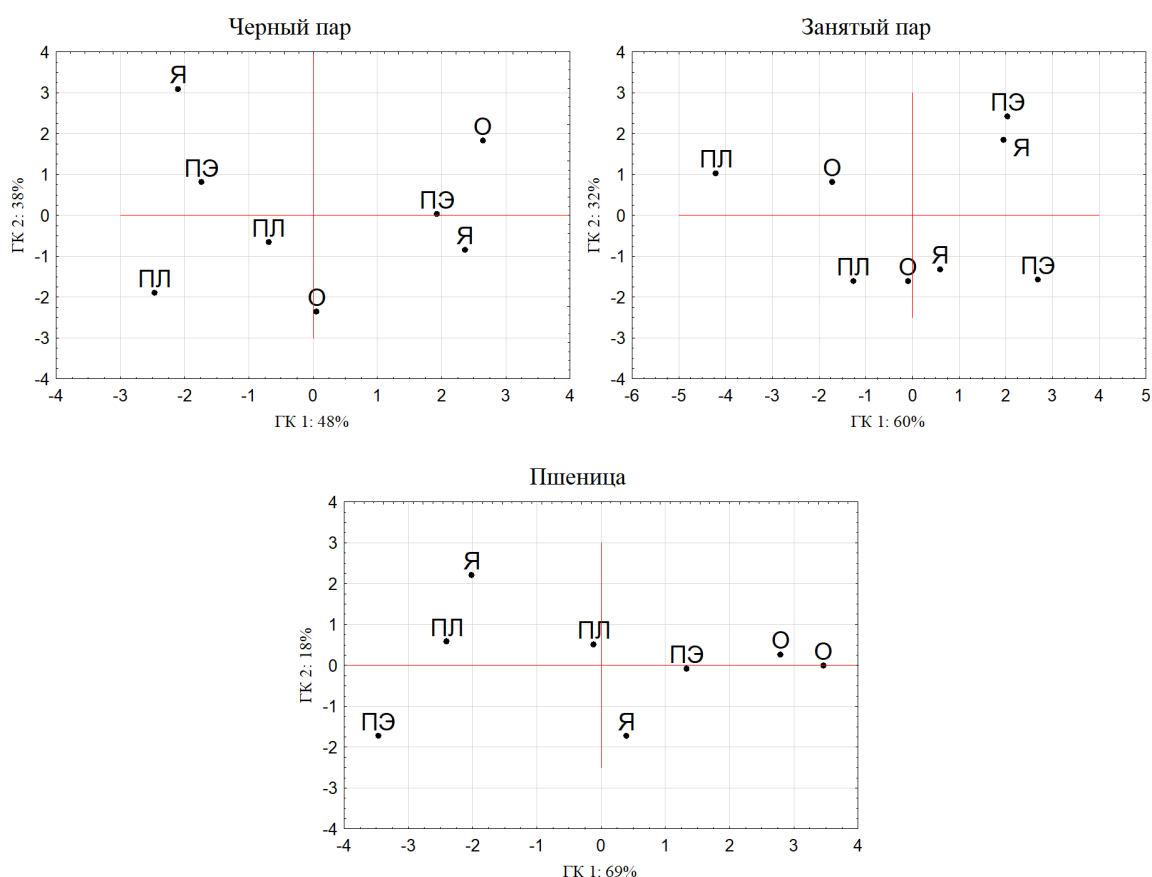


Рисунок 16. Распределение почв в слое 0-20 см, охарактеризованных сухим просеиванием

Обозначения: ЧП – черный пар; ЗП – занятый пар; ПШ – пшеница; О – отвальная обработка; Пл – плоскорезная обработка; Я – ярусная обработка; ПЭ – протиэрозионная обработка

Для *водопрочных агрегатов* (табл. 19) на черном пару, первая и вторая главные компоненты почти равнозначны так же, как и для сухих агрегатов. На занятом пару и пшенице вклад второй главной компоненты $<20\%$ и нет значимых для неё фракций, т.е. различия в агрегатном составе определяются в основном первой главной компонентой. На занятом пару и пшенице фракции водопрочных агрегатов <2 мм смещают образец в левый нижний угол, а фракции >3 мм в правый верхний. На черном пару наоборот агрегатов <2 мм смещают образец в право, а крупные влево.

Таблица 19. Вклад фракций водопрочных агрегатов в компоненты

вариант	ГК	Вклад, %	>5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0,25
Черный пар	1	38	-0.9*	0.2	0.7	0.8	0.2	0.0	0.7
	2	32	0.2	-0.9	-0.5	0.3	0.8	0.1	0.5
занятый пар	1	75	1.0	0.9	-0.68	-0.9	-0.9	-0.9	-0.7
	2	17	0.0	-0.4	-0.67	-0.2	-0.2	-0.1	0.66
пшеница	1	66	1.0	0.7	0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-0.8
	2	19	-0.1	-0.6	0.2	-0.6	-0.5	0.0	0.6

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

На черном пару при плоскорезной обработке преобладают агрегаты 3-0.5 мм (рис. 17), а при противоэрозионной - крупные фракции 5-3 мм. При комбинированно-ярусной и отвальной обработке сохранились агрегаты >5мм. На занятом пару при комбинированно-плоскорезной и отвальной системах больше количество агрегатов >3 мм, чем при комбинированно-ярусной и противоэрозионной. Под пшеницей при отвальной обработке содержание агрегатов >5 мм выше, чем при других обработках. При комбинированно-плоскорезной преобладают агрегаты <3 мм. Соотношение водопрочных агрегатов на разных делянках при одной обработке оказалось ближе, чем содержание воздушно-сухих агрегатов при разных системах обработки, эти образцы близко расположены друг к другу на координатной плоскости.

Можно предположить, что влияние системы обработки почв проявляется в первую очередь в водоустойчивости агрегатов. Наибольший разброс в содержании водопрочных агрегатов при всех культурах происходит при противоэрозионной системе обработки. Черный пар является звеном севооборота, агрегатный состав при котором имеет больше отличий от агрегатного состава при занятом пару и пшенице. Это проявляется в том, что влияние второй компоненты близко к влиянию первой компоненты, а также, что при анализе водопрочных агрегатов вклад фракций обратный относительно занятого пара и пшеницы.

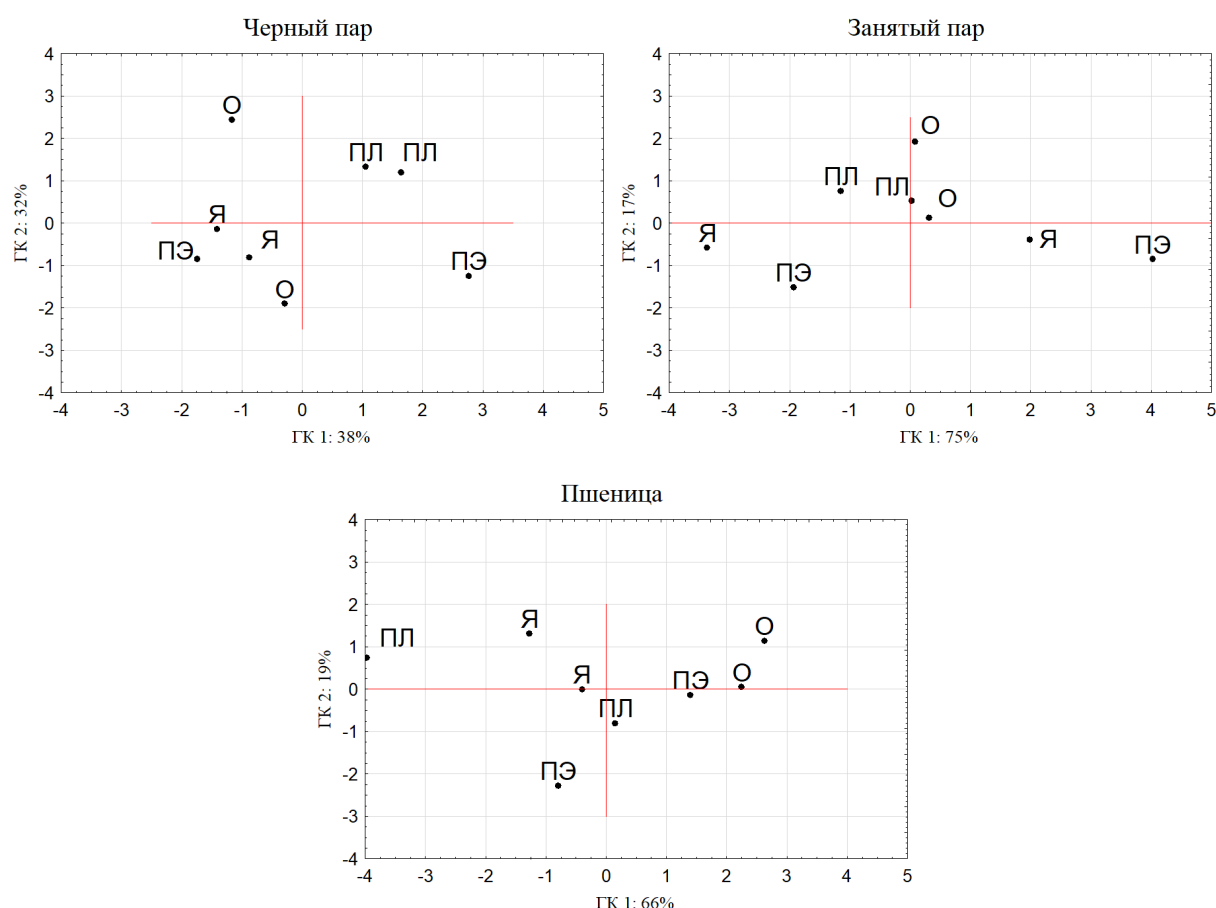


Рисунок 17. Распределение почв в слое 0-20 см, охарактеризованных содержанием водопрочных агрегатов: Обозначения: ЧП – черный пар; ЗП – занятый пар; ПШ – пшеница; Отв – отвальная обработка; Э – плоскорезная обработка; Я – ярусная обработка; П – противоэрозионная обработка

Результат исследования структурного состояния агросерых почв при многолетних травах и парах подтверждает данные, ранее полученные сотрудниками Владимирского ВНИИСХ. В частности, показано существенное отличие комбинированно-плоскорезной обработки от других по влиянию на структурное состояние почвы, что согласуется с ранее опубликованными данными для этих почв (Зинченко, 2013, 2019). В образцах почв при комбинированно-плоскорезной обработке в поверхностном слое 0-20 см содержалось меньше агрегатов >10 мм по сравнению с образцами при других системах обработки. Также показано, что на черном пару по сравнению с занятым значительно увеличивается доля агрегатов >10 мм. Содержание

водопрочных агрегатов пропорционально содержанию воздушносухих агрегатов.

Таким образом, высокие показатели структурного состояния с низкой вариацией у агросерой почвы при комбинированно-плоскорезной системе обработки свидетельствуют о формировании однородной почвенной структуры. Самый высокий коэффициент вариации показателей структурного состояния при противоэрозионной системе говорит о большой неоднородности структуры агросерой почвы при этой системе обработки.

3.3.2. Особенности агрегатного состава почвы со вторым гумусовым горизонтом

Для выявления различий агрегатного состава между агросерой и агросерой почвой со вторым гумусовым горизонтом были отобраны образцы с участка АЛСЗ в слое 0-20 см и слое 20-40 см. У агросерой почвы показатели структурного состояния в слое 20-40 см, несколько ниже, а вариация выше, чем в слое 0-20 см (табл. 20). Слой 0-20 см у агросерой и агросерой со вторым гумусовым горизонтом имеет почти одинаковые значения показателей структурности. Однако, в слое 20-40 см почвы со вторым гумусовым горизонтом коэффициент структурности и содержание агрономически ценных агрегатов выше. У агросерой со вторым гумусовым горизонтом средневзвешенный диаметр и водоустойчивость в слое 20-40 см меньше, чем в слое 0-20 см, но коэффициент структурности и содержание агрономически ценных агрегатов выше. Таким образом, получается, что слой 20-40 см у агросерой почвы со вторым гумусовым горизонтом более агрегирован, чем слой 0-20 см. Это может быть связано с тем, что при наличии второго гумусового горизонта в слое 20-40 см содержится больше гумуса, чем в слое 0-20 см.

Таблица 20. Характеристики структуры агросерой и агросерой почвы со вторым гумусовым горизонтом

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

Почвы со вторым гумусовым горизонтом отличаются от других агросерых почв по агрофизическим показателям, а интегральное плодородие этих почв выше, чем у остальных почв. Второй гумусовый горизонт находится обычно в слое, не затрагиваемом обработкой, но при глубоких рыхлениях и других глубоких обработках может смешиваться с пахотным слоем, поэтому в почвах со вторым гумусовым горизонтом и в пахотном слое просматривается его влияние. Содержание гумуса в пахотном слое выше более чем на 1%, чем в слое 20-40 см (рис. 18 а). В агросерой почве со вторым гумусовым горизонтом содержание гумуса в пахотном и подпахотном слоях выше, чем в агросерой почве. При этом содержание гумуса в слое 20-40 см выше в целом на 0.5%. Содержание гумуса неодинаково в разных фракциях агрегатов, особенно велика разница в содержании гумуса во фракции >10 мм: 3.9% в слое 0-20 см и 5.1% в слое 20-40 см (рис. 18 б).

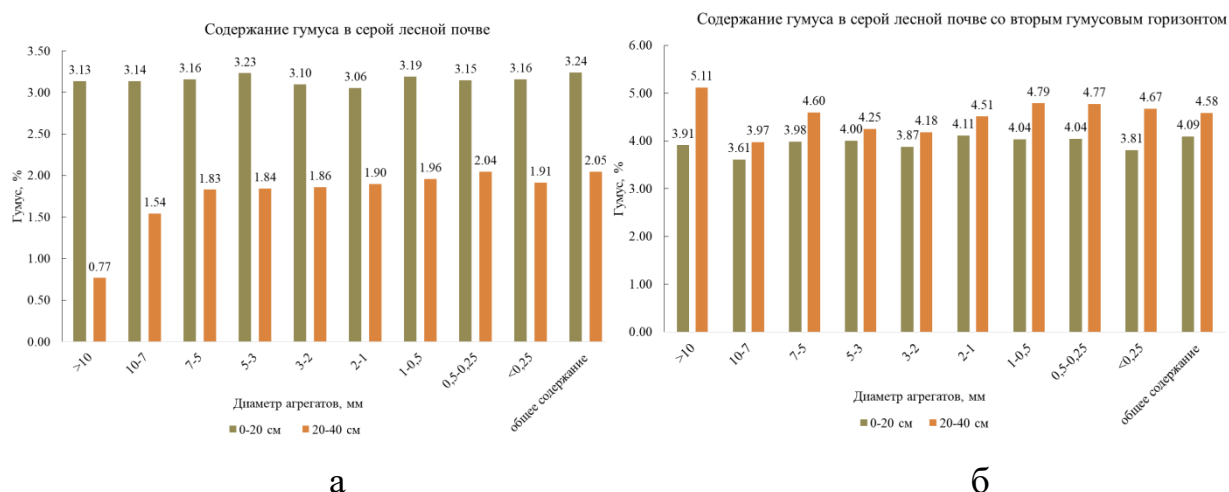


Рисунок 18. Содержание гумуса в агрегатах серой лесной почвы без (а) и с ВГГ (б) в слое 0-20 см и 20-40 см

В целом пахотный и подпахотный слои исследованных почв имеют отличное структурное состояние. Для серой лесной почвы характерно изменение структурного состояния вниз по профилю: уменьшается количество агрономически ценных агрегатов, уменьшается водоустойчивость агрегатов. Однако у серой лесной почвы со вторым гумусовым горизонтом слой 20-40 см, наоборот имеет более высокие значения показателей структурного состояния (табл. 20), что объясняется наличием в этом слое второго гумусового горизонта. Эти различия показателей структурного состояния не зависят от обработки и при комбинированно-плоскорезной системе, в которой обработка ведётся до 20 см, и при противоэрозионной - с глубокой вспашкой до 35 см. Почвы, при комбинированно-ярусной и комбинированно-плоскорезной системах обработки имеют более высокие значения коэффициента структурности по сравнению с почвой при отвальной системе обработки (табл. 20). Значения коэффициент структурности в слое 0-20 см и слое 20-40 см близки при противоэрозионной системе обработки. В слое 0-20 см при противоэрозионной системе обработки водопрочность выше по сравнению с отвальной обработкой, но при этом в слое 20-40 см происходит снижение этого показателя почти на единицу по сравнению с аналогичным слоем почвы при отвальной обработке. Тоже самое наблюдается и при

комбинированно-плоскорезной, а также комбинированно-ярусной обработках. Содержание всех исследованных фракций воздушно-сухих и водоустойчивых агрегатов представлены в приложении 2.

Первая и вторая главные компоненты описывают большую (>80 %) часть вариации рассматриваемых характеристик объектов в обоих слоях. Первая, наиболее значимая компонента, вносит вклад в характеристику объектов 50%, соответственно, вклад второй составляет 30% (табл. 21). В слое 0-20 см наиболее значимы для первой компоненты как крупные >10 мм, 10-7 мм, так и мелкие 0.5-0.25, <0.25 мм фракции. Для второй компоненты определяющие фракции 3-2 мм. В слое 20-40 см наиболее значимы для первой компоненты фракции <0.25 и 5-3 мм. Для второй компоненты – 1-0.5 мм.

Таблица 21. Вклад фракций агрегатов в компоненты

Слой, см	ГК	Вклад, %	>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25
0-20	1	57	0.9*	1.0	0.6	0.5	-0.3	-0.8	-0.7	-0.9	-0.8
	2	30	-0.2	0.1	0.8	-0.8	0.9	-0.6	-0.3	0.3	0.3
20-40	1	54	0.7	-0.2	-0.8	0.9	-0.8	0.8	-0.3	-0.6	-1.0
	2	35	0.6	0.9	0.5	0.0	0.4	-0.5	-0.9	-0.7	-0.2

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

В слое 0-20 см (рис. 19, а) в положительной зоне первой компоненты находятся варианты с отвальной, комбинированно-ярусной и противозерозионной системами обработки. Для них характерно высокое содержание фракций >10 и 10-7 мм и по второй компоненте фракции – 5-3 мм. Для находящихся в отрицательной зоне первой компоненты вариантов с комбинированно-плоскорезной обработкой характерно большее содержание агрегатов <2 мм и по второй компоненте содержание агрегатов 5-3 см (ПЛ/ВГГ и ПЛ/С) и 7-5, 3-2 (ПЛ/С).

В слое 20-40 см (рис. 19 б) в положительной зоне первой компоненты находятся варианты агросерой при отвальной, плоскорезной и противозерозионной обработками, для них характерно высокое содержание фракций >10, 5-3 мм и 2-1 по второй компоненте фракции 10-7 мм, у агросерой

при ярусной обработке больше мелких агрегатов. Для находящихся в отрицательной зоне первой компоненты вариантов агросерой со вторым гумусовым горизонтом и варианта ПЛ/С характерно большее содержание агрегатов <1 мм.

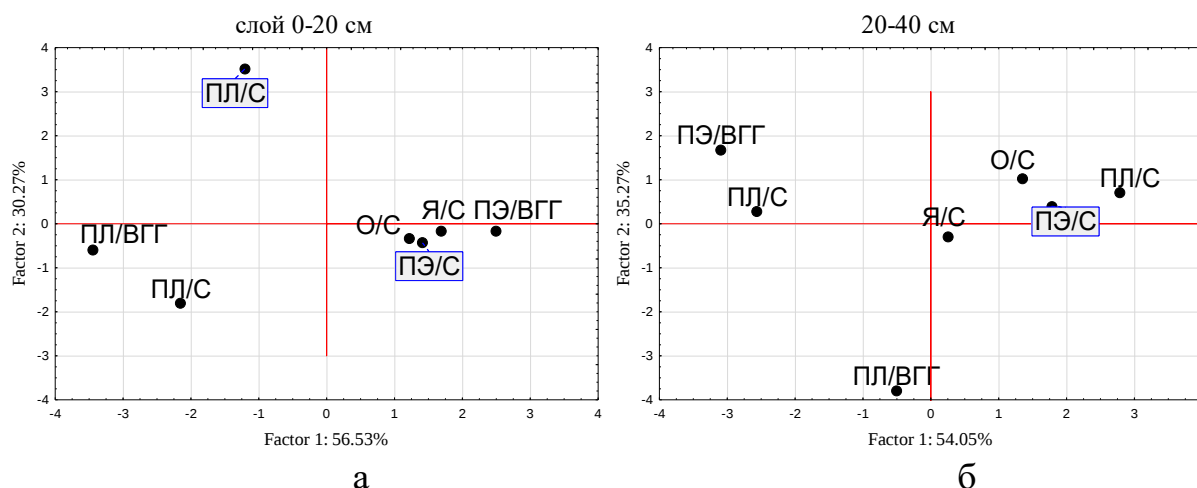


Рисунок 19. Распределение почв в слое 0-20 (а) и 20-40 см (б), охарактеризованных сухим просеиванием в координатах главных компонент:

О – отвальная обработка; ПЛ – плоскорезная обработка; Я – ярусная обработка; ПЭ – противоэрозионная обработка, С-агросерая, ВГГ- агросерая со вторым гумусовым горизонтом.

Таким образом, при плоскорезной обработке формируется агрегатный состав с меньшим количеством агрегатов >7 мм. В слое 20-40 см у почв со вторым гумусовым горизонтом особый агрегатный состав с большим количеством мелких агрегатов.

При МГК анализе (табл. 22) водопрочных агрегатов в слое 0-20 см наиболее значимы для первой компоненты агрегаты от 1 до <0.25 мм. Для второй компоненты определяющие фракции 3-2 и 2-1 мм. В слое 20-40 см наиболее значимы для первой компоненты фракции <0.25 и 1-0.5 мм. Для второй компоненты – 5-3 мм.

Таблица 22. Вклад фракций водопрочных агрегатов в компоненты

слой, см	фактор	Вклад, %	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	<0,25
0-20	1	55	0.7*	0.0	-0.4	-0.9	-0.9	1.0
	2	27	-0.5	0.8	-0.8	-0.1	0.1	0.0
20-40	1	59	-0.1	-0.8	-0.9	-0.9	-0.66	1.0
	2	29	-0.9	-0.5	-0.4	0.2	0.66	-0.2

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

В слое 0-20 см (рис. 20, а) в положительной зоне первой компоненты находятся варианты с отвальной, ярусной и противоэрозионной обработками, для которых характерно высокое содержание фракций <0.25 и 5-3 мм и по второй компоненте для противоэрозионной обработки фракции 3-2 мм. Для находящихся в отрицательной зоне первой компоненты вариантов с плоскорезной обработкой характерно большее содержание агрегатов 1-0.25 мм и по второй компоненте 2-1 мм (ПЛ/ВГГ и ПЛ/С) и 3-2 мм (ПЛ/С). В слое 20-40 см (рис. 20, б) в положительной зоне первой компоненты находятся варианты агросерой при отвальной и агросерой со вторым гумусовым горизонтом, для которых характерно высокое содержание фракций <0.25 мм; по второй компоненте фракции 10-7 мм у агросерой при ярусной обработке больше агрегатов 5-3 мм. Для находящихся в отрицательной зоне первой компоненты вариантов ПЛ/С, характерно большее содержание агрегатов >0.5 мм.

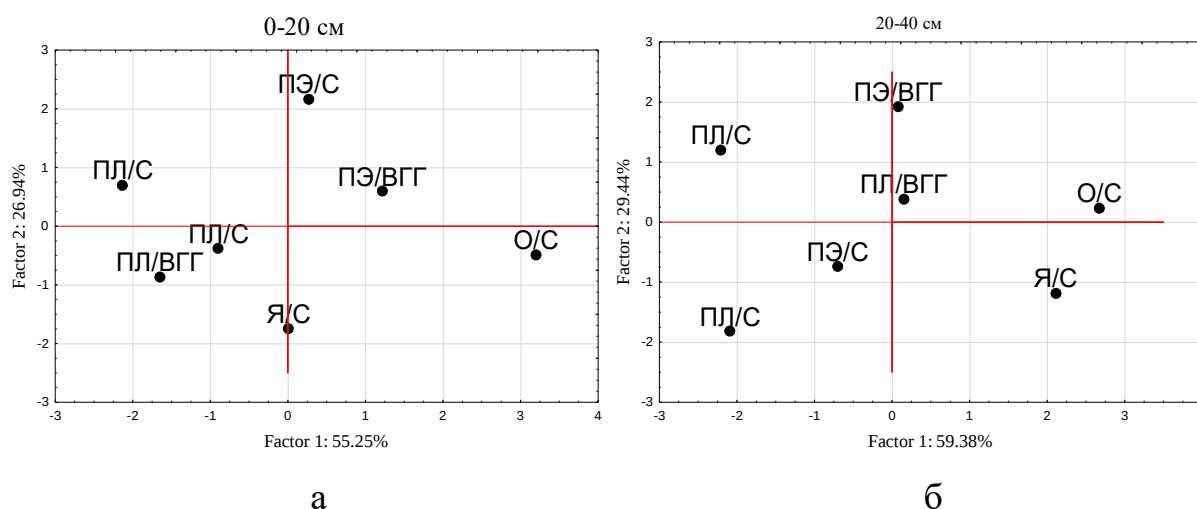


Рисунок 20. Распределение почв в слое 0-20 (а) и 20-40 см (б),

охарактеризованных сухим просеиванием в координатах главных компонент:

О – отвальная обработка; ПЛ – плоскорезная обработка; Я – ярусная обработка; ПЭ – противоэрозионная обработка, С-агросерая, ВГГ- агросерая со вторым гумусовым горизонтом.

Таким образом, сравнение пахотного и подпахотного слоёв агросерой почвы и агросерой со вторым гумусовым горизонтом показало, что слой 0-20 см у агросерой и агросерой со вторым гумусовым горизонтом имеет почти одинаковые значения показателей структурности. Однако в слое 20-40 см коэффициент структурности и содержание агрономически ценных агрегатов выше в почве со вторым гумусовым горизонтом. 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. Также метод главных компонент позволил выделить влияние системы обработки на структуру почвы. При плоскорезной системе обработки формируется агрегатный состав с меньшим количеством агрегатов <7 мм. В слое 0-20 см при плоскорезной обработке водоустойчивость агросерой почвы выше, чем при других системах обработки. В слое 20-40 см у почв со вторым гумусовым горизонтом агрегатный состав отличается большим количеством мелких агрегатов, но этот слой имеет высокую оструктуренность. Однако в слое 20-40 см водопрочность почв со вторым гумусовым горизонтом меньше, чем у агросерых почв без второго гумусового горизонта.

3.3.3. Структурное состояние агросерых почв на склоне

На поле, расположенном на в нижней части склона к р. Каменка, структурный состав был проанализирован для пахотного и подпахотных горизонтов. Результаты определения агрегатного состава и водоустойчивости агрегатов представлены в таблице 23 и приложении 4.

Таблица 23. Агрегатный состав и водоустойчивость

горизонт		С-ние АЦА	К _{стр}	К _{в-пр}
агросерая типичная глубокопахотная	P	90%	7.2	55%
	BEL	67%	2.3	60%
	BT	71%	2.4	24%
агрозём языковатый	P	80%	4.0	49%
	BTy	91%	10.8	62%
агросерая глееватая мелкопахотная	P	67%	2.0	28%
	BELg	74%	2.8	42%
	BTg	50%	1.0	29%

В качестве показателей использованы: содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА), т.е. сумма содержаний фракций от 0.25 мм до 10 мм; коэффициент структурности (К_{стр.}), т.е. отношение агрономически ценных агрегатов к сумме фракций >10 мм и <0.25 мм и коэффициент водопрочности (К_{в-пр.}), т.е. сумма содержания фракций >0.25 мм.

Самым структурным является пахотный горизонт агросерой типичной глубокопахотной (К_{стр.} = 7.2), также он обладает высокой водоустойчивостью и имеет самое большое содержание агрономически ценных агрегатов. Пахотный горизонт агрозёма языковатого имеет меньшую оструктуренность. Но при этом интересно, что горизонт BTy агрозёма имеет отличную водопрочную структуру. Почва агросерая глееватая содержит меньше агрономически ценных агрегатов и водопрочность её неудовлетворительная.

Пахотный горизонт агросерой типичной почвы имеет наименьший средневзвешенный диаметр агрегатов (табл. 24), но содержание

агрономически ценных агрегатов выше, чем у других почв. У агросерой глееватой средневзвешенный диаметр агрегатов пахотного горизонта значительно больше 6.1 мм против 4.8 и 3.3 мм, а содержание агрономически ценных агрегатов ниже на 10%, чем у других пахотных горизонтов. Агросерая глееватая почва содержит меньше 50% водоустойчивых агрегатов, и диаметр их меньше, чем у других почв. Выявлена взаимосвязь (-0.9) между средневзвешенным диаметром и содержанием агрономически ценных и водоустойчивых агрегатов. Чем крупнее агрегаты, тем меньше процент агрономически ценных агрегатов и водоустойчивых агрегатов. Это характерно для агросерой глееватой почвы ложбины. Большему содержанию агрономически ценных агрегатов соответствует большее количество водоустойчивых агрегатов (0.85), и средневзвешенный диаметр агрегатов микроагрегатов отрицательно коррелирует (-0.8) с содержанием микроагрегатов.

Таблица 24. Интегральные показатели структуры

Почва	горизонт	агрегаты естественного сложения		водоустойчивые агрегаты (5-0.25 мм)		микроагрегаты	
		СВД, мм	АЦА, %	СВД, мм	Содерж., %	СВД, мкм	Содержание, %
агросерая типичная глубокопахотная	P	3.3	90	1.0	54	200.9	20.1
	BEL	6.2	70	1.2	48	195.9	18.8
	BT	7.2	71	1.0	37	213.4	19.6
агрозём языковатый	P	4.8	81	0.9	59	189.6	20.5
	BT	4.8	92	1.5	54	170.9	21.6
агросерая глееватая мелкопахотная	P	6.1	67	0.8	46	183.2	22.6
	BELg	5.9	74	1.1	47	244.0	17.8
	BTg	8.9	50	0.8	30	188.8	19.7
Корреляции							
агрегаты естественного сложения	СВД, мм						
	АЦА, %	-0.92*					
водоустойчивые агрегаты (5-0,25 мм)	СВД, мм	-0.34	0.60				
	Содерж., %	-0.91	0.85	0.36			
Микроагрегаты	СВД, мкм	0.07	-0.10	-0.08	-0.17		
	Содерж., %	-0.22	0.20	-0.11	0.22	-0.80	

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

При МГК анализе (табл. 25) воздушно-сухих агрегатов наиболее значимы для первой компоненты агрегаты от 3 до <0.25 мм и фракции 7-10 и >10 мм. Для второй компоненты определяющие фракции 7-5 и 5-3 мм. Среди водопрочных агрегатов наиболее значимы для первой компоненты фракции <0.25 и >5 мм. Для второй компоненты – 2-1 мм.

Таблица 25. Вклад фракций агрегатов в компоненты

агрегаты	ГК	вклад, %	>10	10- 7	7-5	5-3	3-2	2-1	1- 0.5	0.5- 0.25	<0.25
воздушно- сухие	1	63	0.8*	0.9	0.4	-0.2	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.8
	2	30	0.6	-0.2	-0.9	-1.0	-0.6	0.0	0.2	0.2	0.2
водопрочные	1	73			1.0	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.9	-1.0
	2	19			0.2	-0.6	-0.3	-0.8	-0.2	0.4	0.3

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

На координатной плоскости горизонты по содержанию воздушно-сухих агрегатов (рис. 21, а) разделились достаточно чётко. Гумусовые горизонты, содержащие больше агрегатов <3 мм, находятся в четвёртой четверти. ВТ горизонты, в которых содержится больше крупных фракций, находятся в первой четверти. ВТ агрозёма языковатого содержит большое количество агрегатов 7-3 мм и находится далеко от остальных ВТ горизонтов. Между Р и ВТ горизонтами располагаются ВЕЛ горизонты. У водопрочных горизонтов (рис. 21б) относительное расположение образцов сохраняется. Горизонты располагаются относительно оси первой компоненты по уменьшению агрегатов: агросерая глееватая, агросерая типичная, агрозём языковатый.

Метод главных компонент показал, что соотношение агрегатов в горизонтах пахотных, элювиальных и иллювиальных отличается друг от друга. При этом наибольший разброс в агрегатном составе у иллювиальных горизонтов, а наименьший – у горизонтов элювиальных. Таким образом, агрегатный состав агросерых почв на склоне различается. Наиболее однородной по агрегатному составу почвы является агрозём языковатый.

Агрегаты пахотного горизонта агросерой типичной глубокопахотной имеют меньший диаметр по сравнению с агрегатами пахотного горизонта агроёма языковатого. Агросерая глееватая почва отличается большим количеством глыб >10 мм и мелких агрегатов <0.25 мм, а также низкой водоустойчивостью агрегатов.

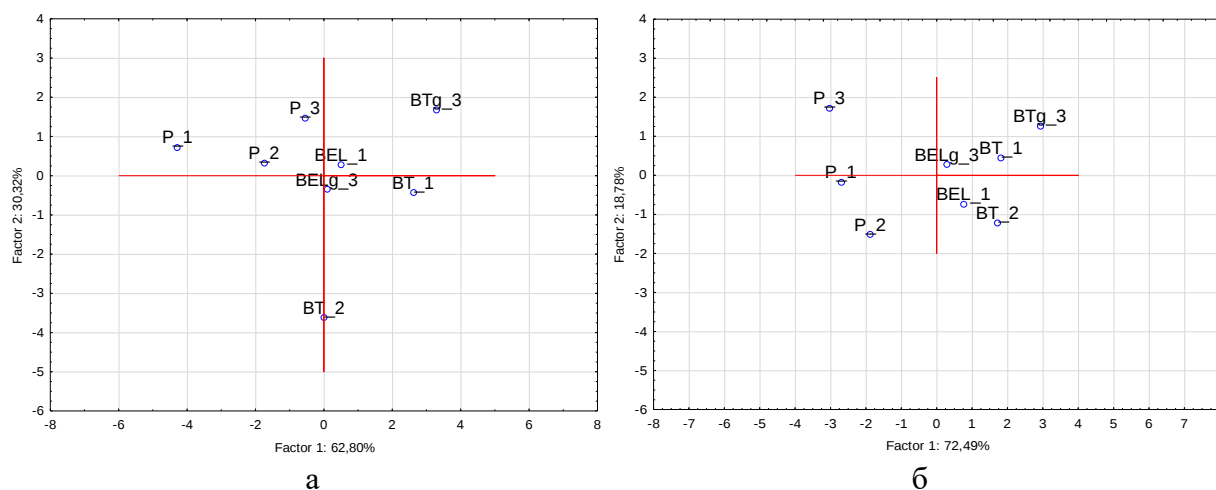


Рисунок 21. МГК: воздушно-сухие агрегаты (а) и водопрочные агрегаты (б); P_1, BEL_1, BT_1 – горизонты агросерой типичной глубокопахотной, P_2, BT_2 – горизонты агроёма языковатого, P_3, BELg_3, BTg_3 – горизонты агросерой глееватой мелкопахотной

3.4. 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%). В первом случае агрегаты являются упруго-хрупкими телами с конденсационными контактами между частицами. Между частицами капиллярно-насыщенных агрегатов находятся плёнки воды, и контакты между частицами имеют коагуляционный характер. Прочность агрегатов зависит от содержания влаги, гранулометрического состава и содержания органического вещества (Хайдапова, 2007). Большое содержание мелкодисперсных фракций

обеспечивает рост числа межчастичных контактов, особенно в воздушно-сухих агрегатах. Органическое вещество способствует формированию большего числа микроагрегатов, что приводит к уменьшению плотности агрегатов. В срединных горизонтах с малым содержанием органического вещества происходит непосредственное взаимодействие почвенных частиц. Это приводит к формированию агрегатов с низкой пористостью и высокой прочностью (Пестонова 2007). Результаты анализа прочности воздушно-сухих и капиллярно-насыщенных агрегатов агросерых почв, а также их корреляции с содержанием ила, физической глины и гумуса представлены в таблице 26.

Таблица 26. Прочностные характеристики агрегатов, гранулометрический состав, содержание органического вещества и корреляции между ними

Почва	горизонт	Сорг, %	Гран. состав седиментометрия		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 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 ВТу агроёма языковатого. Прочность агрегатов увеличивается вниз по профилю почв в соответствии с увеличением количества илистых частиц, между которыми формируются прочные конденсационные межчастичные связи при отсутствии плёнок органического вещества. Чем больше содержание илистой фракции, тем прочнее агрегаты.

Прочность воздушно-сухих агрегатов имеет прямую зависимость с содержанием илистой фракции (0.78) и обратную с содержанием гумуса (-0.80). Прочность горизонтов ВТ выше, чем горизонтов Р, так как в горизонтах ВТ выше содержание илистой фракции и значительно меньше гумуса.

При капиллярном насыщении прочность агрегатов снижается с десятков до десятых долей килограмма на квадратный сантиметр. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов обратно зависит от влажности (-0.71). Органическое вещество аккумулирует большое количество воды, вследствие чего, влажность пахотных горизонтов выше, чем у ВТ горизонтов. Плёнки воды расклинивают микроагрегаты и частицы, и в результате прочность капиллярно-насыщенных агрегатов гумусированных горизонтов оказывается в два-три раза ниже, чем у нижележащих горизонтов. Меньшую прочность при капиллярном-насыщении агрегатов BEL агросерой типичной, чем агрегатов горизонта Р, можно объяснить процессом оподзоливания. Однако прочность агрегатов BELg агросерой глееватой в три раза выше, чем в горизонте Р, что, вероятно, может быть обусловлено повышенным содержанием гумуса и образованием железо-органических соединений, которые увеличивают прочность агрегатов.

Таким образом, на механическую прочность агрегатов в значительной степени влияет их увлажнённость. Капиллярно-насыщенные агрегаты на два порядка менее прочные, чем воздушно-сухие агрегаты. Прочность агрегатов как в сухом, так и в увлажнённом состоянии зависит от содержания илистых частиц. Для сухих агрегатов важным фактором является содержание гумуса. Прочность капиллярно-насыщенных агрегатов зависит от влажности агрегатов, которая в свою очередь тоже связана с содержанием гумуса.

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 ВТ горизонтов. Плёнки воды расклинивают микроагрегаты и частицы, и в результате прочность капиллярно-насыщенных агрегатов гумусированных горизонтов становятся в два-три раза ниже, чем у нижележащих горизонтов. Прочность насыщенных агрегатов пахотных горизонтов уменьшается в ряду: агросерая типичная, агрозём языковатый, агросерая глееватая.

3.4. Реологические свойства агросерых почв

3.4.1. Влияние обработок на реологические свойства пахотного слоя агросерых почв

Диапазон линейного вязкоупругого поведения (linear viscoelastic range – LVE-range) – область, где модули упругости и вязкости имеют область постоянных величин в виде плато. Структура образца здесь не нарушается с увеличением деформации, и данная область считается диапазоном устойчивости образца к сдвигу, а упругое поведение преобладает над вязким.

Диапазон линейного вязкоупругого поведения при отвальной, комбинированно-плоскорезной и комбинированно-ярусной системах обработки составил 0.007% деформации, а при противоэрозионной системе обработки диапазон вязкоупругого поведения был несколько больше и составил 0.011% (рис. 22).

Переход от линейного вязкоупругого поведения к разрушению межчастичных связей начинался при сопротивлении сдвигу от 56 до 61 Па при отвальной, комбинированно-плоскорезной и комбинированно-ярусной системах обработки, а при противоэрозионной системе сопротивление сдвигу составило 84 Па. Значение модуля упругости в данной области говорит о прочности межчастичных связей в почвенном образце. Значение модуля упругости в

среднем составило 788 кПа. При комбинированно-ярусной системе обработки значение модуля упругости было несколько выше среднего – 833 кПа. При противоэрозионной системе обработки модуль упругости был ниже среднего – 769 кПа.

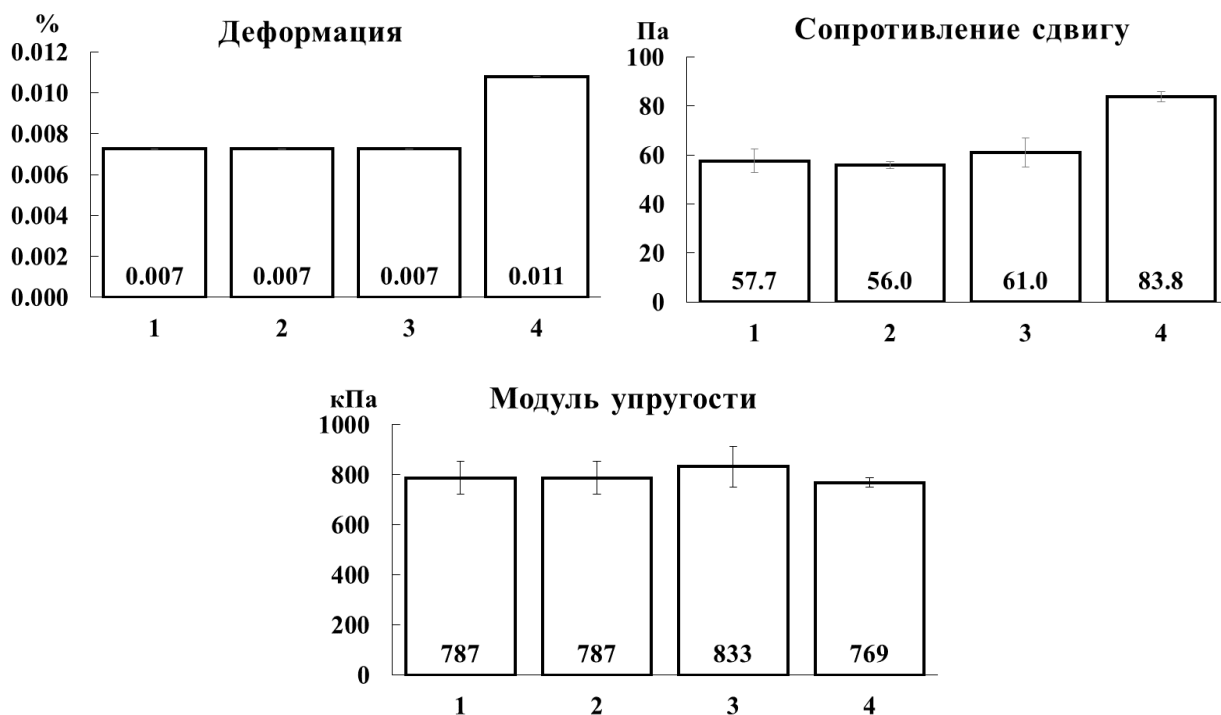


Рисунок 22. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в пределах вязкоупругого диапазона; Системы обработки: 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4– противоэрозионная

Максимальное сопротивление сдвигу (рис. 23) наблюдалось при деформации 0.39% при всех системах обработки кроме отвальной, при которой деформация составляла в среднем 0.45% с значительным разбросом. Значение максимального сопротивления сдвигу 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 в точке максимального сопротивления сдвигу в агросерой почве при отвальной системе обработки 141 кПа было несколько ниже, чем при

остальных обработках 156-166 кПа. Таким образом, агросерые почвы при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки оказывают большее сопротивление сдвигу.

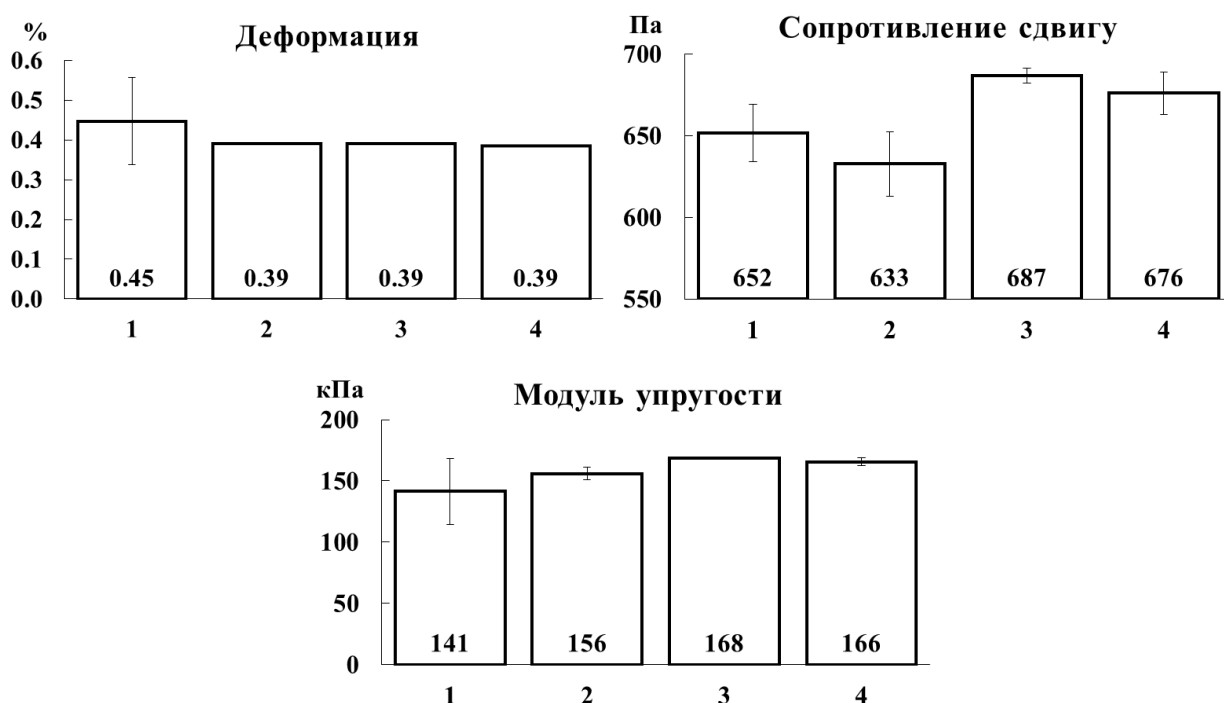


Рисунок 23. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в точке максимального сопротивления сдвигу; Системы обработки: 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4 – противоэрозионная

Разрушение структуры межчастичных связей (рис. 24) происходит в точке пересечения модулей упругости и вязкости. Она наблюдалась 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%.

При этом сопротивление сдвигу у агросерых почв при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки 565-572 Па выше, чем у агросерых почв при отвальной и комбинированно-плоскорезной системах обработки 474-504 Па. Модуль упругости 31-33 кПа для агросерых почв при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки был

выше, чем для агросерых почв при отвальной и комбинированно-плоскорезной системах обработки 20-24 кПа.

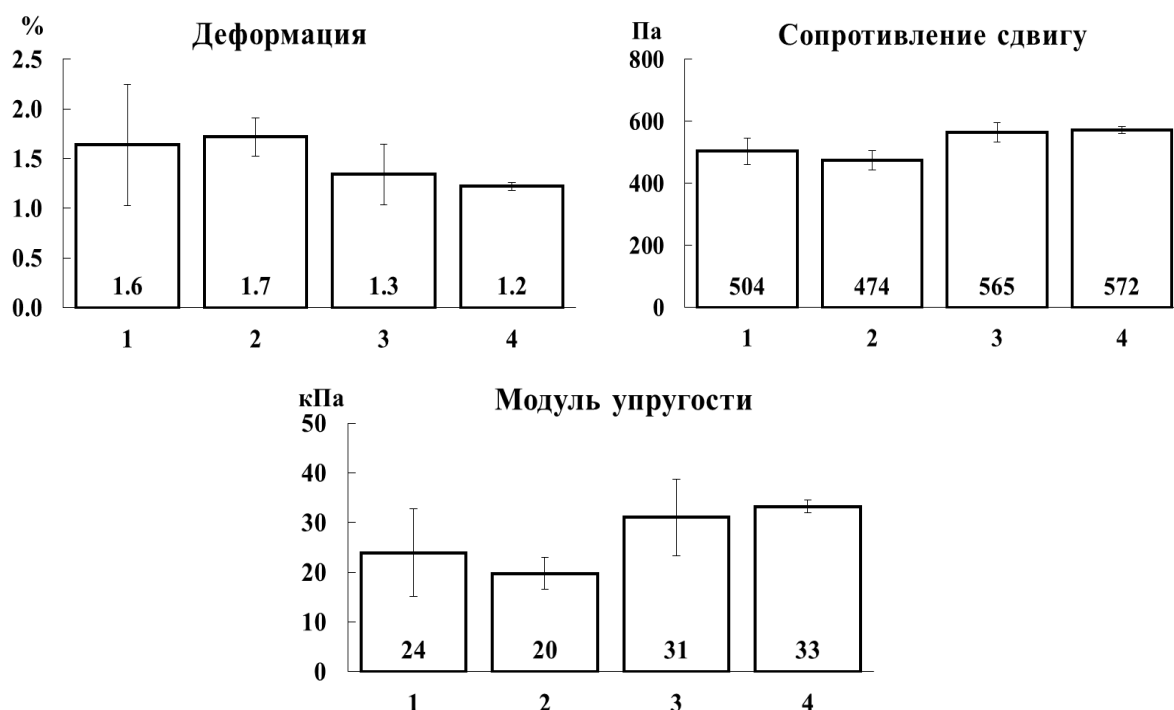


Рисунок 24. Реологические свойства агросерых почв при разных обработках в точке пересечения модулей упругости и вязкости; Системы обработки: 1 – отвальная, 2– комбинированно-плоскорезная; 3 – комбинированно-ярусная, 4 – противоэрозионная

Таким образом, у агросерой почвы при комбинированно-плоскорезной системе обработки оказалась наиболее пластичная структура межчастичных связей по сравнению с другими системами обработки.

Корреляционный анализ показал, что существует связь между реологическими свойствами агросерых почв с их агрегатным строением (табл. 27). Эта связь проявилась в том, что в точке максимального сопротивления сдвигу и в точке пересечения модулей упругости и вязкости значение модуля упругости коррелировало со средним диаметром (0.8 и 0.7), коэффициентом структурности (0.6 и 0.7) и водоустойчивости структуры (0.7 и 0.7).

Системы обработок почв оказывают влияние на реологические свойства пахотного горизонта агросерых почв, но это влияние неодинаково на разных

этапах разрушения структуры межчастичных связей. В начале агросерая почва при противоэрозионной системе обработки оказывает большее сопротивление сдвигу, в результате чего диапазон вязкоупругого поведения при этой системе обработки больше, чем при остальных системах обработки.

Таблица 27. Корреляции модуля упругости и показателей агрегатного состава

n=12 значимые ≥ 0.602	Модуль упругости		
	Диапазон линейного вязкоупругого поведения	Максимальное сопротивление сдвигу	Предел текучести
ср. диаметр	0.4	0.8*	0.7
коэффициент структурности	0.1	0.6	0.7
водоустойчивость структуры	0.2	0.7	0.7

*Отмечены значимые при $p < 0.05$

Вероятно, это может быть связано с меньшим рыхлением поверхностного слоя при противоэрозионной системе обработки, в результате чего в пахотном слое сформировалась более устойчивая структура межчастичных связей. Максимальное сопротивление сдвигу наблюдалось при одинаковой деформации в агросерой почве при трёх системах обработки, но отличалась в почве при отвальной системе обработки значительным разбросом, что может быть связано с оборотом пласта и припахиванием нижележащего горизонта. В агросерой почве при комбинированно-ярусной и противоэрозионной системах обработки разрушение структуры межчастичных связей (точка пересечение модулей упругости и вязкости) происходит при меньших значениях деформации и большем сопротивлении сдвигу, что говорит о большей хрупкости связей между почвенными частицами пахотного горизонта при этих системах обработки. Существует связь между реологическими свойствами и структурным состоянием на уровне агрегатов почвы, что проявилось в значимых зависимостях между модулем упругости и показателями структурности и водоустойчивости. Структура почвы на уровне

агрегатов и на уровне частиц зависит в первую очередь от содержания органического вещества и гранулометрического состава, и когда между частицами формируются более упругие связи, можно ожидать и лучшую структуру на уровне агрегатов.

3.4.2. Реологические свойства горизонтов агросерых почв на склоне

Диапазон вязкоупругого поведения (рис. 25) пахотного горизонта у агросерой типичной и агроёма языковатого составляет 0.007% деформации. У пахотного горизонта агросерой глееватой почвы диапазон вязкоупругого поведения в среднем больше и составляет 0.014%. Большой разброс в величине диапазона вязкоупругого поведения у пахотного горизонта агросерой глееватой почвы может быть обусловлен неоднородностью в свойствах почвенного материала переотложенного в ложбине. У элювиальных горизонтов диапазон вязкоупругого поведения больше, чем у пахотных, и составляет 0.011-0.013%. У иллювиальных горизонтов диапазон вязкоупругого поведения несколько меньше, чем у элювиальных горизонтов, и составляет 0.08-0.010%. Сопротивление сдвигу в конце вязкоупругого диапазона прямо зависит от диапазона вязкоупругого поведения. Наименьшее сопротивление сдвигу в конце вязкоупругого диапазона обнаружено у пахотных горизонтов агросерой типичной 58 Па и агроёма языковатого 51 Па. Сопротивление сдвигу в конце вязкоупругого диапазона пахотного горизонта агросерой глееватой почвы в среднем больше и составляет 98 Па. Самое большое сопротивление сдвигу в конце вязкоупругого диапазона у элювиальных горизонтов и составляет 109-123 Па. У иллювиальных горизонтов сопротивление сдвигу в конце вязкоупругого диапазона несколько меньше, чем у элювиальных горизонтов и составляет 73-86 Па. Значение модуля упругости в конце вязкоупругого диапазона минимальное у агроёма языковатого 696 кПа и агросерой глееватой почвы 697 кПа. Несколько больше модуль упругости был у агросерой типичной почвы 792 кПа, что может быть связано с большим содержанием гумуса в пахотном слое по сравнению с

агрозёмом языковатым и агросерой глееватой почвой. Значение модуля упругости в конце вязкоупругого диапазона наибольшее в элювиальных горизонтах 997 кПа и 958 кПа. У иллювиальных горизонтов значение модуля упругости в конце вязкоупругого диапазона несколько меньше, чем у элювиальных горизонтов и составляет 888-893 кПа. Таким образом, элювиальные горизонты обладают более прочной структурой межчастичных связей и выход из вязкоупругого состояния происходит при больших сдвиговых деформациях, чем у других горизонтов агросерых почв.

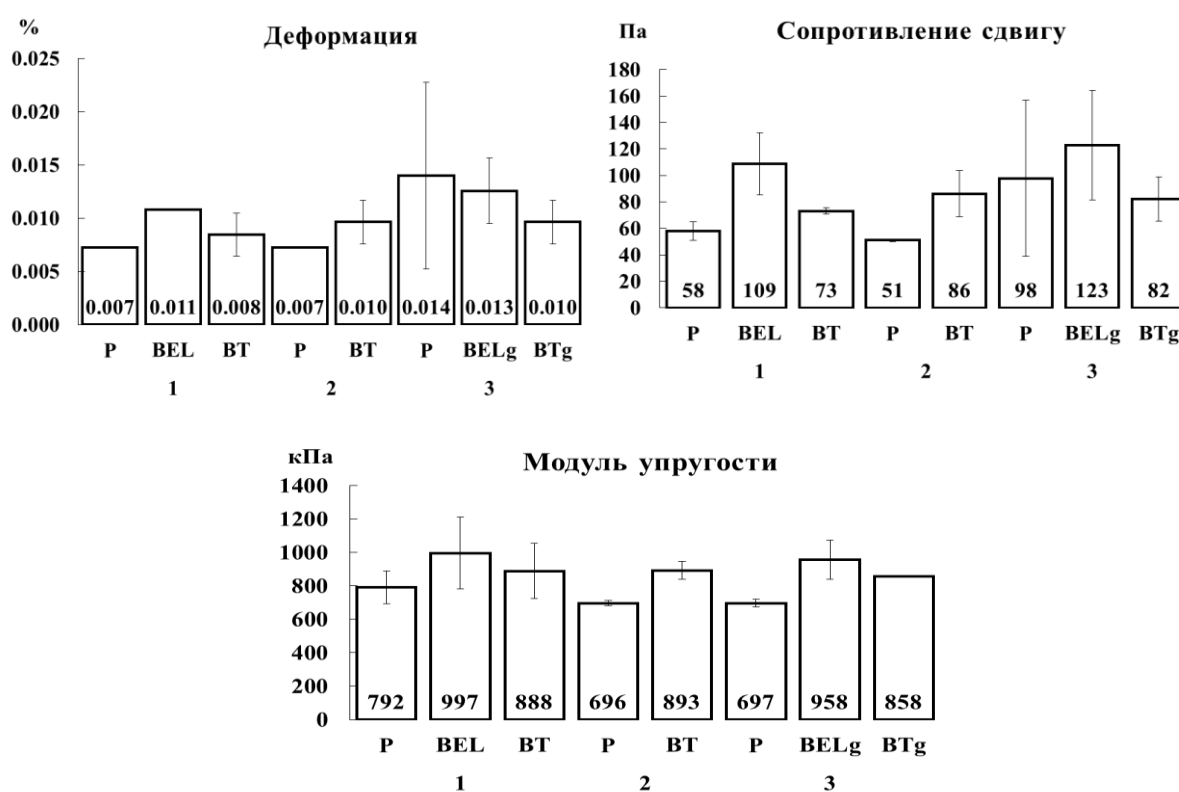


Рисунок 25. Реологические свойства агросерых почв в пределах вязкоупругого диапазона; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая.

Точка деформации с максимальным сопротивлением сдвигу (рис. 26) 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 близко у всех горизонтов и

составляет в среднем 630 Па. Наибольшее сопротивления сдвигу у агросерой глееватой почвы 761 Па. Наименьшее у агросерой типичной 527 Па, что связано с тем, что максимальное сопротивление сдвигу наблюдается при наименьшей деформации. Значение модуля упругости 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. Таким образом, элювиального и иллювиального горизонты агросерой типичной почвы демонстрируют более хрупкое поведение чем все остальные горизонты агросерых почв.

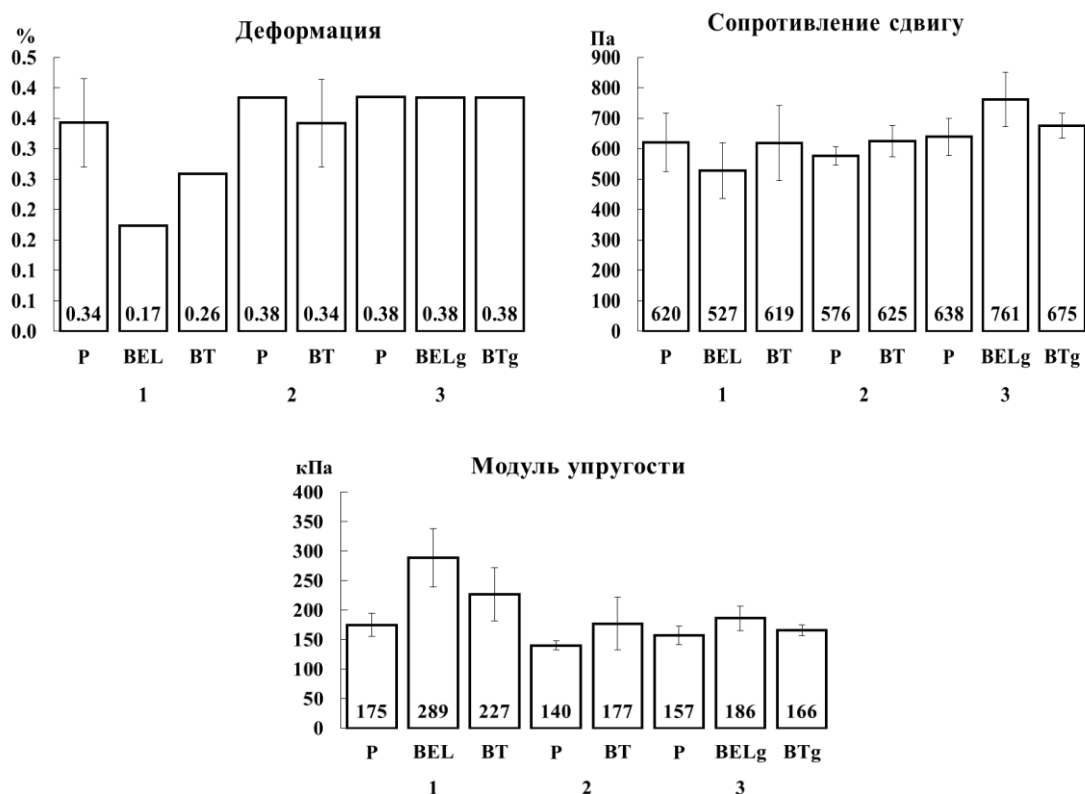


Рисунок 26. Реологические свойства агросерых почв в точке максимального сопротивления сдвигу; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая

В точке пересечения модуля упругости (рис. 27) и вязкости заканчивается разрушение межчастичных связей, и почва переходит в текучее состояние. Наибольшая деформация 2.1% наблюдалась в точке пересечения модуля упругости и вязкости у пахотного горизонта агросерой типичной почвы, что

говорит о том, что структура этого горизонта более пластичная и разрушение структурных связей происходит дольше, вероятно, благодаря тому, что этот горизонт содержит больше гумуса, чем остальные пахотные горизонты. Наименьшее значение деформации при пересечении модуля упругости и вязкости наблюдалось у элювиальных горизонтов агросерой типичной 1.1% и агросерой глееватой 1.4%, что говорит о хрупкости межчастичных связей в этих горизонтах. У остальных горизонтов пересечение модуля упругости и вязкости происходило при деформации от 1.6% до 1.8%. Сопротивление сдвигу в точке пересечения модуля упругости и вязкости было несколько ниже среднего у пахотного 353 Па и элювиального 338 Па горизонтов агросерой типичной почвы. Наибольшее сопротивление сдвигу в точке пересечения модуля упругости и вязкости наблюдалось у элювиального горизонта 588 Па агросерой глееватой почвы. Минимальное значение модуля упругости в точке пересечения с модулем вязкости обнаружилось у 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 значения модуля упругости высокие, особенно у агросерой глееватой почвы 30 кПа, что говорит о наибольшей хрупкости этого горизонта по сравнению с остальными. У иллювиального горизонта агросерой типичной почвы – наибольшее значение модуля упругости, что может быть связано с тем, что он начал разрушаться раньше, чем другие иллювиальные горизонты.

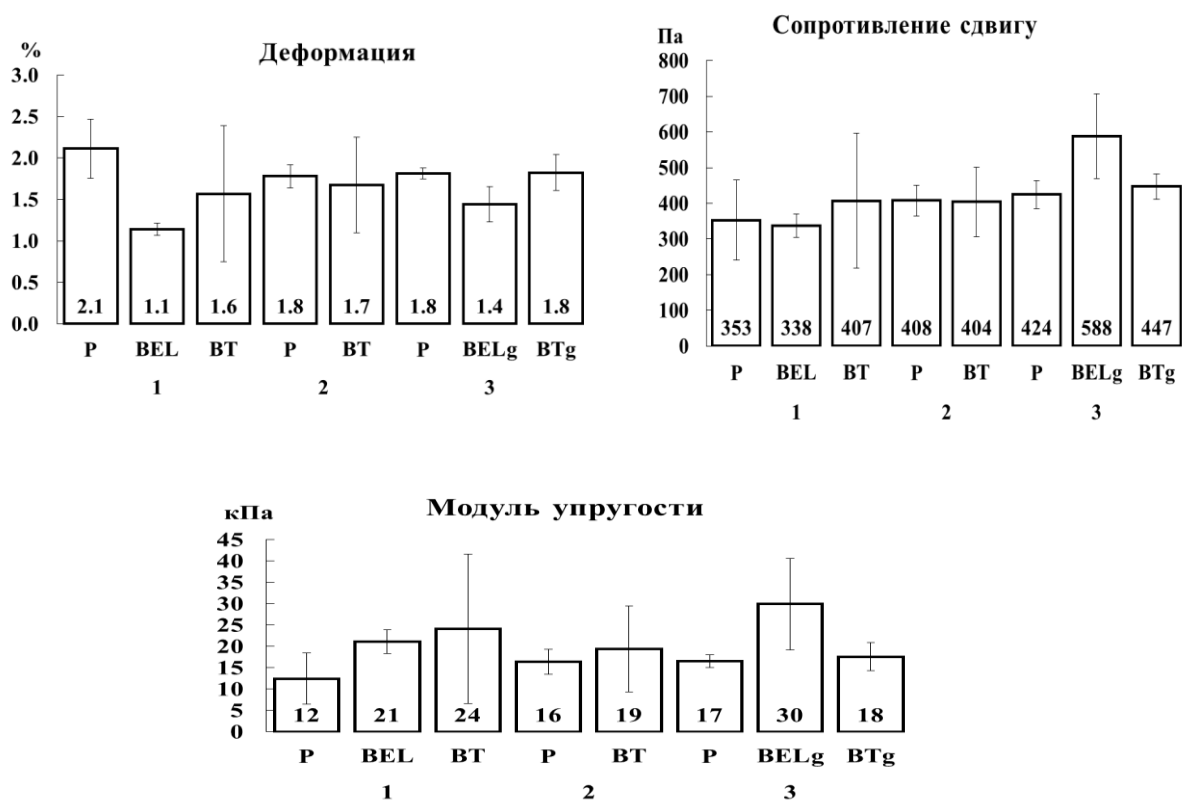


Рисунок 27. Реологические свойства агросерых почв в точке пересечения модулей упругости и вязкости; 1 – агросерая типичная, 2 – агрозём языковатый, 3 – агросерая глееватая

Были рассчитаны корреляции (табл. 28) между реологическими свойствами и почвенными показателями: содержанием гумуса, гранулометрическим составом и коэффициентом дисперсности (отношение частиц <0.001 мм при гранулометрическом анализе к частицам <0.001 мм при микроагрегатном анализе в процентах). Диапазон упругого поведения обратно коррелирует со значением дисперсности (-0.7), что означает, что в хорошо микроагрегированной почве диапазон упругости меньше. При этом значение модуля упругости в диапазоне упругости отрицательно коррелирует (-0.7) с содержанием частиц 0.5-0.25 мм и частицами 0.005-0.001 мм (-0.8). Деформация при максимальном сопротивлении сдвигу положительно коррелирует с содержанием фракции 1.0-0.5 мм, но при этом модуль упругости отрицательно коррелирует с содержанием этой фракции (-0.7).

Таблица 28. Корреляции деформации и модуля упругости с некоторыми показателями

Показатель	p < 0.05 N=8				
	Гумус	1.0-0.5	0.5-0.25	0.005-0.001	Дисперсность
Деформация (область упругого поведения)	0.0	0.0	-0.4	0.3	-0.7*
Модуль упругости (область упругого поведения)	-0.6	-0.69	-0.7	-0.8	-0.1
Деформация (наибольшее сопротивление сдвигу)	0.4	0.8	0.6	0.6	-0.2
Модуль упругости (наибольшее сопротивление сдвигу)	-0.5	-0.7	-0.69	-0.69	0.0
Деформация (Предел текучести)	0.6	0.6	0.6	0.5	0.0

*Отмеченные тесты значимы при $p < 0.05$

Таким образом, крупные частицы оказывают большее сопротивление сдвиговым деформациям. С содержанием гумуса значимо не коррелирует ни один показатель, однако прослеживается тенденция обратной зависимости (-0.6) со значением модуля упругости и прямой зависимости (0.6) с величиной предела текучести, что позволяет предположить, что с увеличением содержания органического вещества снижается прочность межчастичных связей и увеличивает диапазон пластичного поведения. Большую роль в реологических свойствах горизонтов агросерых почв имеет гранулометрический состав, особенно содержание крупных фракций и микроагрегированность.

Величина диапазона вязкоупругого поведения у пахотных горизонтов агросерых почв составила около 0.007%. У горизонтов BEL и BT агросерой почвы диапазон упругого поведения больше, чем у пахотных. Большой диапазон упругого поведения и высокое значение модуля упругости горизонта BEL говорят о более жестких связях между частицами в этом горизонте из-за процессов оподзаливания.

Точка деформации с максимальным сопротивлением сдвигу почти у всех горизонтов была близка к 0.38%, кроме горизонтов BEL и BT агросерой

типичной почвы, при этом модуль упругости у этих горизонтов был выше, чем в остальных почвах, что свидетельствует о более хрупком характере структуры этих горизонтов.

Переход от пластичного к вязкому поведению произошел позже у пахотного горизонта агросерой типичной почвы, чем у двух других пахотных горизонтов, что говорит о большей устойчивости этого горизонта к деформации. Самое низкое значение деформации, при которой произошло пересечение модулей упругости и вязкости горизонта BEL агросерой типичной почвы составило 1.1%, что ещё раз подтверждает неустойчивость структуры этого горизонта в результате процесса оподзоливания. У агрозёма языковатого значения пересечения модулей упругости и вязкости для пахотного и подпахотного горизонтов близко: здесь не происходит активного оподзоливания, которое бы влияло на связь между частицами. У агросерой глееватой почвы пересечение модулей упругости и вязкости горизонтов Р 1.85% и ВТ 1.8% наблюдается при близком значении деформации, а у горизонта BELg при значении деформации ниже 1.4%, что означает устойчивость структуры горизонта BELg ниже, чем у пахотного и иллювиального горизонтов.

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 у пахотного слоя агросерых почв составляет 0.007%, однако был выше 0.01% при противоэрозионной системе обработки и у пахотного горизонта агросерой глееватой почвы. Максимальное сопротивление сдвигу наблюдается при деформации 0.34-0.39%, кроме почвы при отвальной системе обработке 0.45%, что может быть связано с оборотом пласта и припахиванием нижележащего горизонта. Само максимальное сопротивление сдвигу у агросерых почв на склоновом участке ниже, чем на участке АЛСЗ. Наибольшая деформация 2.1% в точке пересечения модуля упругости и вязкости наблюдалась у пахотного горизонта агросерой типичной

почвы, что говорит о том, что структура этого горизонта более пластичная и разрушение структурных связей происходит дольше, вероятно, благодаря тому, что этот горизонт содержит больше гумуса, чем у агроёма языковатого и агросерой глееватой почвы. Переход почвы в текучее состояние, в результате разрушения межчастичных связей в точке пересечения модулей упругости и вязкости наблюдается у агросерых почв при отвальной и плоскорезной системах обработки раньше, чем у агросерых почв при ярусной и противоэрозионной системах обработки. Сопротивление сдвигу в точке пересечения модулей упругости и вязкости у агросерых почв на склоновом участке ниже, чем у агросерых почв на участке АЛСЗ.

Диапазон линейного вязкоупругого поведения для пахотного слоя агросерых почв на приводораздельном участке и на склоне составил в среднем 0.007%. Однако среднее значение модуля упругости в диапазоне вязкоупругого поведения для пахотного слоя на приводораздельном участке 788 кПа, что несколько выше, чем на склоне 728 кПа. Максимальное сопротивление сдвигу у пахотного слоя агросерых почв на приводораздельном участке и на склоне наблюдается при 0.4% деформации. Максимальное сопротивление сдвигу у пахотного слоя на приводораздельном участке несколько выше 661 Па, чем на склоне 606 Па. Предел текучести для пахотного слоя на приводораздельном участке наблюдался в среднем при деформации 1.5% и модуле упругости от 20 до 33 кПа, а на склоне при деформации - в среднем 1.9% и модуле упругости от 12 до 17 кПа.

Реологические свойства агросерых почв Владимирского Ополья отличаются от свойств 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., 202; 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 слабоустойчивая к деформациям. Диапазон упругого поведения у

агросерой почвы значительно меньше по сравнению с черноземами 0.15-0.25% (Хайдапова и др., 2016; Хайдапова и др., 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.

3.5. Устойчивость пахотного горизонта агросерых почв к разбрызгиванию

От структурного состояния почвы зависит её устойчивость к водной эрозии и, в особенности, к первой стадии – разбрызгиванию. (Кузнецов, 1994). При более щадящей обработке, при которой не происходит разрушение агрегатов, почва более устойчива к разбрызгиванию. При этом морфологические особенности почвы, такие как наличие второго гумусового горизонта, также оказывают влияние на устойчивость к разбрызгиванию благодаря структурным особенностям как второго гумусового горизонта, так и вышележащего пахотного слоя, к которому он оказывается припахан. Вместе с тем можно говорить, что устойчивость к разбрызгиванию зависит не только от применяемого способа обработки почвы, но и от звена севооборота. К.Ю. Хан, М.С. Кузнецов (1991) предложили использовать критическую скорость разбрызгивания как характеристику устойчивости агрегатов к разрушающему действию дождевых капель. При скоростях, больших критической, происходит отрыв почвенных частиц и агрегатов с поверхности.

3.5.1. Критическая скорость разбрызгивания 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 (рис. 28) и определена критическая скорость разбрызгивания – 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). Неразбрызгивающая скорость капель – это скорость, при которой отрыв частиц уже наблюдается, однако это явление еще не носит массовый характер. В свою очередь, разбрызгивающая скорость – это скорость, при которой начинается массовый отрыв частиц от поверхности почвы.

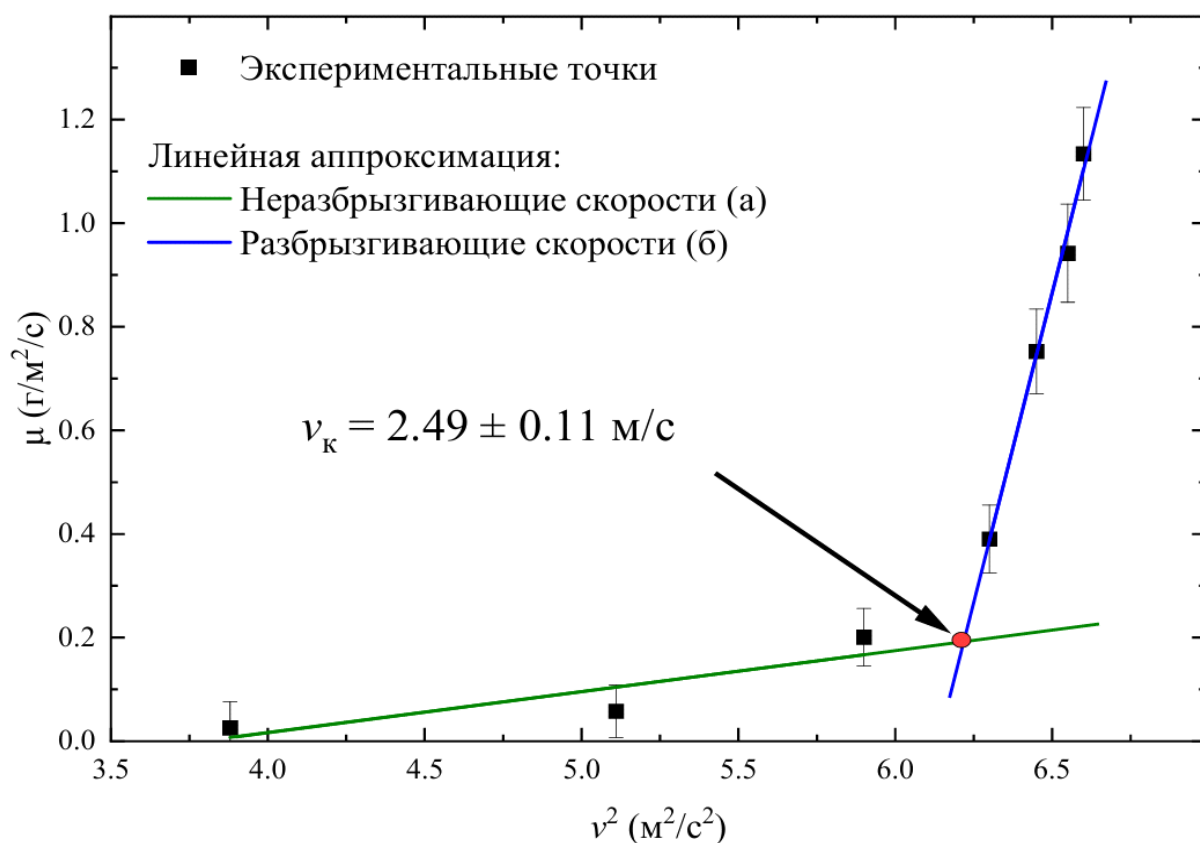


Рисунок 28. Зависимость потерь почвенного материала μ от квадрата скорости капли v_k .

В результате, полученная величина критической скорости разбрызгивания для пахотного слоя агросерой почвы составила $v_k=2.49\pm0.11\text{м/с}$. Полученная величина с учетом погрешности согласуется с

результатом, приведенным в работе (Кузнецов, 2015). В данной работе величина критической скорости разбрызгивания для серой лесной среднесуглинистой почвы Владимирской области $A_{\text{пах}}$ (5-20 см) составила $v_k=2.38\text{м/с}$. Полученное значение критической скорости для агросерой почвы находится между критическими скоростями для чернозема $v_k=3.0\text{м/с}$ и для легкосуглинистых дерново-подзолистых почв $v_k=2.5\text{м/с}$, определенных в работе (Хан, Кузнецов, 1991).

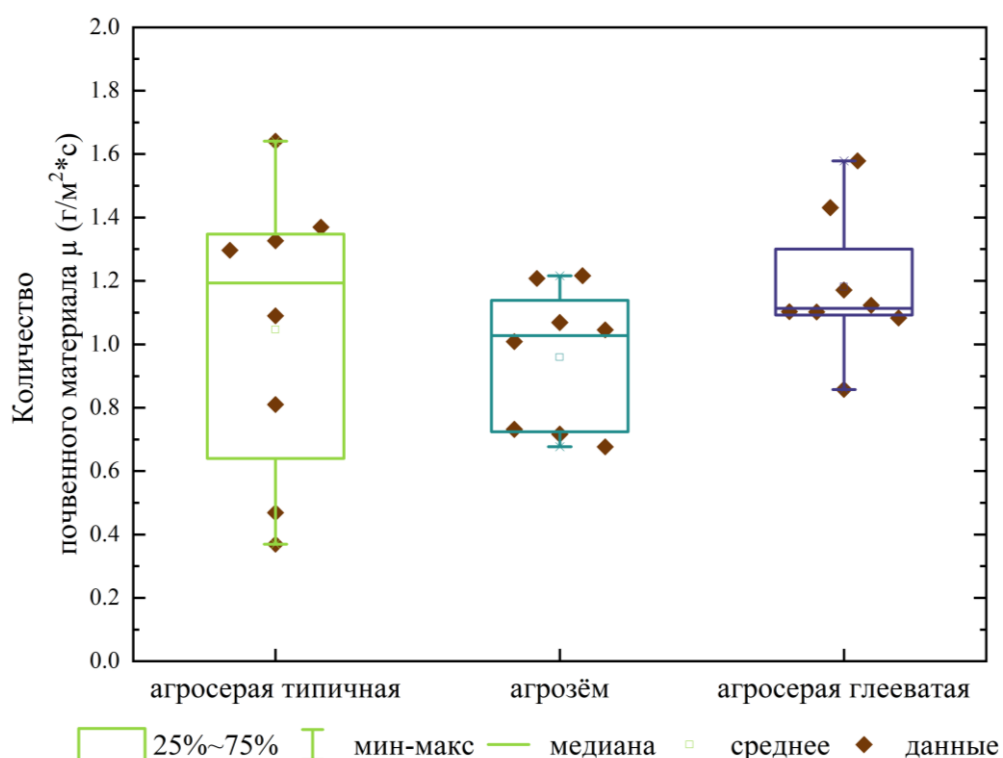


Рисунок 29. Количество потерь почвенного материала μ при критической скорости разбрызгивания v_k .

Также 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. 29). Средние потери почвенного материала составили для агросерой типичной $\mu = 1.05 \text{ (г/м}^2\text{)*с}$, агрозёма языковатого $\mu = 0.96 \text{ (г/м}^2\text{)*с}$ и для агросерой глееватой $\mu = 1.18 \text{ (г/м}^2\text{)*с}$. 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.

Таким образом, критическая скорость разбрызгивания v_k для агросерых почв ниже, чем у чернозёмов, но выше, чем у легкосуглинистых дерново-подзолистых почв. Статически 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.

3.5.2. 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 :

$$\bar{f} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (4)$$

Изменение импульса капли при соударении можно выразить следующим образом:

$$\Delta p = (\alpha + 1)m_0 v, \quad (5)$$

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). Время удара капли можно оценить как $\Delta t \approx \frac{r_0}{v}$.

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

$$\bar{P} = \frac{\bar{f}}{\sigma} = \frac{4}{3}(\alpha + 1)\rho v^2 \quad (6)$$

Как видно из полученного уравнения, среднее давление капли $\bar{P}_k$, оказываемое на почву при падении, главным образом зависит от скорости капли. Так как отрыв частиц почвы происходит только после ее насыщения влагой, соударения капель с почвенной поверхностью будут иметь в основном упругий характер и $\alpha \approx 1$.

Среднее давление капли $\bar{P}_k$ было рассчитано для скоростей, при которых проводилось дождевание в эксперименте на лабораторной дождевальной установке, в том числе для критической разбрызгивающей скорости v_k для агросерых почв (рис. 31). При критической разбрызгивающей скорости v_k для агросерых почв давление капли на поверхность почвы составляет $P_k \sim 10^4$ Па.

3.5.3. Реологические свойства агросерых почв и давление капли при критической скорости разбрызгивания

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.30). Давление капли при критической скорости разбрызгивания оказалось ниже, чем энергия связи между частицами при пересечении модулей упругости и вязкости (пределе текучести).

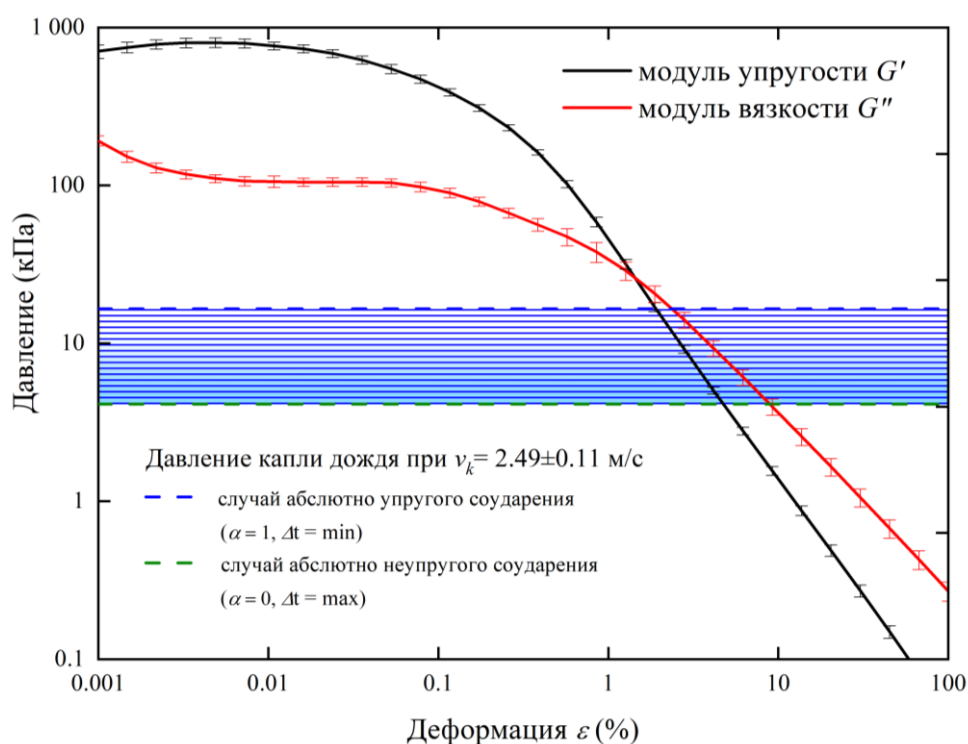


Рисунок 30. Реологические свойства агросерой почвы и давление капли при критической скорости разбрызгивания v_k

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.

3.6. Расчёт эродируемости агросерых почв для модели WaTEM/SEDEM

В последние годы эрозионная модель WaTEM/SEDEM все более активно используется в России. В различных регионах Европейской части РФ проведены работы по калибровке входных параметров и верификации модели WaTEM/SEDEM (Голосов и др., 2022, Смирнова и др., 2020; Zhidkin et al., 2023). С помощью модели WaTEM/SEDEM v.2004 (Фомичева, Шамшурина 2022; Zhidkin et al. 2022; Хирк и др., 2023) оцениваются темпы ливневой эрозии почв. В модели учитываются взаимодействия между эрозионным

потенциалом дождевых осадков, эродируемостью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте и морфологическими параметрами рельефа. Важно отметить, что модель WaTEM/SEDEM, в отличие от многих других эрозионных моделей, является пространственно-распределенной, то есть оценивает не только объем и темпы эрозии почв в целом по участку, но также позволяет моделировать пространственную структуру протекания эрозионно-аккумулятивных процессов. Алгоритм расчета базируется на модифицированном универсальном уравнении смыва почв RUSLE (Panagos, 2017).

$$A=R*K*LS*C*P \quad (7)$$

A – расчетная потеря почвы на единицу площади, т/га в год;

R – эрозионный индекс осадков (МДж·мм·м⁻²час⁻¹год⁻¹);

K – коэффициент эродируемости почв;

LS – коэффициент соотношения длины и крутизны склона;

C – коэффициент землепользования;

P – коэффициент почвозащитной эффективности противоэрозионных мер.

Коэффициент LS был рассчитывается на основе цифровой модели рельефа с разрешением 20*20 метров.

Коэффициент эродируемости почвы выражается в кг*ч/(МДж*мм) и рассчитывается по формуле:

$$K = 2.76 \times 10^{-7} M^{1.14} (12 - OM) + 0.0043 * (s - 2) + 0.0033 * (p - 3), \text{ где} \quad (8)$$

M – фактор гранулометрического состава, который вычисляется как:

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

OM (%) – содержание органического вещества, гумуса

S – Структурный класс

P – Класс водопроницаемости

Структурный класс определяется по оценкам Европейской баз данных почв. В таблице приведен класс, размер агрегатов и оценки, характеризующие класс. Если не проводилась оценка агрегатного состава почв и не рассчитывался средний диаметр, то предлагается определить структурный класс по текстуре (табл. 29). Также по таблице 30, исходя из текстур, определяется класс водопроницаемости.

Таблица 29. Классы структуры Европейской базы данных почв

Класс	Размер	Агрегаты	Оценка	
1	1-2 мм	очень мелкозернистый	Хорошо	Sandy, Loamy sand, sandy loam
2	2-5 мм	Мелкозернистый	Нормально	Sandy clay, Sandy clay loam, Silty loam, Silt
3	5-10 мм	Среднезернистый	Удовлетворительно	clay loam, Silty clay loam
4	>10 мм	глыбистый, пластинчатый или массивный, а также перегнойный/торфяной верхний слой почвы	Плохо	Clay, Silty clay

Таблица 30. Класс водопроницаемости

Класс проницаемости	Характеристика	Текстура	проводимость, мм·ч ⁻¹
1	быстрый и очень быстрый	Sand	>61,0
2	умеренно-быстрая	Loamy sand, sandy loam	20,3–61,0
3	умеренный	Loam, silty loam	5,1–20,3
4	средне-низкий	Sandy clay loam, clay loam	2,0–5,1
5	медленный	Silty clay loam, sand clay	1,0–2,0
6	очень медленный	Silty clay, clay	<1,0

В работе (Komissarov, 2024) показано, что для расчёта К-фактора важное значение имеет метод определения гранулометрического состава. Для чернозёмов Курской области, при определении лазерной дифракцией, обнаружено примерно на 13% меньше фракции физической глины по сравнению с методом седиментации. Значение К-фактора на основе седиментации находится ниже по сравнению с данными лазерного анализатора на 32%.

В исследованных агросерых почвах при использовании метода лазерной дифракции определяется примерно на 38% меньше фракции физической глины по сравнению с методом седиментации. На треугольнике Ферре (рис. 31а) видно, что образцы разделились по методам: 1,3,5 – пипет-метод дал silt loam, 2,4,6 – лазерная дифракция – silty clay loam. Далее, следуя методике по таблицам 29 и 30, определяется структурный класс и проводимость, исходя из гранулометрического состава. Для silt loam и silty clay loam - это 3 класс (табл. 29), среднезернистая структура диаметром 5-10 мм. Однако если взять значения средневзвешенного диаметра для агросерой типичной 3.3 мм, для агрозёма языковатого 4.8 мм и агросерой глееватой 6.1 мм, тогда текстурный класс для первых двух почв будет – 2: мелкозернистый. Разница между значениями К-фактора для исследованных агросерых почв (рис. 31 б) 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. Поэтому нельзя использовать сравнивать в одной работе значения К-фактора, определенные на основе методов седиметрии и лазерной дифракции.

Значение фактора эродированности почв (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 осредненных гранулометрических состава: по седиметрии и лазерной дифракции. Среднее значение фактора эродированности почв (К-фактора), определенное по данным лазерной дифракции составило 73 кг*ч/(МДж*мм) , что на 20% выше, чем по данным седиметрии – 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).

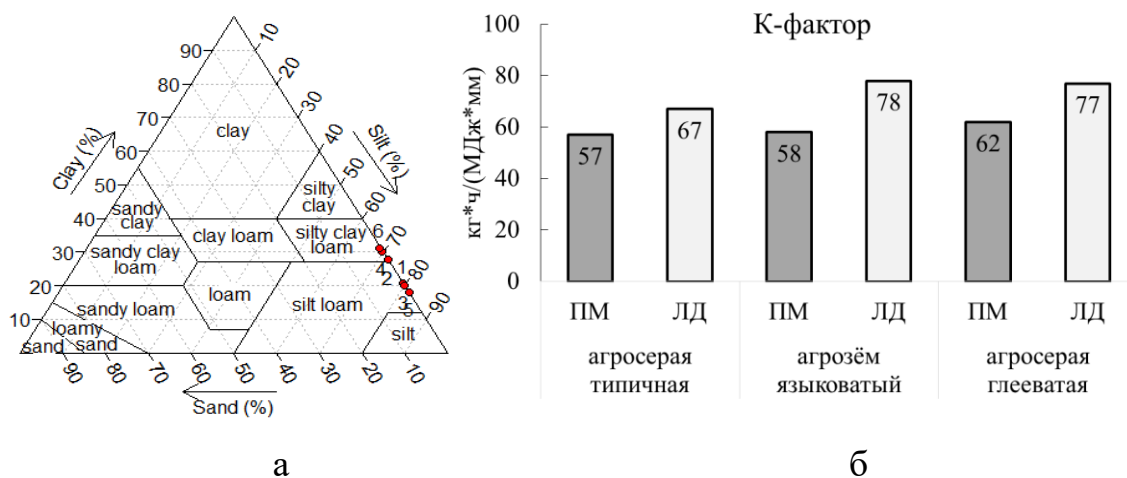


Рисунок. 31. а) Треугольник Ферре: 1,3,5 – пипет-метод, 2,4,6 – лазерная дифракция; б) К-фактор: ПМ-седиментометрии, ЛД-лазерная дифракция

Значение фактора эродлируемости почв (К-фактора) было рассчитано для агросерых почв опыта АЛСЗ. Всего было использовано данные 27 образцов: содержание гумуса в слое 0-20 см, средний диаметр агрегатов и гранулометрический состав. Среднее значение фактора эродлируемости почв (К-фактора), определенное по данным лазерной дифракции составило 73 кг*ч/(МДж*мм), что на 20% выше, чем по данным седиметрии – 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) (рис. 33) 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).

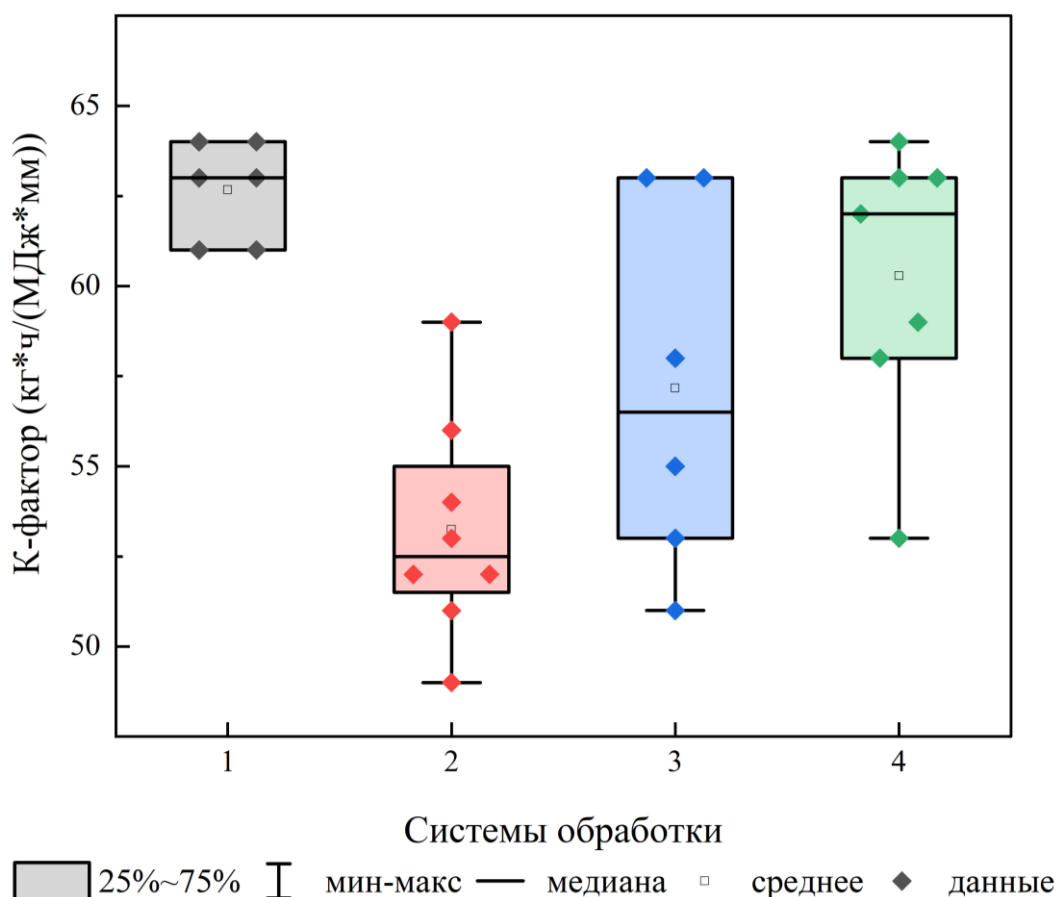


Рисунок 32. К-фактор при различных обработках: 1-отвальная, 2-плоскорезная, 3-ярусная, 4-противоэрозионная

Система обработки почвы оказывает влияние на значение К-фактора (рис. 32). Обращает на себя внимание, что К-фактор примерно повторяет тенденцию среднего диаметра агрегатов (рис. 32 и 33), что подтверждает наличие корреляции между К-фактором и средним диаметром агрегатов равной 0.68. Средние значения К-фактора при отвальной и противоэрозионной обработках составляют 63 и 60 кг*ч/(МДж*мм) соответственно, а при плоскорезной и ярусной 54 и 56 кг*ч/(МДж*мм).

Большие средние значения К-фактора при отвальной и противоэрозионной обработках могут быть связаны с влиянием обработок на агрегатный состав почв, что было описано в предыдущих главах. При отвальной обработке К-фактор больше, но он имеет наименьший разброс. Наибольший разброс имеет значение К-фактора при ярусной обработке. Наименьший К-фактор возникает при плоскорезной обработке, при которой

рыхлению подвергается 10 см слой, а более глубокие рыхления происходят только раз за ротацию. 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.

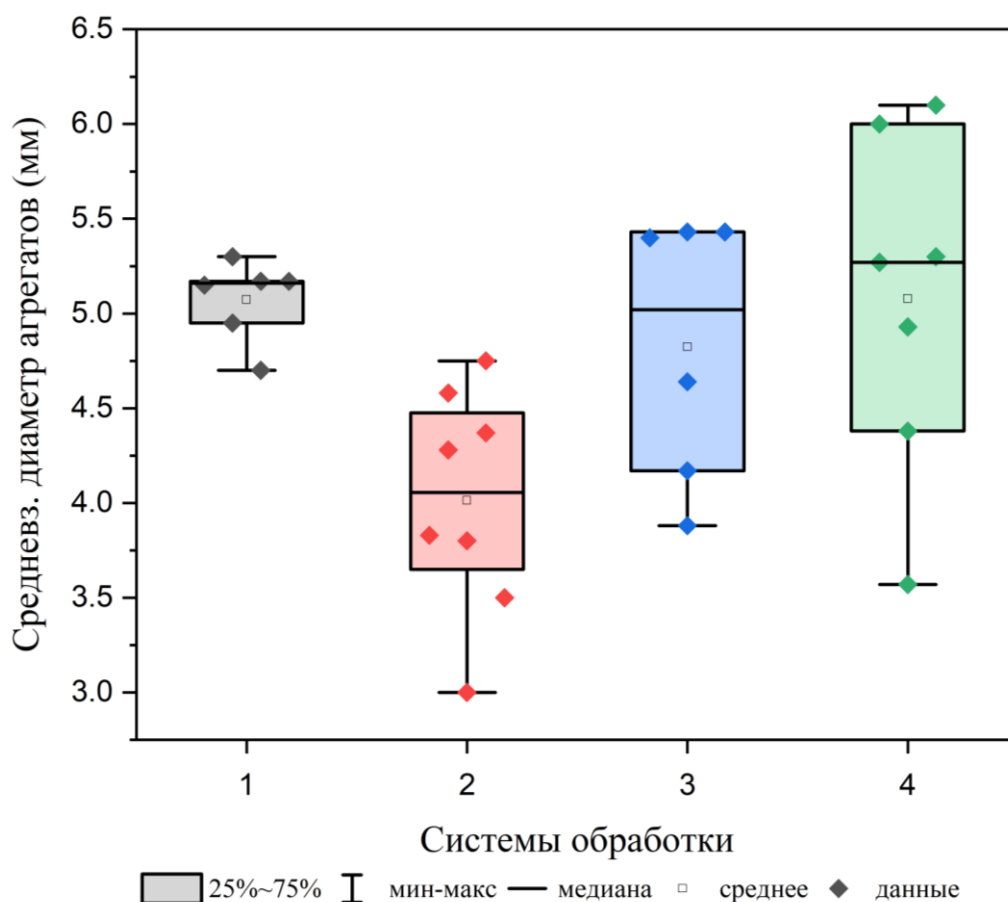


Рисунок 33. Средний диаметр агрегатов при различных обработках: 1-отвальная, 2-плоскорезная, 3-ярусная, 4-противоэрозионная

Таким образом, для вычисления К-фактора важен метод определения гранулометрического состава. 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 у агросерой типичной, агрозёма языковатого и агросерой глееватой почв, имеют близкие значения и 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 Ополя. Значение эродируемости (К-фактор) агросерой почвы ниже при плоскорезной системе обработок, чем при других системах обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Агросерые почвы имеют высокие показатели структурности и водоустойчивости. Система обработки определяет структурное состояние в слое 0-20 см, что проявляется в соотношении водопрочных агрегатов. В слое 20-40 см большое влияние на агрегатный состав 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 горизонтах пахотных, элювиальных и иллювиальных отличается друг от друга. При этом наибольший разброс в агрегатном составе – у иллювиальных горизонтов, а наименьший – у горизонтов элювиальных.

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

Агрегаты 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 обработок почв оказывают влияние на реологические свойства пахотного горизонта агросерых почв, но это влияние неодинаково 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 Ополя отличаются от соседствующих дерново-подзолистых почв. Диапазон линейного вязкоупругого больше у агросерых почв Владимирского Ополя, чем у дерново-подзолистых почв. При этом элювиальный горизонт агросерых почв, также как 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. Межчастичных связей у агросерой почвы более хрупкие по сравнению с черноземами. Предел текучести наблюдается у чернозема при значительно больших деформациях, чем у агросерой почвы. Таким образом, агросерые почвы Владимирского Ополя 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. 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 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 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 $v_k=2.49\pm0.11$ м/с. Статически 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 при критической скорости разбрызгивания P_k ниже, чем энергия связи между частицами при пересечении модулей упругости и вязкости (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 у агросерых почв 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 высокими значениями коэффициента структурности сформировался при комбинированно-плоскорезной системе обработки.
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 Ополя 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 у агросерых почв на склоне меньше, чем у почв на приводораздельной территории.
3. По сравнению с комбинированно-плоскорезной и отвальной системами обработки предел текучести наступает раньше в агросерой почве при ярусной и противоэрозионной системах обработки. При плоскорезной системе обработки формируется агрегатный состав с меньшим количеством агрегатов крупнее 7 мм.
4. Величина критической скорости разбрызгивания для пахотного слоя агросерой почвы составила $v_k=2.49\pm0.11$ м/с.
5. Предел текучести можно считать качественной характеристикой начального этапа эрозии почв, так как давление капли при критической скорости разбрызгивания 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование: автореф. дисс. ... док. биол. наук: 06.01.03 / Алифанов Валерий Михайлович. – Москва, 1992. – 47 с.
2. Алифанов В.М. Гугалинская Л.А., Овчинникова А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины / В.М. Алифанов, Л.А. Гугалинская, А.Ю. Овчинникова. – М.: ГЕОС, 2010. – 160 с.
3. Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского Ополя // Криосфера Земли. – 2008. – Т. 12, № 3. – С. 80–86.
4. Ахромеев, Л.М. Природа, генезис, история развития и ландшафтная структура ополей Центральной России / Л.М. Ахромеев. – Брянск: РИО Брянского государственного университета, 2008. – 182 с.
5. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Почикалов А.В., Кудеяров В.Н. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области) // Почвоведение. – 2017. – № 3. – С. 345–353.
6. Буева Ю.Н. Пространственная вариабельность физических свойств комплекса серых лесных почв Владимирского Ополя: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03/ Буева Юлия Николаевна. – Москва, 2008. – 24с.
7. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. —3-е изд., перераб. и доп.— М.: Агропромиздат, 1986. — 416 с.
8. Величко А.А. Морозова Т.Д., Бердников В.В., Губонина З.П., Халчева Т.А., Маркова А.К. Эволюция природы в перигляциальной зоне Европы в четвертичное время // Геоморфология и палеогеография. Материалы VI съезда Географ. о-ва СССР. – М.: Ин-т географии АН СССР, 1975. – С. 65-74.
9. Волощук А.Т. Принципиальные основы формирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия на примере Владимирского Ополя:

автореф. дисс. ... док. с.-х. наук: 06.01.01 / Волощук Анатолий Тимофеевич. – Немчиновка, 2001. – 42 с.

10. Волощук А.Т., Кирюшин В.И., Иванов А.Л., Мазиров М.А., Шеин Е.В., Винокуров И.Ю. Адаптивно-ландшафтные особенности земледелия Владимирского Ополя / А.Т. Волощук, В.И. Кирюшин, А.Л. Иванов, М.А. Мазиров, Е.В. Шеин, И.Ю. Винокуров. – М.: Агроконсалт, 2004. – 444 с.

11. Галицкая П.Ю. Селивановская С.Ю., Шафигуллин Б.У., Медянская Ю.В. Содержание органического углерода и респираторная активность микроорганизмов в почвах разной степени смывости // Журнал экологии и промышленной безопасности. – 2010. – № 2(46). – С. 35-40.

12. Глушко А.Я. Влияние водной и ветровой эрозии на земельный фонд юга европейской части России // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2010. – № 1. – С. 75–85.

13. Голосов В.Н. Жидкин А.П., Петелько А.И., Осипова М.С., Иванова Н.Н., Иванов М.М. Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. – 2022. – № 10. – С. 1321-1338.

14. Гончаров В.М. Агрофизическая характеристика почв в комплексном почвенном покрове: автореф. дисс. ... док. биол. наук: 06.01.03 / Гончаров Владимир Михайлович. – Москва, 2010. – 45 с.

15. Гугалинская Л.А. Морфолитопедогенез центра Русской равнины: автореф. дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.27 / Гугалинская Любовь Анатольевна. – Пущино, 1997. – 46 с.

16. Джеррард А.Дж. Почвы и формы рельефа / А.Дж. Джеррард – Л.: Недра, 1984. – 208 с.

17. Докучаев В.В. Избранные сочинения / В.В. Докучаев. — М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1949. – Т. 2. — 425 с.

18. Дядькина С.Е. Пространственная изменчивость водопроницаемости серых лесных почв Владимирского Ополья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27 / Дядькина Светлана Евгеньевна. – Москва, 2004. – 28 с.
19. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. и др. Классификация и диагностика почв СССР/ В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розов и др. – М: Колос, 1977. – 221 с.
20. Еремин А.С. Агрохимическая характеристика серых лесных почв: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук: 03.01.04 / Еремин Алексей Сергеевич. – Москва, 1994. – 40 с.
21. Жидкин А.П., Комиссаров М.А., Шамшурина Е.Н., Мищенко А.В. Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор) // Почвоведение. – 2023. – № 2. – С. 259-272.
22. Завьялова Н. Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. – 2020. – № 3. – С. 372-378.
23. Зайдельман Ф.Р., Рыдкин Ю.И. Почвы ополей лесной зоны – генезис, гидрология, мелиорация и использование // Почвоведение. – 2003. – №13. – С. 261-274.
24. Заславский М.Н. Эрозиоведение: Учеб. для геогр. и почв. спец. вузов / М.Н. Заславский. — М.: Высшая школа, 1983. — 320 с.
25. Зинченко М.К. Биологические особенности серой лесной почвы Владимирского Ополья при различных агротехнических приёмах: автореф. дис. ... канд. Биол. Наук: 03.02.03/ Зинченко Мария Каземировна. – Владимир, 2011. – 25с.
26. Зинченко С.И. Влияние приемов основной обработки на структуру серой лесной почвы в агроэкосистемах при возделывании озимой ржи // Владимирский земледелец. – 2019. – №3. – С. 4-7.
27. Зинченко С.И., Мазиров М.А., Зинченко В.С. Антропогенное влияние приемов основной обработки на элементы механического состава серой

- лесной почвы // Успехи Современного Естествознания. – 2013. – №2. – С. 47-50.
28. Иванов А.Л. Савин И.Ю., Столбовой В.С., Аветян С.А., Шишконокова Е.А., Каштанов А.Н. Карта агрогенной эродированности почв России // Доклады РАН. Науки о Земле. – 2020. – Т. 493. – № 2. – С. 99–102.
29. Ивенс Р. Механика водной эрозии и ее регулирование во времени и пространстве: эмпирическая точка зрения / Р. Ивенс // Эрозия почвы. – М.: Колос – 1984. – С. 155-177.
30. Карпова Д.В. Оценка агроэкологического состояния серых лесных почв Владимирского Ополья: автореф. дисс. ... док. с-х. наук: 03.00.16, 03.00.27 / Карпова Дина Вячеславовна. – Москва, 2009. – 54 с.
31. Карпова Д.В., Балабко П.Н., Чижикова Н.П., Бескин Л.В., Колобова Н.А., Хуснетдинова Т.И., Цымбарович П.Р., Беляева М.В. Микроморфология и минералогия серых лесных почв Владимирского Ополья // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2018. – № 94. – С. 101-123.
32. Карпова Д.В., Чижикова Н.П., Колобова Н.А., Кононенко В.В. Анализ состояния фосфора в агросерых почвах Владимирского ополья // Агрохимический вестник. – 2016. – № 3. – С. 15-19.
33. Ключева В.В., Хайдапова Д.Д. Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. — 2020. — № 103. — С. 108–148.
34. Ключева 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. – №89. – С. 21-35.
35. Ковда В.А., Розанов Б.Г. Почвоведение, в 2 ч. Ч. 2. Типы почв, их география и использование / В.А. Ковда, Б.Г. Розанов – М: Высшая школа – 1988. – 368 с.

36. Кузнецов М.С. Структурное состояние почвы и ее противоэрозионная стойкость // Почвоведение. — 1994. — № 11. — С. 31–34.
37. Кузнецов М.С. Хан К.Ю., М.П. Волокитин Определение устойчивости агрегатов к разрушающему действию капель // Почвоведение. — 1991. — № 6. — С. 123–127.
38. Кузнецов М.С. Экологические пределы эрозии серых лесных почв центральных районов европейской территории России // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2011. — № 3. — С. 24–31.
39. Кузнецов М.С. Якушев Н.Л. Критическая скорость падения капель дождя и размывающая скорость потока // Естественные и технические науки. — 2015. — № 11(89). — С. 162–164.
40. Кулинский Н.А. Система удобрений как компонент ландшафтно-адаптивного земледелия для условий Владимирского Ополя: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук: 03.01.04 / Кулинский Николай Алексеевич. — Москва, 1994. — 27с.
41. Левковский Е.В. Дифференциальная пористость агро-тёмно-серой почвы со вторым гумусовым горизонтом Владимирского Ополя: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03 / Левковский Егор Владимирович. — Москва, 2008. — 28с.
42. Литвин Л.Ф. Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г. География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // Почвоведение. — 2017. — № 11. — С. 1390–1400.
43. Макаров О.А. Представление о почве как о физическом теле, описываемом тензорами напряжения и деформации // Использование и охрана природных ресурсов в России. — 2024. — № 1. — С. 69–74.
44. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины: автореф. дисс. ... док. биол. наук: 03.00.27 / Макеев Александр Олегович. — Москва, 2005. — 48 с.

45. Макеев А.О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины // Доклады по экологическому почвоведению. – 2006. – № 3. – № 4. – С. 24-68.
46. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении / Ю.Л. Мешалкина, В.П. Самсонова. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 84 с.
47. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии/ Ц.Е. Мирцхулава. — М.: Колос, 1970. — 240 с.
48. Морев Д.В. Агроэкологическая оценка земель в условиях зонального ряда агроландшафтов с повышенной пестротой почвенного покрова: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.08 /Морев Дмитрий Владимирович. – М., 2017. – 25с.
49. Николаев В.А. Парагенезис полесий–ополей Центральной России / В.А. Николаев // Вестник Московского университета. –2013. – № 5. – С.45-51.
50. Николаева Е.И. Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03/ Николаева Евгения Ивановна – Москва, 2016. – 25с.
51. Овчинникова А.Ю., Алифанов В.М., Худяков О.И. Влияние палеокриогенеза на формирование серых лесных почв Центральной России // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1170–1181.
52. Окорков В.В. Гранулометрический состав почв и его роль в устойчивости к водной эрозии // Владимирский земледелец – 2010. – №3. – С. 17-19.
53. Окорков В.В. Опыт изучения адаптивно-ландшафтных систем земледелия во Владимирском Ополье / В.В. Окорков. – Владимир: ВООО ВОИ – 2003 – 280 с.
54. Окорков В.В. Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополья / В.В. Окорков. – Владимир: ВООО ВОИ, 2006. – 56 с.
55. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Приёмы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах

- Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности / В.В. Окорков, О.А. Фенова, Л.А. Окоркова. – Суздаль, 2017. – 176 с.
56. Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А. Серые лесные почвы Владимирского ополья и эффективность использования их ресурсного потенциала. / В.В. Окорков, Фенова О.А., Окоркова Л.А. – Иваново: ПресСто, 2021. – 188 с.
57. Окорков В.В. Фосфорно-калийный режим серой лесной почвы Владимирского Ополья // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29 – № 8. – С. 28-31.
58. Пестонова Е.А. Механическая прочность почвенной структуры взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой: автореф. дис. ... канд. с-х. наук: 06.01.03 / Пестонова Елена Аркадьевна. – Москва, 2007. – 28с.
59. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв: Методическое руководство / Под ред. Е.В. Шеина – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 200с.
60. Прущик А.В., Сухановский Ю.П., Вытовтов В.А., Титов А.Г. Дождевание как экспресс-метод изучения водной эрозии почв // Биология растений и садоводство: теория, инновации. – 2019. – №148. – С. 7-14.
61. Рогова О.Б., Колобова Н.А., Иванов А.Л. Сорбционная способность серой лесной почвы в отношении фосфора в зависимости от системы удобрения // Почвоведение. – 2018. – № 5. – С. 573-579.
62. Савастру Н.Г. Агроэкологическая оценка почвенного покрова Владимирского Ополья для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27 / Савастру Наталья Георгиевна. – Москва, 1999. – 28с.
63. Семенов В.М. Журавлев Н.С., Тулина А.С. Минерализация органического вещества в серой лесной почве и типичном черноземе, обесструктуренных физическими воздействиями // Почвоведение. – 2015. – № 10. – С. 1254-166.

64. Смирнова М.А., Жидкин А.П., Лозбенев Н.И., Заздравных Е.А., Козлов Д.Н. Цифровое картографирование степени эродированности почв с использованием моделей фактор - свойство и фактор - процесс - свойство (юг Среднерусской возвышенности) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – № 104. – С. 158-198.
65. Сус Н.И. Эрозия почвы и борьба с нею / Н. И. Сус. — М.: Сельхозиздат – 1949. — 350 с.
66. Сухановский Ю.П., Вытовтов В.А., Прущик А.В., Соловьева Ю.А., Санжарова С.И. Оценка впитывающей способности почвы с использованием портативной дождевальной установки // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2015. – №78 – С. 31-41.
67. Твенхофел У.Х. Учение об образовании осадков / У.Х. Твенхофел. — М.-Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1936. — 916 с.
68. Теории и методы физики почв / Коллективная монография под общей редакцией Шеина Е.В. и Карпачевского Л.О. – М.: Гриф и К. –2007. – 616 с.
69. Торнз Дж.Б. Процессы эрозии, вызываемые водным потоком, и их регулирование во времени и пространстве: теоретическая точка зрения / Дж.Б. Торнз. – Эрозия почвы. – М.: Колос, 1984. – С. 178-251.
70. Тымбаев В.Г. Пространственная агрофизическая характеристика комплекса серых лесных почв Владимирского Опожья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03 / Тымбаев Владимир Геннадьевич. – Москва, 2004. – 28с.
71. Тюрюканов А.Н., Быстрицкая Т.Л. Опожья Центральной России и их почвы / А.Н. Тюрюканов, Т.Л. Быстрицкая. – М.: Наука, 1971. – 239 с.
72. Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Сусленкова М.М., Александров М.С., Ежелев З.С., Хмелева М.В., Шхапацев А.К., Гасина А.И. Агрегатная структура естественных и пахотных почв разного генезиса: морфологические и реологические характеристики // Почвоведение. – 2021. – № 9. – С. 1019–1032.
73. Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А. Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых

горизонтов зонального ряда почв европейской России // Почвоведение. – 2019. – № 3. – С. 335–347.

74. Фомин Д.С., Валдес-Коровкин И.А., Голуб А.П., Юдина А.В. Оптимизация анализа агрегатного состава почв методом автоматического рассева // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – № 96. – С. 149-177.

75. Фомичева Д.В., Жидкин А.П., Комиссаров М.А. Полимасштабные оценки варьирования эродированности почв в условиях высокой неоднородности почвенного покрова северной лесостепи Среднерусской возвышенности // Почвоведение. – 2024. – № 2. – С. 345-358.

76. Фомичева Д.В., Шамшурина Е.Н. Ретроспективный анализ интенсивности эрозионных процессов от эпохи Генерального межевания до наших дней (на примере ключевых участков в Московской и Тульской областях) // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов): Сборник статей по материалам XIII семинара молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, Набережные Челны, 25–29 апреля 2022 года. – Москва: Набережночелнинский государственный педагогический университет, 2023. – С. 118-122.

77. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник АГАУ. – 2014. – №6 (116). – С. 53-57.

78. Хирк А.В., А.П. Жидкин, Заздравных Е.А. Оценка влияния эрозии на содержание органического вещества почв пашни Валуйского района Белгородской области // Развитие современных систем земледелия и животноводства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию Пермского НИИСХ, Пермь, 05–07 июля

2023 года / Науч. редколлегия: К.Н. Корляков [и др.]. – Пермь: Издательство "От и До" – 2023. – С. 147-153.

79. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С. Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. – 2016. – № 9. – С.1093–1100.

80. Чижикова Н.П., Карпова Д.В. Особенности минералогического состава тонкодисперсных фракций второго гумусового горизонта серых и агросерых тяжелосуглинистых почв Владимирского Ополя // Плодородие. – 2009. – № 1. – С. 1107-1117.

81. Швебс Г.И. Материалы к изучению эродирующего действия капель дождя // Почвоведение. — 1968. — № 2. — С. 133—140.

82. Швебс Г.И. Теоретические основы эрозиоведения / Г.И. Швебс. — Киев-Одесса: Вища школа, 1981. — 222 с.

83. Шеин Е.В. Початкова Т.Н., Холодков А.И. Реологические свойства дерново-подзолистой почвы // Вестник ОГУ. – 2016. – № 6 (194). – С. 86-89.

84. Шеин Е.В., Кириченко А.В., Бутылкина М.А., Бueva Ю.Н. Закономерности распределения почвенно-генетических и физических свойств комплекса серых лесных почв Владимирского ополя // Вестн. Моск. ун-та. сер. 17. Почвоведение. – 2002. – № 4. – С. 17-24.

85. Шеин Е.В., Кирюшин В.И., Корчагин А.А., Мазиров М.А., Дембовецкий А.В., Ильин Л.И. Оценка агрономической однородности и совместимости почвенного покрова Владимирского Ополя //Почвоведение – 2017. – № 10. – С. 1208–1215.

86. Шишкина Н.Г., Востокова Л.Б., Балабко П.Н., Лукьянова Н.Н. Почвенно-географическое районирование и бонитировка почв Владимирской области // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2001. – №1. – С.56-62.

87. Щукин И.М. Оценка экологического состояния агроэкосистем Верхневолжья: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.08 / Щукин Иван Михайлович. – Владимир, 2018. – 24 с.

88. Юдина А.В., Милановский Е.Ю. Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2017. – № 89. – С. 3–20.
89. Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: A review // *Geoderma*. – 2005. – Vol. 124(1-2) – P. 3-22.
90. Carotenuto C., Minale M. Effect of the Soil Organic Content on Slurries Involved in Mudflows // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2016. – Vol. 16. – P.89–97.
91. Crovetto C. Stubble over the soil: The vital role of plant residue in soil management to improve soil quality / C. Crovetto. – American Society of Agronomy, Madison: WI, 1996. – P. 245.
92. Dawson K.P. Durum wheat // *ESCA – Technical Note*. – 1984. – № 337. – P. 7-16.
93. Gobin A., Jones R., Kirkby M., Campling P., Govers G., Kosmas C., Gentile A.R. Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water // *Environmental Science and Policy*. – 2004. – Vol. 7(1). – P. 25–38.
94. Guerra A.J.T., Fullen M.A., Jorge M.C.O., Bezerra J.F.R., Shokr M.S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review // *Pedosphere*. – 2017. – Vol. 27(1). – P. 27–41.
95. Komissarov M., Fomicheva D., Zhidkin A., Yudina A. Variations in soil erodibility (K-factor) for the Chernozems depending on the method of texture determination // *MethodsX*. – 2024. – Vol. 13 – P. 102876.
96. Lafond G.P., Derksen D.A. Row spacing and seeding rate effects in wheat and barley under a conventional fallow management system // *Canadian Journal of Plant Science*. – 1996. – Vol. 76. – № 4. – P. 791-793.
97. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *In Environment International*. – 2003. – Vol. 24 (9). — P.437 – 450.
98. Lal R. Soil degradation by erosion // *Land Degradation and Development*. 2001. – Vol. 12. — P.519-539.

99. Munkholm L.J., Heck R.J., Deen B., Zidar T., Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management // *Geoderma*. – 2016. – Vol. 268. – P.52-59.
100. Li Z. Impacts of climate change on water erosion: A review // *In Earth-Science Reviews*. – 2016. – Vol. 163. — P.94-117.
101. Mezger T.G. *The Rheology Handbook* / T.G. Mezger. – 3-rd Revised Edition – Hanover, 2011. — P. 436.
102. Misra R.K., Teixeira P.C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength // *Soil and Tillage Research* — 2001. — V. 59. — P. 81-93.
103. Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Yu B., Klik A., Lim K.J., Ballabio C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7(1). — P. 4175-4186.
104. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological Parameters as Aspect by Water Tension in Subtropical Soils // *Rev. Bras. Cienc. Solo*. — 2016. — Vol. 40 — P.1-14.
105. Pronin D. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren auf die vertikale Differenzierung von Bodenkennwerten auf lehmigem Sand (Brandenburg) und auf Schwarzerde (Novosibirsk) sowie auf ausgewählte Pflanzenmerkmale // *Aachen: Shaker Verlag*. – 2003. – P.88-90.
106. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., MacCool D.K., Yoder D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture // *Handbook №703*. — 1997. — P. 404.
107. Sijtsma C.H., Campbell A.J., McLaughlin N.B., M.R. Carter. Comparative tillage costs for crop rotations utilizing minimum tillage on a farm scale // *Soil and Tillage Research*. – 1998. – Vol. 49. – P. 223-231.
108. Tarchitzky J, Chen Y. Rheology of sodium-montmorillonite suspensions: Effects of humic substances and pH // *Soil Science Society of America Journal* — 2002. — Vol. 66 (2). — P. 406-412.

109. Yudina A.V., Klyueva V.V., Romanenko K.A., Fomin D.S. Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability // *Geoderma*. – 2022. – Vol. 415. – P. 115-177.
110. Yudina A., Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores // *Geoderma*. — 2023. — Vol. 434. — P. 116478-116489
111. Zentner R.P., Lafond G.P., Derksen D.A., Campbell C.A. Tillage method and crop diversification: effect on economic returns and riskiness of cropping systems in a Thin Black Chernozem of the Canadian Prairies // *Soil and Tillage Research*. – 2002. – Vol. 67. № 1. – P. 9-21.
112. Zhidkin A., Fomicheva D., Yurova A., Ivanova N., Dostál T., Krása J., Komissarov M. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region) // *International Soil and Water Conservation Research*. – 2022. – Vol. 10. – No. 1. – P. 149-160.
113. Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Fomicheva D.V., Shamshurina E.N., Golosov V.N. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // *Geoderma*. – 2023. – Vol. 430. – P. 116-122.

Приложения

Приложение 1. Агрохимические показатели агросерых почв, объект 1.

делянка	Севооборот	обработка	Почва	повторность	слой (см)	рН	Нг	Соcн	NO ₃	N- NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅	гумус
							мг экв/100г		Мг/100г				%
1	1	Отвальная	агросерая сильно- оподзоленная	1	0-20	5.5	2.45	19.5	2.61	1.51	23.8	13.67	2.58
					20-40	5.44	1.75	21	1.14	1.2	20	13.24	1.52
				2	0-20	5.33	2.62	19.5	1.15	1.44	19.8	13.44	2.23
					20-40	5.11	2.27	19.5	0.79	1.42	19.1	16.76	0.96
				3	0-20	5.42	2.62	20	1.55	1.33	19.7	13.35	2.52
					20-40	5.2	2.27	19.4	1.19	1.06	19.8	11.09	1.57
			агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.6	2.45	19.6	4.43	2.27	22.4	15.16	2.63
					20-40	5.2	2.45	19.2	1.8	1.8	19	15.16	1.11
				2	0-20	5.4	2.62	19.8	6.11	1.58	18.3	14	2.22
					20-40	5.1	2.45	19.4	1.61	1.19	20.2	10.18	0.97
				3	0-20	5.5	2.62	19.6	1.64	1.89	18.4	14.2	2.2
					20-40	5.3	2.1	19.5	0.75	1.27	18.1	11	0.99
			агросерая	1	0-20	5.3	2.97	21.2	3.54	1.18	20.5	12.69	2.6
					20-40	5.3	2.1	22.8	1.16	1.79	23	14.2	1.47
				2	0-20	5.3	2.8	20.6	2.49	1.75	18.9	13.27	2.49
					20-40	5.1	2.62	22.4	1.33	1.43	22.4	14.91	1.71
				3	0-20	5.6	2.8	21.1	5.31	1.88	21.6	12.82	2.51
					20-40	5.3	2.27	22.7	1.37	1.57	21.8	14.18	1.3
2	1	комбинированно-плоскорезная	агросерая	1	0-20	5.6	2.97	20.8	2.49	1.27	19.1	11.53	2.92
					20-40	5.3	2.8	17.8	0.88	1.23	17.5	19.45	1.43
				2	0-20	5.44	3.32	20	2.92	1.13	18.7	11.54	2.86
					20-40	5.2	2.62	18.8	0.9	0.91	16.3	14.93	1.71
				3	0-20	5.3	3.15	20	4.03	1.06	17.8	12.13	2.96
					20-40	5.07	2.27	20.5	1.09	0.76	19.3	11.91	1.16
			агросерая слабо- подзоленная	1	0-20	5.2	3.5	21.1	3.21	0.88	19.5	12.82	3.26
					20-40	5.1	2.8	21.5	1.31	0.52	21.3	14.63	1.12
				2	0-20	5.2	3.67	21	2.99	0.72	17.8	11.78	3.43
					20-40	5	2.97	22.2	1.31	0.62	22.2	14.36	2.27
				3	0-20	5.3	3.5	20.7	3.45	0.78	18.3	12.07	3.4
					20-40	5	2.62	20.5	1.04	0.8	21.4	14.63	1.37
			агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.7	2.8	23.1	3.14	0.88	23.7	13.79	3.68
					20-40	5.4	2.1	17.1	1.43	0.52	17.1	19.04	1.69
				2	0-20	5.5	2.97	21.6	3.37	0.72	17.2	12.88	3.69
					20-40	5.34	2.27	17.3	1.46	0.81	18.2	16.92	1.58
				3	0-20	5.6	2.8	22.5	3.05	0.84	25.3	13.28	3.46
					20-40	5.3	1.92	15.6	0.99	0.79	15.1	17.41	1.26

делянка	севооборот	обработка	почва	повторность	слой (см)	pH	Hг	Soch	NO ₃	N- NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅	гумус %
							мг экв/100г		Мг/100г				
3	1	комбинированно-ярусная	агросерая средне-оподзоленная	1	0-20	6.05	1.75	23.3	3.76	0.75	22.1	17.71	3.54
					20-40	6.02	1.75	19.3	1.4	1.07	15.5	20.27	2.72
				2	0-20	5.9	2.27	22.5	2.99	0.78	22.8	15.24	3.4
					20-40	5.88	1.92	19.5	1.61	0.78	16.6	19.02	2.38
				3	0-20	6.1	2.1	22.4	2.99	1.09	24	16.87	3.52
					20-40	5.95	2.27	20.8	1.5	0.86	14.7	19.09	2.22
			агросерая средне-оподзоленная	1	0-20	5.82	2.45	20.4	2.79	0.74	19.9	12.09	2.9
					20-40	5.42	2.27	20.8	1.14	0.66	18.8	7.97	1.68
				2	0-20	5.67	2.45	20.3	3.14	1.17	18.7	10.64	2.92
					20-40	5.48	2.1	20.3	1.02	0.85	18.4	11.27	1.53
				3	0-20	5.58	2.8	20	2.21	1.09	17.6	10.95	3.1
					20-40	5.52	2.1	20.5	1.11	1	18	10.25	1.67
4	1	противозерошная	агросерая слабо-опдзоленная	1	0-20	5.73	2.45	21.9	2.02	1.18	23.9	10.9	2.74
					20-40	5.53	1.75	22.1	0.88	0.98	19.6	7.75	1.34
				2	0-20	5.69	2.45	20.5	5.98	1.1	21.8	10.25	2.6
					20-40	5.25	2.1	20.4	1.64	0.75	19.4	6.33	1.5
				3	0-20	5.7	2.27	19.9	2.65	1.08	26.3	10.81	2.62
					20-40	5.42	1.92	21.4	1.14	0.7	20.3	5.69	1.16
			агросерая	1	0-20	5.46	2.8	20.2	1.24	0.86	17.8	9.6	2.55
					20-40	5.19	1.92	19.7	0.84	0.59	17.7	8.22	0.91
				2	0-20	5.52	2.8	19.9	1.8	1.06	21.6	8.95	2.74
					20-40	5.33	1.92	19.3	0.81	0.65	15.6	7.16	1.34
				3	0-20	5.41	2.8	19.3	2.72	0.78	17	9.56	2.65
					20-40	5.31	1.92	19.4	0.92	0.62	17.8	9.2	1.02
5	1	отвальная	агросерая сильно-оподзоленная	1	0-20	5.31	3.32	20.4	1.95	0.89	15.5	9.9	2.96
					20-40	5.39	2.45	18.4	0.92	0.78	13.6	16.16	2
				2	0-20	5.43	3.15	21	2.79	1.04	15	9.92	2.9
					20-40	5.38	2.62	20.3	1.11	1.07	15.3	15.77	1.91
				3	0-20	5.58	2.97	21.1	2.54	1.31	17.7	11.64	3
					20-40	5.44	2.62	19.6	1.24	1.52	14.4	14.23	2.06
			агросерая средне-оподзоленная	1	0-20	5.34	3.15	21	1.9	1.78	18.1	13.47	2.92
					20-40	5.2	2.1	20.8	0.86	1.12	20	15.27	1
				2	0-20	5.31	3.15	20.9	1.61	0.96	15.1	12.05	2.8
					20-40	5.19	1.92	19.4	0.75	0.88	18	15.38	1.04
				3	0-20	5.28	3.5	21.8	1.61	1.04	18.4	14.64	2.93
					20-40	5.15	2.27	19.4	0.88	1.09	17.6	17.13	1.2
			агросерая	1	0-20	5.22	3.5	21.4	2.61	0.99	16.4	8.9	2.84
					20-40	5.06	2.8	22.4	1.16	1.04	19.5	9.25	1.64
				2	0-20	5.44	3.5	21.7	4.25	1.06	17.6	11.22	2.99
					20-40	5.43	3.32	22.4	1.86	0.97	18.3	14.97	1.68
				3	0-20	5.29	3.32	21.4	3.59	0.99	17.1	11.11	2.88
					20-40	5.23	2.8	21.6	1.43	0.73	19.2	10.01	2

делянка	севооборот	обработка	почва	повторность	слой (см)	рН	Нг	Со _{сн}	NO ₃	N- NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅	гумус %
							мг экв/100г		Мг/100г				
6	1	комбинированно-плоскорезная	агросерая	1	0-20	5.25	3.67	21.4	2.26	1.25	16	9.77	3.07
					20-40	5.13	3.15	19.9	1.16	1.16	16.4	13.82	1.73
				2	0-20	5.2	4.02	20.9	1.98	1.5	16.5	9.63	3.26
					20-40	5.08	3.32	16.8	0.9	1.3	14.3	15.27	2.14
				3	0-20	5.27	3.85	21.7	3.76	1.52	18.1	10.14	3.39
					20-40	5.2	2.97	19.8	1.46	0.99	16.5	13.33	2.27
			агросерая сильно- оподзоленная	1	0-20	5.12	4.72	21.6	2.99	1.12	17	7.94	3.5
					20-40	5.18	2.8	16.4	1.02	0.46	14.7	12.22	1.49
				2	0-20	5.22	4.02	21.7	2.65	0.8	15.5	8.52	3.36
					20-40	5.22	3.15	17.9	1.16	0.89	12.5	10.76	1.85
				3	0-20	5.21	4.2	21.1	1.79	1.46	17.8	10.14	3.52
					20-40	5.08	2.8	17	0.72	0.99	14.5	12.15	1.25
			агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.02	5.42	21.2	2.02	1.11	25.2	11.47	3.75
					20-40	5.22	3.85	22.4	1.43	1.02	14.9	8.35	3.26
				2	0-20	5.16	4.55	20.8	4.43	1.35	17.8	11.35	3.79
					20-40	5.21	3.5	20.3	1.64	0.93	16.2	12.43	2.5
				3	0-20	5.08	4.9	22.1	2.61	1.44	15.6	10.1	3.61
					20-40	5.01	3.85	18.2	0.97	1.23	15	11.9	2.56
			агросерая слабо- оподзоленная	1	0-20	5.14	4.37	21.6	2.72	1.44	16.8	10.91	3.62
					20-40	5.04	2.8	21.5	1.06	1.23	23.4	11.85	1.6
				2	0-20	5.16	4.2	21.8	3.59	1.04	17.1	9.53	3.24
					20-40	5.27	3.5	23.4	1.28	1.12	19.8	10.7	2.72
				3	0-20	5.23	4.02	21.2	2.54	1.93	19.2	10.94	3.31
					20-40	5.04	2.8	20.8	1.14	1.29	23.3	13.92	1.11
			агросерая с ВГГ	1	0-20	5.25	4.55	23.6	2.49	1.03	15.1	9	4.11
					20-40	5.23	5.42	26.3	1.9	1.68	14.5	8.71	4.7
				2	0-20	5.18	5.6	26.1	1.57	1.56	18.2	9.5	4
					20-40	5.34	4.37	24.8	4.25	2.6	19.2	11.1	4.67
				3	0-20	5.38	4.02	24.5	2.85	1.17	22.9	10.85	4.17
					20-40	5.26	5.25	25.5	1.4	0.98	15.2	9.64	4.38
7	1	комбинированно-ярусная	агросерая с ВГГ	1	0-20	5.25	1.75	28.6	4.16	1.31	36.1	21.57	4.27
					20-40	5.88	3.15	26.6	1.8	0.78	18.2	13.61	4.31
				2	0-20	5.84	2.97	26	7.71	0.99	28.2	16.17	3.96
					20-40	5.67	3.67	26.8	4.43	1.23	18	11.51	4.43
				3	0-20	6.43	1.57	27.8	2.79	1.14	22.9	20.76	4.02
					20-40	5.98	2.97	24	1.73	1.02	15.3	13.15	4.3
			агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.84	2.27	22.1	1.86	1.23	22.8	14.27	2.78
					20-40	5.68	1.92	20.4	1.02	1.05	17	14.47	1.78
				2	0-20	5.95	2.27	22.2	2.26	1.15	21.8	13.59	2.8
					20-40	5.98	2.1	21.3	1.31	0.94	18.2	9.11	2.27
				3	0-20	5.87	2.27	22	1.73	1.61	19.7	11.87	2.8
					20-40	5.57	2.45	20.8	1.02	1.26	17.2	9.6	1.92

делянка	севооборот	обработка	почва	повторность	слой (см)	рН	Нг	Soch	NO ₃	N-NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅	гумус %
			мг экв/100г				Мг/100г						
8	1	противоэрозийная	агросерая	1	0-20	5.56	2.8	19.9	1.95	1.18	23.3	11.29	2.74
					20-40	5.3	2.27	20.5	0.75	0.85	17	7.6	1.23
				2	0-20	5.73	2.62	20.1	2.49	1.05	39	13.41	2.86
					20-40	5.27	2.62	18.8	0.93	0.68	26.5	10.01	1.73
				3	0-20	5.58	2.8	20.8	1.57	1.26	28.3	10.45	2.75
					20-40	5.44	2.1	19.2	1.04	0.81	25.6	10.46	1.41
			агросерая слабо- оподзоленная	1	0-20	5.54	2.45	21	2.21	1.08	21.4	12.31	2.42
					20-40	5.35	2.1	22.8	0.97	1.09	20.6	10.35	1.29
				2	0-20	5.47	2.45	20.8	2.79	1.04	19.2	10.83	2.42
					20-40	5.35	2.1	23.9	1.16	1.15	22.3	10.43	1.36
				3	0-20	5.43	2.8	20.4	4.34	1.22	21.5	11.76	2.29
					20-40	5.37	2.1	24.4	1.28	0.68	23.6	9.13	1.29
13	2	отвальная	агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.48	2.8	22.5	3.54	1	20.2	14.65	2.73
					20-40	5.32	2.1	22	1.11	0.88	17.9	13.28	1.48
				2	0-20	5.37	2.97	21.8	4.25	1.11	17.1	14.74	2.75
					20-40	5.21	2.45	22.4	1.19	0.65	17.3	11.25	1.43
				3	0-20	5.13	2.8	21.1	5.44	1.15	17.6	13.3	2.5
					20-40	5.39	2.1	23.1	1.43	0.91	17.9	13.77	1.36
			агросерая	1	0-20	5.74	2.45	24	3.21	0.96	16.9	14.73	2.38
					20-40	5.7	1.57	20.9	1.02	0.8	17.9	15.77	1.83
				2	0-20	5.57	2.45	23.1	1.73	0.8	18.9	14.04	2.24
					20-40	5.52	1.75	24.5	0.75	0.74	22.9	12.72	0.84
				3	0-20	5.6	2.45	22	1.86	1.24	20.6	13.8	2.5
					20-40	5.87	1.57	25.9	1.02	0.5	22.2	10.28	1.12
14	2	комбинированно-плоскорезная	агросерая средне- оподзоленная	1	0-20	5.62	3.5	22.9	4.74	1.15	22.1	15.36	3.72
					20-40	5.55	3.67	25.4	2.65	0.63	18.2	8.4	4.06
				2	0-20	5.6	2.97	23.6	3.28	1.5	33.7	18.5	3.97
					20-40	5.36	2.97	24.3	1.43	0.58	14.8	8.26	3.33
				3	0-20	5.53	3.32	24.7	12.5	0.8	26.3	16.03	3.58
					20-40	5.46	3.5	22.1	1.95	0.65	12.3	8.6	3.7
			агросерая с ВГГ	1	0-20	5.43	4.37	20.3	3.37	1.34	17.1	8.59	3.78
					20-40	5.13	3.32	21.8	1.19	1.14	14.3	9.14	1.92
				2	0-20	5	4.72	20.2	3.37	1.03	16	8.82	3.52
					20-40	4.9	3.32	22.2	1.5	0.54	15	9.27	1.92
				3	0-20	5.02	4.55	20.5	2.85	1.45	14.5	9.59	3.52
					20-40	5.06	3.32	20.5	1.43	0.6	14.8	9.89	1.99
			агросерая слабо- оподзоленная	1	0-20	5.17	4.02	22.6	5.09	0.87	20	10.24	3.33
					20-40	5.09	3.32	20.1	1.4	0.8	16	9.14	1.89
				2	0-20	5.12	4.55	23.2	5.71	1.57	23.8	10.99	3.24
					20-40	5.16	3.67	21.4	2.21	0.85	17.1	6.5	2.56
				3	0-20	5.07	4.72	21.9	4.43	1.31	20	8.49	3
					20-40	5.08	3.15	20.3	1.86	0.8	16.2	9.63	1.95

делянка	севооборот	обработка	почва	повторность	слой (см)	pH	Hг	Soch	NO ₃	N-NH ₄	K ₂ O	P ₂ O ₅	гумус %
							мг экв/100г		Мг/100г				
14	2	к.-п.	агросерая	1	0-20	5.56	4.2	23.5	4.16	0.93	15.9	9.4	2.82
					20-40	5.04	2.8	22.1	1.55	0.98	23.1	12.48	1.2
				2	0-20	5.07	4.02	22.7	3.76	0.95	16.7	10.1	2.98
					20-40	4.92	2.8	22.2	1.19	0.63	20.7	12.62	1.12
				3	0-20	5.1	3.85	23.3	7.35	0.57	17.1	9.65	2.88
					20-40	5.02	2.8	21.7	1.68	0.83	23	13.65	1.54
15	2	комбинированно-ярусная	агросерая слабо- опдзоленная	1	0-20	5.43	3.5	21.5	6.24	0.93	36.5	16.16	2.94
					20-40	5.31	3.32	21	2.43	0.71	20.9	10.17	2.77
				2	0-20	5.24	3.32	19.8	6.55	0.84	29.3	12.71	2.22
					20-40	5.19	2.45	21.3	1.9	0.81	17.5	9.27	1.1
				3	0-20	5.36	3.5	18.4	7.17	1.04	37.6	11.86	2.82
					20-40	5.09	2.62	20.9	2.12	0.52	17.3	9.29	1.42
			агросерая	1	0-20	5.21	3.67	21.2	4.74	0.92	20.5	11.08	2.61
					20-40	5.09	2.45	21	1.46	0.52	17.6	7.42	1.17
				2	0-20	5.31	3.32	20.2	5.09	0.76	23.9	10.91	2.27
					20-40	5.18	2.1	20.7	1.19	0.48	16.5	8.83	0.86
				3	0-20	5.34	3.5	19.9	6.99	0.8	22.9	12.19	2.61
					20-40	5.23	2.45	18.6	1.57	0.63	16.1	10.2	1.35
16	2	противоэрозийная	агросерая слабо- опдзоленная	1	0-20	5.32	2.8	20.2	4.43	1.22	19.5	8.89	2.18
					20-40	5.35	2.27	21.6	1.68	0.67	18.2	9.02	1.69
				2	0-20	5.32	3.15	20.8	4.03	0.76	20.8	9.14	2.45
					20-40	5.48	2.27	21.2	1.43	0.84	15.3	6.44	1.95
				3	0-20	5.31	3.32	21.3	5.71	0.93	21.6	9.95	2.39
					20-40	5.52	2.27	21	2.21	0.87	18.4	8.34	1.62
			агросерая	1	0-20	5.41	2.97	20.5	3.45	1.26	28.2	11.86	2.52
					20-40	4.97	2.8	22.2	1.73	0.85	26.2	12.84	1.35
				2	0-20	5.26	3.15	20.3	19.8	0.84	28.6	14.5	2.47
					20-40	5.36	2.1	22.8	2.39	0.74	22.3	10.58	1
				3	0-20	5.34	3.15	20.6	4.52	1.11	24	12.38	2.36
					20-40	5.11	2.1	22.8	1.19	0.81	23.2	10.9	0.88
			агросерая с ВГГ	1	0-20	5.26	3.5	19.3	6.87	0.81	32.7	13.27	2.66
					20-40	5.3	2.45	19.7	1.14	1.13	19.6	10.02	1.75
				2	0-20	5.13	3.67	18.7	19.8	0.79	31.6	13.14	2.49
					20-40	5.31	2.8	20	1.64	0.93	22.2	10.05	1.92
				3	0-20	5.23	3.5	19.3	2.85	0.86	28.4	12.14	2.58
					20-40	5.36	2.45	20.3	1.9	0.88	24.4	9.78	1.91

**Приложение 2. Содержание воздушно-сухих и водопрочных агрегатов
агросерой почвы и агросерой с ВГГ.**

Обрабо	Почва	слой, см	агрегаты	содержание агрегатов, %								
				>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25
комбинировано-	агросерая	0-20	воздушно-сухие	9.6	8.0	7.1	12.1	4.5	19.6	23.1	8.6	6.2
			водоустойчивые				2.6	1.0	3.0	5.9	21.7	65.8
		20-40	воздушно-сухие	5.4	5.9	6.6	12.8	5.7	16.3	15.2	13.8	15.7
			водоустойчивые				0.5	0.1	0.7	3.2	21.7	73.7
	агросерая	0-20	воздушно-сухие	6.5	7.0	7.5	12.8	6.2	20.1	14.0	11.5	11.5
			водоустойчивые				0.8	0.5	3.2	8.0	40.2	47.4
		20-40	воздушно-сухие	1.3	3.1	5.2	9.8	5.2	17.6	18.5	23.7	14.1
			водоустойчивые				0.8	1.2	7.6	27.3	39.5	23.6
	отвальная	0-20	воздушно-сухие	13.2	13.5	12.1	16.0	5.9	15.2	9.9	7.3	6.1
			водоустойчивые				0.6	0.8	3.9	10.6	37.0	47.0
		20-40	воздушно-сухие	21.2	7.4	7.2	12.6	5.0	15.5	12.4	10.3	7.9
			водоустойчивые				0.4	1.1	5.8	14.3	27.4	51.0
комбинир	агросерая	0-20	воздушно-сухие	8.8	10.3	14.2	5.9	17.1	12.3	12.3	10.0	8.8
			водоустойчивые				0.0	1.1	2.9	11.8	38.8	45.4
		20-40	воздушно-сухие	21.5	5.5	6.3	15.7	6.3	18.4	9.7	8.2	6.6
			водоустойчивые				2.3	3.8	11.2	16.0	29.7	37.0
комбинир	агросерая	0-20	воздушно-сухие	20.0	12.6	11.5	15.0	5.2	12.4	8.8	7.4	6.3
			водоустойчивые				0.9	1.0	3.8	9.3	29.4	55.5
		20-40	воздушно-сухие	4.5	7.6	8.7	15.3	6.1	16.9	13.9	13.4	12.9
			водоустойчивые				2.6	0.3	1.3	7.5	19.8	68.6
противоэрозийная	агросерая	0-20	воздушно-сухие	19.9	12.4	10.7	14.6	5.3	13.8	8.7	7.8	5.6
			водоустойчивые				0.0	2.0	2.4	8.0	31.7	56.0
		20-40	воздушно-сухие	18.5	6.7	5.9	13.6	6.4	17.1	12.2	11.2	7.4
			водоустойчивые				2.1	1.8	7.4	13.4	31.8	43.5
	агросерая	0-20	воздушно-сухие	24.4	14.3	11.3	13.0	4.0	11.7	8.4	6.7	5.5
			водоустойчивые				0.4	0.4	2.3	7.0	29.2	60.8
		20-40	воздушно-сухие	4.3	8.0	8.5	14.4	6.5	16.5	13.5	11.5	16.5
			водоустойчивые				0.0	0.7	2.6	10.5	43.1	43.2

Приложение 3. Содержание воздушно-сухих и водопрочных агрегатов 24 деланки, опыт АЛСЗ

№	Звено	обработка	агрегаты	содержание агрегатов, %								
				>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25
1	черный пар	отвальная	воздушно-сухие	16.5	16.7	14.8	15.8	11.9	14.2	3.2	3.7	3.2
			водоустойчивые			26.1	19.4	9.9	12.0	7.5	7.6	17.5
2		плоско-резная	воздушно-сухие	15.9	12.8	11.2	14.8	12.3	18.2	3.5	5.3	6.0
			водоустойчивые			26.8	12.6	9.1	13.9	8.1	6.3	23.2
3		ярусная	воздушно-сухие	8.4	13.3	12.9	17.4	14.9	20.4	2.1	5.1	5.5
			водоустойчивые			32.7	14.2	9.1	11.1	7.6	4.8	20.4
4		противо-эрозионная	воздушно-сухие	13.6	11.6	11.9	15.4	14.3	19.7	2.6	5.5	5.4
			водоустойчивые			32.9	15.1	9.8	9.8	7.5	4.8	20.0
5	черный пар	отвальная	воздушно-сухие	22.9	10.7	10.0	13.1	12.1	18.2	3.3	5.6	4.2
водоустойчивые					32.8	11.1	8.4	12.2	9.5	6.3	19.8	
6		плоско-резная	воздушно-сухие	15.3	11.1	8.8	14.8	12.6	20.7	3.6	7.0	6.1
			водоустойчивые			25.7	12.4	10.7	13.0	8.7	5.8	23.8
7		ярусная	воздушно-сухие	25.4	13.2	10.8	14.4	11.5	14.7	2.9	4.1	3.0
			водоустойчивые			31.9	14.4	10.3	12.0	7.4	5.2	19.0
8		противо-эрозионная	воздушно-сухие	21.9	15.2	10.6	15.0	11.3	15.4	2.5	4.3	3.9
			водоустойчивые			21.5	17.6	12.2	13.5	8.1	4.7	22.5
9	занятый пар	отвальная	воздушно-сухие	10.0	10.6	13.2	16.0	12.9	20.3	3.3	7.0	6.7
водоустойчивые					26.7	13.9	10.0	10.2	6.4	5.1	26.7	
10		плоско-резная	воздушно-сухие	8.6	8.9	9.5	15.0	16.5	18.4	4.6	8.8	9.6
			водоустойчивые			21.8	10.4	9.0	12.5	9.9	7.8	28.8
11		ярусная	воздушно-сухие	10.5	19.3	18.0	17.3	11.6	13.1	2.6	3.3	4.4
			водоустойчивые			37.6	17.4	8.8	5.2	8.6	3.8	18.6
12		противо-эрозионная	воздушно-сухие	7.1	21.4	17.8	17.7	12.6	13.3	2.3	3.0	4.8
			водоустойчивые			51.1	19.8	8.2	6.9	2.8	2.1	9.2
13	занятый пар	отвальная	воздушно-сухие	23.5	12.8	10.2	13.4	10.9	17.3	3.1	5.0	3.8
водоустойчивые					23.7	11.6	7.7	11.7	6.7	4.3	34.3	
14		плоско-резная	воздушно-сухие	19.5	13.0	9.3	12.0	11.9	19.9	3.3	6.2	5.0
			водоустойчивые			30.4	10.8	9.1	11.3	8.3	5.1	24.9

№	Звено	обработка	агрегаты	содержание агрегатов, %									
				>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25	
15	занятый пар	ярусная	воздушно-сухие	25.6	12.6	11.0	14.3	12.1	14.8	2.8	4.0	2.8	
			водоустойчивые			9.1	9.7	11.1	19.3	13.4	10.1	27.4	
противо-эрозионная		воздушно-сухие	29.0	16.9	12.4	14.1	10.1	11.3	2.2	2.3	1.8		
		водоустойчивые			14.9	13.3	12.3	17.3	11.8	6.4	24.0		
пшеница		отвальная	воздушно-сухие	16.4	20.3	13.9	14.9	9.5	13.5	3.5	3.9	4.0	
			водоустойчивые			41.0	13.4	10.0	14.2	5.8	4.6	11.0	
		плоско-резная	воздушно-сухие	11.1	15.8	11.0	14.8	12.9	18.8	3.6	5.7	6.4	
			водоустойчивые			29.6	13.3	11.3	16.3	9.6	8.1	11.8	
	ярусная	воздушно-сухие	14.1	17.6	9.8	13.4	11.4	16.9	3.8	6.5	6.5		
		водоустойчивые			26.6	13.3	9.3	14.8	9.3	8.3	18.4		
	противо-эрозионная	воздушно-сухие	18.9	13.9	11.4	14.1	12.5	16.4	3.1	4.6	5.2		
		водоустойчивые			36.4	13.6	10.1	12.9	8.4	6.5	12.1		
	21	пшеница	отвальная	воздушно-сухие	17.4	17.4	13.6	14.2	12.3	14.8	2.8	3.9	3.7
				водоустойчивые			35.0	12.9	18.3	11.4	7.2	4.9	10.3
плоско-резная	воздушно-сухие		8.2	13.2	8.8	14.6	15.5	21.1	4.1	7.0	7.5		
	водоустойчивые				13.9	10.9	8.0	18.4	11.4	12.3	25.1		
ярусная	воздушно-сухие		7.8	13.1	9.4	15.7	15.4	22.3	4.2	5.9	6.0		
	водоустойчивые				23.2	12.0	10.7	13.1	9.7	10.2	21.1		
24	противо-эрозионная		воздушно-сухие	7.0	12.3	8.9	14.0	13.5	19.2	6.5	8.6	9.9	
			водоустойчивые			25.5	13.7	11.1	18.7	12.6	9.3	9.1	

Приложение 4. Содержание воздушно-сухих и водопрочных агрегатов склонового поля.

горизонт		Агрегаты	размер (мм)								
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	<0.25
агросерая типичная	Р	естественные	0.05	0.07	0.10	0.14	0.13	0.20	0.16	0.09	0.07
		водоустойчивые			— 0.05	— 0.09	— 0.11	— 0.16	— 0.09	— 0.09	— 0.41
	BEL	естественные	0.24	0.15	0.15	0.13	0.10	0.09	0.05	0.03	0.06
		водоустойчивые			— 0.37	— 0.16	— 0.11	— 0.12	— 0.05	— 0.03	— 0.15
	BT	естественные	0.28	0.19	0.17	0.14	0.09	0.07	0.03	0.01	0.01
		водоустойчивые			— 0.45	— 0.16	— 0.09	— 0.07	— 0.03	— 0.03	— 0.17
агрозём языковатый	Р	естественные	0.15	0.11	0.12	0.14	0.12	0.15	0.12	0.05	0.05
		водоустойчивые			— 0.12	— 0.15	— 0.12	— 0.17	— 0.10	— 0.06	— 0.29
	BTy	естественные	0.06	0.13	0.24	0.24	0.14	0.10	0.05	0.02	0.03
		водоустойчивые			— 0.40	— 0.25	— 0.10	— 0.10	— 0.05	— 0.04	— 0.07
агросерая глееватая	Р	естественные	0.28	0.10	0.10	0.11	0.10	0.12	0.08	0.04	0.05
		водоустойчивые			— 0.11	— 0.05	— 0.13	— 0.07	— 0.09	— 0.12	— 0.43
	BELg	естественные	0.20	0.14	0.16	0.15	0.11	0.10	0.05	0.03	0.06
		водоустойчивые			— 0.30	— 0.15	— 0.10	— 0.09	— 0.05	— 0.06	— 0.23
	BTg	естественные	0.48	0.16	0.13	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02
		водоустойчивые			— 0.60	— 0.14	— 0.06	— 0.05	— 0.03	— 0.03	— 0.10

Приложение 5. Количество разбрызганного материала при разных скоростях капель.

№	V, м/с						
	2.57	2.56	2.54	2.51	2.43	2.26	1.97
	Mi, кг/м²*с						
Отв/ПШ	0.0007	0.0005	0.0004	0.0001	0.0001	0.00004	0.00
Отв/ПШ	0.0005	0.0004	0.0007	0.0003	0.00004	0.00002	0.00001
Отв/ЗП	0.0018	0.0013	0.0015	0.0008	0.0003	0.00004	0.00006
Отв/ЗП	0.0017	0.0013	0.0007	0.0003	0.0002	0.00004	0.00002
Отв/ЧП	0.0012	0.0011	0.0004	0.0004	0.0002	0.00006	0.00002
Отв/ЧП	0.0012	0.0009	0.0007	0.0003	0.0001	0.00005	0.00
Э/ПШ	0.0008	0.0002	0.0006	0.0003	0.0002	0.00005	0.00004
Э/ПШ	0.0006	0.0006	0.0007	0.0002	0.0001	0.00009	0.00001
Э/ЗП	0.0016	0.0013	0.0009	0.0003	0.0004	0.00012	0.00006
Э/ЗП	0.0015	0.0010	0.0008	0.0002	0.0002	0.00003	0.00001
Э/ЧП	0.0013	0.0011	0.0008	0.0007	0.0004	0.00005	0.00004
Э/ЧП	0.0013	0.0009	0.0006	0.0006	0.0001	0.00002	0.00
Я/ПШ	0.0011	0.0006	0.0003	0.0003	0.0002	0.00005	0.00
Я/ПШ	0.0010	0.0002	0.0004	0.0002	0.0001	0.00004	0.00001
Я/ЗП	0.0013	0.0011	0.0012	0.0008	0.0003	0.00013	0.00003
Я/ЗП	0.0013	0.0016	0.0010	0.0007	0.0002	0.00002	0.00001
Я/ЧП	0.0010	0.0010	0.0008	0.0002	0.0002	0.00005	0.00001
Я/ЧП	0.0011	0.0011	0.0009	0.0004	0.0003	0.00011	0.00001
П/ПШ	0.0007	0.0008	0.0008	0.0006	0.0001	0.00013	0.00001
П/ПШ	0.0007	0.0009	0.0003	0.0003	0.0001	0.00004	0.00004
П/ЗП	0.0016	0.0018	0.0013	0.0003	0.0004	0.00008	0.00003
П/ЗП	0.0014	0.0011	0.0009	0.0004	0.0003	0.00004	0.00
П/ЧП	0.0010	0.0011	0.0004	0.0006	0.0004	0.00008	0.00017
П/ЧП	0.0010	0.0011	0.0011	0.0002	0.0000	0.00001	0.00003
Мср	0.0011	0.0009	0.0008	0.0004	0.0002	0.00006	0.00003
Смсл	0.00007	0.00008	0.00006	0.00004	0.00002	0.00001	0.00001
Смприб	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Смполн	0.00009	0.00009	0.00008	0.00007	0.00006	0.00005	0.00005