

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I»

На правах рукописи



Дворникова Ангелина Владимировна
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ
ПОЧВЕННО-ПОГЛОЩАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ЧЕРНОЗЕМА
ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ АГРОХИМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В
ЛЕСОСТЕПИ ЦЧР

Специальность 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин
растений

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:
Кандидат сельскохозяйственных наук
Гасанова Елена Сергеевна

Воронеж – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЧВЕННО-ПОГЛОЩАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ АГРОЦЕНОЗА	11
1.1. Почвенный поглощающий комплекс	11
1.2. Почвенные коллоиды	12
1.2.1. Строение коллоидов	13
1.2.2. Агрофизическое состояние почвенных коллоидов	15
1.3. Показатели, характеризующие почвенно-поглощающий комплекс	17
1.4. Физико-химическая поглотительная способность почв – главный вид поглотительной способности черноземов	19
1.5. Влияние ППК на основные характеристики почв.	30
1.6. Современное состояние черноземов Воронежской области	32
2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	38
2.1. Оценка показателей окружающей среды при формировании почв агроценоза	38
2.1.1. Климат	38
2.1.2. Почвообразующие породы	44
2.1.3. Рельеф	45
2.1.4. Растительность	45
2.2. Объект исследования	46
2.3. Методы исследования	49
3. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЧВ	50
3.1. Удельная поверхность вариантов опыта	57
4. ТРАНСФОРМАЦИЯ ППК ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕГО СТАЦИОНАРНОГО ОПЫТА	61
4.1. Физико-химические параметры	61
4.2. Агрохимические параметры	89
4.3. Биологические показатели	93
5. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА	

ПОГЛОТИТЕЛЬНУЮ И БУФЕРНУЮ СПОСОБНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО	118
5.1. Поглотительная способность.....	118
5.2. Буферная способность	122
6. ОЦЕНКА АГРОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ МНОГОЛЕТНЕМ ВЛИЯНИИ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТАТА	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	147
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	148
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	180
Приложение А	181
Приложение Б	182
Приложение В.....	183
Приложение Г	184
Приложение Д.....	185
Приложение Е	186
Приложение Ж.....	187
Приложение З	188
Приложение И	189
Приложение К.....	190
Приложение Л.....	191
Приложение М.....	192
Приложение Н	193
Приложение О	194
Приложение П	195
Приложение Р	196

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях интенсивного ведения сельскохозяйственного производства, ориентированного в первую очередь на получение высоких урожаев, наша страна сталкивается с серьезными экологическими и социальными вызовами. Поскольку почва является основным ресурсом для сельского хозяйства и окружающей среды в целом, ее деградация может иметь разрушительные последствия для продовольственной безопасности, экологии и здоровья населения [85, 137, 206]. Деградация почв в России является сложной проблемой, которая требует комплексного подхода для ее решения. В первую очередь, это разработка и внедрение национальных программ и стратегий, направленных на охрану и восстановление почв.

Одной из причин деградации почв является их подкисление. По данным аналитической записки РАН, из-за повышенной кислотности почв в РФ ежегодно недобирается продукции растениеводства, эквивалентной 16–18 млн т зерна. За последние 20 лет площадь кислых почв в ЦЧР возросла с 51 до 58% [66]. С подкислением почв тесно связан процесс дегумификации – снижение содержания гумуса в почве, которое может происходить из-за различных причин, таких как недостаточное поступление органического вещества, чрезмерная обработка почвы, избыточное применение минеральных удобрений и пестицидов [8, 54]. По данным РАН, ежегодное сокращение гумуса на пашне в среднем составляет 0,62 т/га [66]. Дегумификация приводит к ухудшению структуры почвы, снижению плодородия, уменьшению способности почвы к удержанию влаги и многим другим негативным проблемам, которые отрицательно влияют на урожайность и экологическое состояние земельных угодий. Указанные процессы связаны прежде всего с состоянием почвенно-поглощающего комплекса [137, 149].

Гарантом устойчивого функционирования окружающей среды является ее способность поддерживать постоянство всех процессов и режимов, т. е. гомеостаз. Поддержание гомеостаза – неперенное условие существования всех уровней организации жизни, начиная от клеточного уровня и заканчивая

целыми экосистемами [61, 208]. Стабильность почвенного плодородия определяется ее физико-химическими свойствами, параметрами органического вещества, а также ее буферностью и поглотительной способностью [144].

Исследования поглотительной способности почв являются актуальной теоретической и практической основами для агрохимических исследований и для разработки устойчивых методов земледелия, способных обеспечить высокую урожайность при минимальном воздействии на окружающую среду. Исследования относятся к приоритетным направлениям научно-технологического развития «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов», утвержденные указом Президента РФ от 18.06.2024 г. № 529 "Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоёмких технологий".

Степень разработанности темы: Основы учения о ППК заложены работами К. К. Гедройца (1922,1975), И. Н. Антипова-Каратаева (1933), Н. И. Горбунова (1967), разработавших методы определения его состава и ёмкости [41,44,131,159]. Влияние удобрений и мелиорантов на ППК изучали В. Г. Минеев, Д. С. Орлов и др. (1978, 1985, 2004) однако их исследования касались преимущественно подзолистых почв [24, 69]. Согласно анализу отечественной литературы последнего десятилетия, исследуемая проблема остаётся актуальной и обладает значительной научной проработанностью. Многочисленные исследования К. Е. Стекольниковой (2023), О. А. Минаковой (2025), В. И. Титовой (2021), Т. А. Девятовой (2020), А.Г. Ступакова (2024) и других ученых единообразно констатируют, что длительное, особенно одностороннее, применение минеральных удобрений без органической компенсации является ключевым фактором деградации: оно вызывает устойчивое подкисление (снижение pH_{KCl} на 0,5–1,5 ед.) и прогрессирующую минерализацию гумуса (потери 0,2–0,5% за 10–15 лет) [14, 52, 111, 153, 156]. Кроме прямого влияния на кислотность, системы удобрений способны изменять физико-химические свойства почвы на более глубоком уровне: влиять на гранулометрический

состав, вызывать качественную трансформацию гумусовых кислот и фракционного состава органического вещества, что в итоге сказывается на поглощательной и буферной способностях почвы [173, 178].

Цель исследований: дать научно-практическое обоснование трансформации почвенно-поглощающего комплекса чернозема выщелоченного при агрохимическом воздействии в многолетнем опыте лесостепи ЦЧР.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи.

Задачи исследований:

1. Установить влияние многолетнего внесения навоза, минеральных удобрений и дефеката на гранулометрический состав чернозема выщелоченного в многолетнем стационарном опыте лесостепи ЦЧР.
2. Выявить влияние различных систем удобрения и дефеката на трансформацию ППК чернозема выщелоченного в условиях лесостепи ЦЧР.
3. Исследовать влияние систем удобрения и дефеката на состояние почвенного органического вещества чернозема выщелоченного.
4. Оценить влияние систем удобрения и дефеката на поглощательную и буферную способности чернозема выщелоченного.

Научная новизна работы. Впервые в условиях лесостепной зоны ЦЧР проведены комплексные исследования по определению влияния различных систем удобрения на состояние почвенно-поглощающего комплекса чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта. Выявлены взаимосвязи между отдельными показателями почвенного плодородия и поглощательной способностью почв. Установлено, что основной вектор агрогенной трансформации, особенно под влиянием высоких доз минеральных удобрений, заключается в обеднении верхнепахотного слоя ценными тонкодисперсными фракциями и их перераспределением вниз по профилю с формированием иллювиальных горизонтов. Выявлено, что известкование дефекатом в комплексе с органо-минеральными удобрениями способствует сохранности гумусовых веществ в почве, формирует наибольшую буферную устойчивость к подкислению, противодействует снижению предельной сорбции ионов

водорода.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость заключается в научном обосновании проведения приемов мелиорации дефектом при трансформации компонентов ППК при агрохимическом воздействии в условиях лесостепи ЦЧР. Доказано влияние последствия дефекта на стабилизацию агрохимических, физико-химических и биологических параметров. Получено уравнение зависимости емкости катионного обмена от основных показателей почвенного плодородия $EKO = 8,917 - 1,52pH + 0,99S + 0,47ПОВ$. На основании проведенных исследований обосновано ухудшение физико-химических свойств чернозема выщелоченного при внесении минеральных удобрений без известкования. Полученные результаты могут являться научной основой для комплексного решения проблемы деградации черноземов, связанной с подкислением и дегумификацией, и могут быть рекомендованы производству.

Практически доказана необходимость проведения комплексных мер, направленных на противодействие деградационным процессам черноземных почв лесостепи ЦЧР приемами мелиорации дефектом. Установлена и обоснована целесообразность внесения дефекта в дозе, рассчитанной по величине гидролитической кислотности в органо-минеральной системе удобрений. Выявлено изменение гранулометрического состава, количества и качества почвенного органического вещества, поглонительной и буферной способностей чернозема выщелоченного под влиянием применения органических и минеральных удобрений, а также дефекта. В практику аграрного производства рекомендуется внесение дефекта в полной дозе, рассчитанной по величине гидролитической кислотности, один раз в 2 ротации севооборота.

Объект и предмет исследований. Объектом исследования являлся почвенно-поглощающий комплекс чернозема выщелоченного малогумусного среднемощного тяжелосуглинистого на покровных суглинках стационарного опыта кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ им. императора Петра I, расположенного в лесостепи ЦЧЗ.

Предметом исследования являлось воздействие минеральных и органических удобрений, а также кальциевого мелиоранта – дефеката.

Методология и методы исследований. Методология исследования основана на системном подходе, учитывающем публикации отечественных и зарубежных учёных, и включает комплекс методов, в т.ч общепринятых и ГОС-Тированных методик, включающих: почвенное обследование, лабораторные анализы и статистическую обработку данных с помощью Microsoft Excel, а также цифровое и текстовое представление результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Длительное применение агрохимикатов приводит к обеднению пахотного слоя чернозема выщелоченного лессовой фракцией на 14–23% относительно целины, что свидетельствует о проявлении лессиважа, или внутрипочвенного оглинивания. Длительное применение минеральных удобрений без сопутствующего известкования обуславливает подкисление на 0,2–0,5 ед. рН, повышение гидролитической кислотности на 0,7–1,57 мг-экв/100 г почвы относительно контроля, снижение суммы обменных оснований на 1,57–2,83 мг-экв/100 г почвы, степени насыщенности основаниями на 2,35–6,07%.

2. При применении минеральных удобрений увеличивается доля подвижного гумуса на 23,5% относительно контроля. Изменяется тип гумуса с гуматного на фульватно-гуматный, что повышает вероятность потери его в пахотном горизонте за счет нисходящей миграции по почвенному профилю. Высокие дозы минеральных удобрений приводят к структурной деградации гумусовых кислот. Известкование способствует стабилизации гумусного состояния и накоплению зрелых молекул ГК и ФК с развитыми алифатическими структурами.

3. Показатели катионного обмена и буферной способности почв изменяются в зависимости от использованных систем удобрений и дефеката. Максимальные показатели предельной сорбции характерны для известкованных вариантов (33–37 моль/100 г), что на 32–48% выше относительно контроля. Применение минеральных удобрений на органическом фоне снижает буферную

способность к подщелачиванию и увеличивает к подкислению, при этом наибольшая буферная устойчивость к подкислению отмечается на вариантах с применением дефеката по фону навоза.

4. Применение удобрений и дефеката способствует снижению энергетических характеристик почвенного органического вещества относительно целины. Показатель устойчивости плодородия почв максимален на варианте с комплексным внесением минеральных и органических удобрений по известкованному фону (7,33), минимален на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений (3,76). Максимальная прибавка урожая озимой пшеницы получена в варианте с совместным применением удобрений и дефеката, где зерновые единицы возрастали на 12,5% по предшественнику вико-овес и на 16,4% по чистому пару относительно контроля.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследования и основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-практических конференциях различного уровня: международной молодежной научной школе «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (Ростов-на-Дону, 2022 г.); международной научно-практической конференции «Приоритеты развития АПК в условиях цифровизации и структурных изменений национальной экономики» (Санкт-Петербург, 2022 г.); XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной памяти Р.Г. Гареева (Казань, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 140-летию классического труда В.В. Докучаева "Русский чернозем" (Каменная Степь, 2023 г.); Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященная памяти д.б.н., профессора И. Д. Комиссарова в честь 95-летия со дня рождения (Тюмень, 2024 г.); всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 160-летию со дня рождения Д.Н. Прянишникова (Калуга, 2025 г.) а также на ежегодных научно-практических конференциях регионального и международного уровней Воронежского ГАУ и ряде

других научных мероприятий.

Производственной проверкой, проведенной в Эртильском филиале ООО «АК Воронеж» на площади 123,8 га, подтверждена эффективность комплексного применения минеральных удобрений $N_{60}P_{60}K_{60}$, 40 т/га навоза и 6 т/га донного ила (доза, рассчитанная по величине гидролитической кислотности) под посев озимой пшеницы, которое способствовало изменению обменной кислотности почвы с pH 5,2 до 5,9 (переход из класса среднекислых почв в близкие к нейтральной) и обеспечило прибавку урожайности 0,8 т/га, а также рост чистого дохода на 279 тыс. руб. при высоком уровне рентабельности.

Публикация результатов исследований. Основные результаты диссертационного исследования нашли отражение в 19 печатных работах, в том числе 3 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад автора: Автор участвовал на всех этапах исследования: в планировании и проведении экспериментов, обобщении литературных данных, анализе и обработке результатов собственных исследований (включая полевые работы, отбор и анализ почвенных образцов), систематизации полученных данных, а также в подготовке научных публикаций и оформлении диссертационной работы. Личный вклад автора составил более 85%.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, и списка литературы. Список литературы включает 227 источников, из них 44 – на иностранном языке. Диссертация изложена на 196 страницах компьютерного текста. Содержит 19 таблиц, 66 рисунков и 16 приложений.

1. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЧВЕННО-ПОГЛОЩАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ АГРОЦЕНОЗА

1.1. Почвенный поглощающий комплекс

Почвенно-поглощающий комплекс является материальным носителем поглотительной способности почв. Понятие почвенно-поглощающий комплекс (ППК) впервые сформулировал К. К. Гедройц [41]. ППК – совокупность нерастворимых в воде высокодисперсных твердых частиц, обладающих высокой реакционной и ионообменной способностью. Способность к поглощению катионов из растворов характерна для предколлоидных (размером 0,001–0,0001 мм) и особенно коллоидных (менее 0,0001 мм) фракций [213].

Вещественный состав ППК наследуется от материнской породы с её гранулометрическими, минералогическими и химическими особенностями. Он приобретает свои специфические характеристики в процессе почвообразования за счет трансформации и взаимодействия минеральных компонентов с гумусовыми веществами и их органоминеральными производными, что существенно влияет на поверхностные свойства тонкодисперсных частиц [43].

Основу минеральной части ППК формируют разнообразные глинистые минералы (монтмориллонит, гидрослюды, вермикулит, хлорит, смешанослойные), а также аморфные компоненты - аллофаны, цеолиты и соединения алюминия, железа и кремния.

Органическую часть ППК образуют преимущественно специфические гумусовые вещества: гуминовые и фульвокислоты, а также гумин [40].

Химическая гетерогенность и многокомпонентный состав ППК обуславливают наличие на поверхности почвенных частиц разнообразных функциональных групп. Именно эти группы, обладающие разным составом и свойствами, ответственны за протекание адсорбционных и ионообменных процессов.

ППК состоит из частиц разных размеров, но наиболее важная роль в его образовании принадлежит коллоидам почвы [186].

1.2. Почвенные коллоиды

Почвенные коллоиды – органические и минеральные частицы размером менее 0,0001 мм, которые являются наиболее химически активным компонентом почвы и во многом именно они определяют физико-химические свойства почвы [124]. Они формируются в результате выветривания и почвообразования путем дробления крупных частиц и также за счет конденсации (соединения) молекул и ионов. Содержание коллоидов в почве различно – от 1–2 до 30–40% от массы почвы и зависит от содержания гумуса и гранулометрического состава [5, 41].

Почвенные коллоиды классифицируются на три основные группы в зависимости от типа связей и образующихся соединений: минеральные (глинистые), органические (гумусовые вещества) и органо-минеральные (сочетания гумусовых веществ с глинистыми минералами и полуторными оксидами в осажденной форме) [44].

Фракции почвенного коллоидного комплекса проявляют характерные свойства коллоидных систем, такие как адсорбция, эффект Тиндаля, броуновское движение и электрофорез [185].

Минеральные (глинистые) коллоиды – преимущественно пластинчатые частицы с высокой удельной поверхностью, способные удерживать воду и катионы. Их подразделяют на кристаллические (с упорядоченной решёткой) и аморфные (например, аллофан) силикатные глины, а также несиликатные формы (оксиды железа и алюминия). Чем мельче частицы, тем выше их гигроскопичность [4, 115].

Органические коллоиды (гумус) образуются в процессе разложения растительных и животных остатков и состоят из сложных аморфных соединений (полисахаридов, липопротеинов и др.). Они несут рН-зависимый отрицательный заряд благодаря карбоксильным и фенольным группам, обладают исключительной сорбционной способностью и высокой влагоёмкостью, но лишены пластичности, характерной для глин [6, 8, 144]. Их заряд и активность максимальны в нейтрально-щелочных условиях.

Ключевыми характеристиками почвенных коллоидов выступают их форма, площадь поверхности, пластичность, связность (когезия), способность к набуханию и усадке, а также процессы диспергирования и флокуляции. Данные свойства представляют собой поверхностные явления интенсивность которых определяется как количеством, так и спецификой взаимодействий [122, 185].

Свойства почвенных коллоидов определяются их ультрамелким размером ($<0,0001$ мм) и электрическим зарядом. Они образуют полидисперсную систему с широким разнообразием форм, плотности и химического состава [178]. Минералогия частиц влияет как на их морфологию (от кристаллической до аморфной) [43], так и на удельную поверхность, которая особенно велика у слоистых минералов вроде вермикулитов и смектитов [123].

Высокая химическая активность почвенных коллоидов обусловлена их обширной удельной поверхностью и электрическим зарядом. Преобладающий отрицательный заряд обеспечивает притяжение и удержание катионов, формируя ионообменную ёмкость почвы [76]. Заряд может быть постоянным (из-за изоморфного замещения в кристаллической решётке) или переменным (рН-зависимым, характерным для каолинита и оксидов металлов). Именно эта двойственность определяет сорбционные свойства коллоидов и в итоге уровень почвенного плодородия [227].

1.2.1. Строение коллоидов

На рис. 1 показано строение почвенной мицеллы. Её основу составляет ядро, окружённое потенциалопределяющим ионным слоем. Вместе они образуют гранулу. Заряд гранулы компенсируется противоположно заряженными ионами из раствора, формирующими диффузный слой. Вся структура – гранула с диффузным слоем – называется мицеллой. Мицелла электронейтральна в целом, заряд гранулы определяет свойства коллоида [89].

Главным свойством таких коллоидов является ионообмен — способность замещать ионы в своём диффузном слое на ионы из окружающего раствора.

Это позволяет устойчивым коллоидам мигрировать, способствуя образованию элювиальных и иллювиальных горизонтов, в то время как нестабильные коллоиды быстро осаждаются [13, 91].

1.2.2. Агрофизическое состояние почвенных коллоидов

В почве коллоидные частицы в основном существуют в форме гелей, где они соединены между собой, формируя трёхмерную структуру, удерживающую воду. При достаточном увлажнении небольшая часть коллоидов может переходить в состояние золя, где частицы диспергированы в водной среде [86, 202]. Такое раздельное существование обусловлено наличием электрокинетического потенциала и гидратной оболочки на поверхности каждой частицы. Одноименно заряженные частицы отталкиваются, оставаясь в суспензии и не образуя осадка [223, 226].

Согласно представлениям Г. Н. Федотова, выявлено формирование сетчатых гелеобразных образований и других коллоидных конфигураций, возникающих при взаимодействии коллоидных частиц. Особенности коллоидной структуры определяют структуру почвы – важнейшее агрономическое свойство [164, 165]

Когда электрокинетический потенциал снижается, и заряд частиц уменьшается, разноимённо заряженные коллоиды, сталкиваясь из-за хаотического движения, слипаются, увеличиваются в размере и осаждаются.

В зависимости от степени гидратации, почвенные коллоиды разделяют на гидрофильные и гидрофобные. Водные плёнки у гидрофильных частиц (монтмориллонит) стабилизируют систему, а слабая гидратация гидрофобных (каолинит) способствует коагуляции [184].

Важнейшими природными амфифильными коллоидами являются гуминовые кислоты. Их уникальная структура сочетает гидрофильные функциональные группы и гидрофобные области, что позволяет им выступать в роли поверхностно-активных веществ и связывать разнообразные соединения, включая загрязнители [91].

На состояние почвенных коллоидов влияют различные факторы: циклы высыхания и увлажнения, колебания температуры, изменения кислотности и другие процессы. Под их влиянием происходят трансформации органических и минеральных коллоидов, которые формируются в результате выветривания и почвообразования [143, 185, 200].

Состояние коллоидов зависит от состава поглощённых катионов. Ионы с большей валентностью слабее диссоциируют, снижая электрокинетический потенциал и облегчая коагуляцию.

Кислотность почвы также влияет на коллоиды: кислая среда растворяет некоторые минеральные коллоиды (например, $\text{Al}(\text{OH})_3$), а щелочная способствует осаждению оксидов и пептизации органических соединений [147, 189].

Часть коллоидов свободно диспергирована в почвенном растворе, а часть образует адгезионные плёнки на более крупных частицах. Циклы увлажнения и высыхания вызывают дегидратацию коллоидов, что приводит к закреплению гумусовых кислот и их солей на поверхности минеральных коллоидных частиц [203].

Старение коллоидов представляет собой постепенную потерю их поверхностной активности. Химическая основа при этом обычно сохраняется, однако функциональные свойства ухудшаются: снижается гидрофильность, ослабевает сорбционная способность и взаимодействие с окружающей средой, возможно частичное упорядочение структуры [60, 223]. Основными факторами старения выступают окислительные процессы (например, переход $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$) и воздействие ультрафиолетового излучения, которое значительно ускоряет эти изменения [210].

Особенности строения и ключевые характеристики почвенных коллоидов (дзета-потенциал, коэффициент фильтрации, удельная электропроводность, средний радиус пор) формируются под влиянием типа почвообразования и агротехнологий. Эти параметры, в свою очередь, напрямую определяют фундаментальные агрохимические свойства почвы: её кислотность, ёмкость катионного обмена (ЕКО) и поглонительную способность [130, 137, 196].

Через них коллоидная система регулирует водный и питательный режимы, что, в конечном счёте, и формирует общий уровень почвенного плодородия. Так, в работе сотрудников РГАУ-МСХА установлено, что в подзолистых почвах, характеризующихся малым содержанием коллоидов и их нестабильным состоянием, а также низким дзета-потенциалом из-за присутствия ионов водорода и алюминия в почвенном растворе, наблюдаются ограниченная емкость катионного обмена и низкая адсорбционная способность почвенного поглощающего комплекса [72].

Таким образом, коллоиды почвы обладают такими свойствами, как большая площадь удельной поверхности, электрический заряд поверхности и адсорбционные способности, которые имеют решающее значение для обмена питательными веществами и удержания воды. Другими ключевыми свойствами являются когезия, адгезия, пластичность, а также набухание/усадка, при этом они также подвержены броуновскому движению и эффекту Тиндаля. Эти свойства определяют важнейший показатель почвенного плодородия – поглотельную способность почв – фундаментальное физико-химическое свойство, характеризующее способность почвы удерживать и обменивать различные вещества (ионы, воду, газы, твердые частицы) из почвенного раствора и контактирующей с ней среды.

1.3. Показатели, характеризующие почвенно-поглощающий комплекс

Интенсивность сорбционных процессов, происходящих в почве, можно охарактеризовать емкостью поглощения. Это максимальное количество вещества, удерживаемое почвой. Для этой оценки используется показатель емкости катионного обмена (ЕКО) – это количество катионов в почве, способных к реакции ионного обмена с почвенным раствором. Значение ЕКО колеблется в пределах от 3 до 70 мг-экв/100 г и зависит от гранулометрического и минералогического состава почвы, а также от содержания почвенного органического вещества и реакции среды почвенного раствора [75, 181].

Катионы кальция, магния, водорода и алюминия участвуют в

формировании почвенной структуры, определяют водный режим и физико-механические свойства почвы, а также влияют на поверхностные свойства почвенных агрегатов [148]. Количественное соотношение обменных катионов является важнейшей характеристикой почвенного плодородия.

Общее количество поглощенных катионов, за исключением ионов водорода и алюминия, называется суммой обменных оснований. В зависимости от содержания обменных катионов почвы могут быть насыщенными и ненасыщенными основаниями.

Для сравнительной оценки используется показатель степень насыщенности основаниями (V), отражающий долю оснований в общей ёмкости катионного обмена [28]. Степень насыщенности почв основаниями для черноземов очень высокая, обычно составляющая 70–100%. Для получения высоких урожаев сахарной свеклы оптимальная степень насыщенности почв основаниями должна составлять более 80–90% [177].

Состав обменных катионов оказывает комплексное влияние на почву: он определяет её физические свойства (например, натрий ухудшает структуру и фильтрацию), формирует органо-минеральные связи (кальций и алюминий стабилизируют гумус, а калий и натрий могут способствовать его вымыванию) [173, 201, 226], регулирует кислотность и буферность, а также служит непосредственным источником элементов питания для растений, где идеальное соотношение катионов варьируется в зависимости от почвенных условий и потребностей конкретных культур [171].

Виды поглотительной способности почв

Изучение поглотительной способности почв в России было начато А. Н. Сабаниным и получило развитие в работах К. К. Гедройца [41], который систематизировал знания, выделив пять основных её видов: механическую, физическую, физико-химическую (обменную), химическую и биологическую [131, 165]. Из современных литературных источников наиболее подробно данный раздел изложен в учебном пособии Т. А. Соколовой [147].

Механическая поглощательная способность обусловлена присутствием сложной системы пор, капилляров и корневых проходов в почве, в результате чего почвы способны задерживать взвешенные частицы [2].

Физическая поглощательная способность почвы, чаще называемая физической адсорбцией или молекулярной поглощательной способностью, является фундаментальным свойством, описывающим способность почвы удерживать вещества за счет сил межмолекулярного взаимодействия (сил Ван-дер-Ваальса). Это свойство обусловлено большой удельной поверхностью почвенных частиц, особенно коллоидной фракции [132, 210].

Физико-химическая (ионообменная) сорбция подразумевает способность почвы обменивать ионы в коллоидном компенсирующем слое на эквивалентное количество ионов в почвенном растворе. Существенную роль в физико-химической поглощательной способности играет ППК [182].

Химическая поглощательная способность почв (также известная как хемосорбция) – это способность почвы необратимо связывать ионы или молекулы из почвенного раствора с образованием новых, труднорастворимых химических соединений или комплексов, которые выпадают в осадок и входят в состав твердой фазы почвы. Детально процесс хемосорбции на примере закрепления фосфатов на оксидах железа в почве представлен в работе [212].

Биологическая поглощательная способность определяет процессы накопления основных биогенных элементов, в первую очередь азота. На почвах легкого гранулометрического состава данный вид поглощательной способности играет важнейшую роль [137].

1.4. Физико-химическая поглощательная способность почв – главный вид поглощательной способности черноземов

Для сохранения почвенного плодородия, в том числе для дезактивации тяжелых металлов и экологических поллютантов особое значение имеет ионообменная поглощательная способность (ИОПС), которая характеризуется показателем ЕКО [170, 204]. Она определяет поглощение биофильных ионов

кальция, магния, калия и аммония, предотвращая их потери в результате вымывания [193, 226].

Состав ППК напрямую определяет кислотность или щелочность почвы и ее буферные свойства (способность противостоять резким изменениям pH при внесении удобрений или кислотных осадков). Стабильный pH критически важен для оптимального развития растений и активности почвенной микрофлоры [214, 217, 218].

ИОПС играет ключевую роль в связывании и иммобилизации катионов тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cr и др.) и радионуклидов, выступая в качестве естественного геохимического барьера [4, 187]. Чем выше ИОПС, тем прочнее удерживаются эти токсичные элементы, снижая риск их миграции в грунтовые воды и перехода в пищевые цепи [224].

Состав и состояние ППК определяют физические характеристики почвы, такие как структурность, плотность, водо- и воздухопроницаемость, влагоемкость. Эти свойства, в свою очередь, влияют на эффективность ирригации, обработку почвы и общее здоровье почвенной экосистемы [11, 155, 183, 199].

В настоящее время ИОПС используется для прогнозирования поведения различных веществ (включая пестициды и промышленные химикаты) в почвенном профиле и ландшафте. Это позволяет разрабатывать стратегии предотвращения загрязнения окружающей среды [182, 190].

В современных научных статьях подчеркивается необходимость точной и зачастую неразрушающей оценки ИОПС. Разрабатываются и совершенствуются альтернативные и низкзатратные методы оценки, например, с использованием видимой и ближней инфракрасной спектроскопии (Vis-NIR) для быстрого и неразрушающего анализа в полевых условиях [98, 107].

Изучается динамика ИОПС под влиянием антропогенных и природных факторов, таких как пожары, различные системы землепользования или внесение ионообменных стабилизаторов для улучшения строительных свойств грунтов [10, 17]. Актуальны исследования влияния химических модификаций

природных сорбентов (например, цеолитов) на их ионообменные свойства для использования в водоочистке [27, 168].

Таким образом, изучение ИОПС остается краеугольным камнем в почвоведении и смежных науках, предоставляя фундаментальные данные для принятия обоснованных решений в сельском хозяйстве, экологии и охране водных ресурсов.

Исходя из фундаментальных принципов ионного обмена, процесс замещения катионов раствора катионами почвенно-поглощающего комплекса (ППК) можно разбить на пять стадий, следующих одна за другой: вытесняющий ион перемещается из основного объема раствора к границе раздела ППК → ион проникает внутрь твердой фазы ППК, двигаясь к месту, где происходит обмен → химическая реакция, в ходе которой происходит замена катионов → вытесненный ион начинает движение внутри твердой фазы от точки обмена к поверхности ППК → вытесненный ион перемещается от поверхности ППК обратно в раствор [147, 177].

В почве передвижение растворенных веществ происходит двумя путями: посредством обычной диффузии в жидкой фазе пор и путем перемещения в адсорбированном состоянии, обусловленном поверхностной диффузией [170].

Для математического описания катионного обмена широко применяются изотермы адсорбции Фрейндлиха и Ленгмюра, что позволяет интерпретировать данный процесс как особую форму адсорбции. Тем не менее, между этими явлениями существуют фундаментальные различия. Ключевые признаки истинного катионного обмена, согласно Гельфериху, включают: 1. Обратимость реакции; 2. Зависимость скорости от диффузии; 3. Соблюдение стехиометрических соотношений; 4. Проявление селективности к различным ионам [34, 222].

Основное отличие адсорбции от ионного обмена состоит в том, что обменные катионы представлены главным составляющим элементом ППК и могут быть лишь замещены другими типами катионов, однако не устранены

полностью. Стремление разделить почвенно-поглощающий комплекс на анионную и катионную части повлекло бы за собой несоблюдение закона электронейтральности. Напротив, поверхность адсорбента может быть полностью свободна от молекул адсорбата [208]. Суммарное содержание обменных катионов сохраняется неизменным, а количество адсорбированного вещества зависит от активности адсорбата в объеме фазы. Иначе говоря, адсорбент и адсорбат могут находиться по отдельности, а ППК – это единое целое.

Природные неорганические иониты

Многие неорганические соединения, такие как оксигидраты, силикаты и алюмосиликаты, обладают способностью к ионному обмену, составляя основу поглощающего комплекса почв. Однако их свойства существенно отличаются от синтетических органических ионитов. Особенности кристаллической структуры определяют три главных свойства: сниженную гидратацию (из-за жёсткой решётки), избирательную сорбцию по размеру ионов («эффект сита») и ограниченную обменную ёмкость с тенденцией к образованию прочных полимерных матриц, способных вызывать фазовые превращения [213]. Наиболее важными почвенными ионообменниками являются гидроксиды алюминия и железа, цеолиты, глинистые минералы и глаукониты.

Исходя из этих особенностей, природные неорганические ионообменники функционируют преимущественно как катиониты в широком интервале pH, тогда как способность к анионному обмену у них проявляется лишь в кислой среде. Хотя их обменная ёмкость уступает синтетическим аналогам, высокое естественное содержание в почве делает эти полиэлектролиты ключевыми агентами в регулировании ионного баланса. Кроме того, они отличаются высокой устойчивостью к механическим, термическим и радиационным воздействиям (особенно цеолиты) [169]. Благодаря этим свойствам их используют в сельском хозяйстве в качестве пролонгированных удобрений, мелиорантов, кормовых добавок и для других целей.

Органические ионообменники

Устойчивость экосистемы во многом определяется ключевыми параметрами почвы: её плодородием, буферностью, способностью обезвреживать загрязнители и трансформировать неорганические соединения [215]. Эти параметры напрямую зависят от содержания гумуса, а точнее от гуминовых веществ, представляющих собой наиболее активное химическое и биологическое вещество почвы [122, 139]. Скорость и направление процессов трансформации гуминовых веществ (их связывание и минерализация) контролируются гидротермическими условиями, растительным покровом и деятельностью почвенных микроорганизмов [195, 202, 203, 217].

Изучение химических процессов, относящихся к превращению органического вещества в почве, заслуживает внимания из-за отрицательного баланса гумуса на большей части пахотных земель. В условиях многофакторного стационарного опыта, в рамках которого в четырехпольном севообороте изучалось различное сочетание минеральных и органических удобрений и их доз, было установлено, что наибольшие потери гумуса в пахотном слое почвы за 8 ротаций зернопропашного севооборота (34 года) были на неудобренном контроле. Для обеспечения бездефицитного баланса гумуса предложено использование приемов биологизации земледелия (внесение навоза, заправка соломы, сидераты) на фоне высоких доз минеральных удобрений NPK (100) и NPK (350). Данный комплекс агротехнических приемов позволил увеличить массу растительных остатков с 4 до 11 т/га на фоне занятого пара, что привело к увеличению содержания гумуса с 4,2 до 4,38%. На фоне сидерального пара количество растительных остатков увеличилось с 6 до 18 т/га, а гумуса с 4,2 до 4,47% [55]. При использовании приемов биологизации учитываются содержание элементов минерального питания растений, а также положительное влияние внесения органических удобрений практически на все свойства и режимы почв и стимулирующее действие на рост и развитие растений [196].

Терминология, описывающая изменения почвенного органического вещества (ПОВ) до настоящего времени остается окончательно не определенной

и обсуждаемой в кругу ученых-почвоведов. Мы для характеристики этой важнейшей структурной компоненты почвы используем термин «гумус».

Основные причины потерь ПОВ включают биохимическую минерализацию и физические процессы: эрозию, технологический вынос и вымывание. Противоположными процессами являются гумусообразование, накопление гумуса (когда образование преобладает над разложением) и его поддержание (при балансе этих процессов). Особое значение имеет секвестирование углерода – изъятие CO_2 из атмосферы и связывание его в почве [54, 202, 204]. Конечная цель – депонирование, то есть долгосрочное (на столетия) сохранение стабилизированного ПОВ. Оценка успешности этих процессов основана на анализе изменения общих запасов и фракционного состава почвенного углерода.

Гумификация – ключевой глобальный процесс, связывающий живые организмы (биоценоз) с неживой средой. Гумус служит основным звеном в трофических цепях, и его дефицит способен нарушить экологическое равновесие [178].

Органическое вещество почвы определяет её устойчивость к отрицательным, в том числе антропогенным, воздействиям. К его главным функциям относятся: накопление энергии и питательных веществ, регулирование теплового и водного режимов, формирование почвенной структуры, биологическая защита и контроль миграции элементов в биосфере (рис.2) [143, 205, 206].

На фоне интенсивного сельскохозяйственного производства усиленная техногенная нагрузка на почву может привести к существенному изменению её свойств [48, 58, 145]. Вследствие применения минеральных удобрений происходит подкисление почвенного раствора, повышение гидролитической и обменной кислотности, а продолжительная эксплуатация земли без возмещения выноса биогенных элементов приводит к понижению эффективного плодородия и декарбонизации, вызывая изменения в особенностях гидратации и строении почвенных агрегатов [23, 129, 136].



Рисунок 2 – Взаимосвязь гумуса с основными свойствами почв

Данные, полученные в длительном стационарном опыте Воронежского ГАУ в 2014–2018 гг. показали, что применение минеральных удобрений вызывало подкисление почвы, снижая pH на 0,6–0,8 ед. и уменьшая содержание доступного кальция. Это также приводило к смещению состава гумуса в сторону менее стабильных фульвокислот. Наиболее благоприятные условия создавало совмещение органических удобрений (навоза) с дефекатом: такие варианты не только предотвращали подкисление, но и повышали содержание гумуса до +1% (~250 т/га) за счёт роста доли ценных гуминовых кислот, связанных с кальцием [24, 69, 70]. Внесение мелиорантов в почву также сказывается на составе и физико-химических свойствах почвы [180]. Так, согласно исследованиям В.Д. Муха, проведенным в полевом опыте на темно-серой лесной оподзоленной почве, установлено, что при внесении мелиоративной смеси на основе дефеката изменились показатели пахотного горизонта, понизился уровень обменной и гидролитической кислотности почвы (pH_{KCl} от 4,2 до 4,8; Hr

от 5,25 до 3,70 мг-экв/100 г почвы), увеличилось содержание обменно-поглощенного Ca^{2+} , стабилизировалось содержание гумуса [179]. Согласно результатам исследований сотрудников Белгородского НИИ сельского хозяйства в условиях длительного опыта по изучению влияния вида севооборотов, способа основной обработки почвы и уровня удобрённости на динамику почвенного поглощающего комплекса на черноземе типичном установлено, что применение минеральных удобрений в одинарной дозе почти не влияло на общее количество поглощенных оснований в обрабатываемом слое почвы, тогда как удвоенные дозы приводили к его сокращению. В слое 20–40 см снижение общего количества поглощенных оснований было заметно даже при внесении одинарной дозы NPK. Органические удобрения, такие как навоз, способствуют насыщению почвенного комплекса элементами, которые могут быть усвоены растениями, однако добавление к ним минеральных удобрений снижает этот эффект, особенно при использовании удвоенной дозы [14, 29, 74].

Почвенное органическое вещество представляет собой сложную и неоднородную систему. Это континуум разнообразных частиц и биомолекул – от частично до полностью трансформированных остатков организмов. Они различаются по размеру, химическому составу, возрасту, устойчивости к разложению и характеру химических связей. Их распределение в минеральной матрице почвы является объёмным и пространственно неоднородным [80, 134, 220].

Согласно современным представлениям, гумус – это подсистема почвы, состоящая из органических соединений растительного, животного и микробного происхождения, прошедших как гумификационные, так и иные стадии стабилизации [84].

Основным прорывом в химии гумуса стало изменение взгляда на его структуру. Согласно современной *супрамолекулярной концепции*, гуминовые вещества – это не макромолекулярные полимеры, а динамичные ассоциации относительно небольших молекул (производных лигнина, полисахаридов, алифатических соединений и др.). Эти «строительные блоки» удерживаются

вместе нековалентными силами: гидрофобными, ван-дер-ваальсовыми и π - π взаимодействиями. Их структура зависит от условий (например, pH): при нейтральных значениях они образуют мицеллоподобные ассоциации, а при подкислении усиливаются водородные связи, приводя к флокуляции [80, 188, 193].

Новая концепция открывает практические возможности для управления почвой: она позволяет стабилизировать углерод путём каталитического преобразования супрамолекулярных ассоциаций в устойчивые полимеры непосредственно в почве (что увеличивает связывание органического углерода, снижает эмиссию CO_2 и уменьшает эрозию), а также повышать плодородие за счёт высвобождения биоактивных гуминовых молекул, которые улучшают доступность питательных элементов для растений, тем самым увеличивая урожайность и эффективность использования удобрений [199, 216].

Существуют две конкурирующие модели ПОВ:

- Модель гуминового полимера (традиционная): ПОВ - результат вторичного синтеза с образованием уникальных макромолекул [51].
- Супрамолекулярная модель (современная): ПОВ - агрегат продуктов частичного разложения биополимеров [210].

Большинство современных данных свидетельствует в пользу супрамолекулярной модели. При этом в самой почве ПОВ неоднородно и существует в нескольких «отсеках»: частично разложившиеся растительные остатки, биомасса микробов, органические покрытия на минералах, пирогенный углерод и растворенное органическое вещество (РОВ). Каждый пул обладает разными свойствами [210, 216].

ПОВ выполняет множество ключевых функций: формирует плодородие и структуру почвы, удерживает влагу и является крупнейшим резервуаром углерода в наземных экосистемах [178, 189].

Из-за своей сложности ПОВ классифицируют по различным признакам: доступности для микроорганизмов (лабильное и стабильное), времени оборота (молодое и старое), степени защищенности (защищенное и свободное). Одна

из таких классификационных схем представлена на рисунке 3.

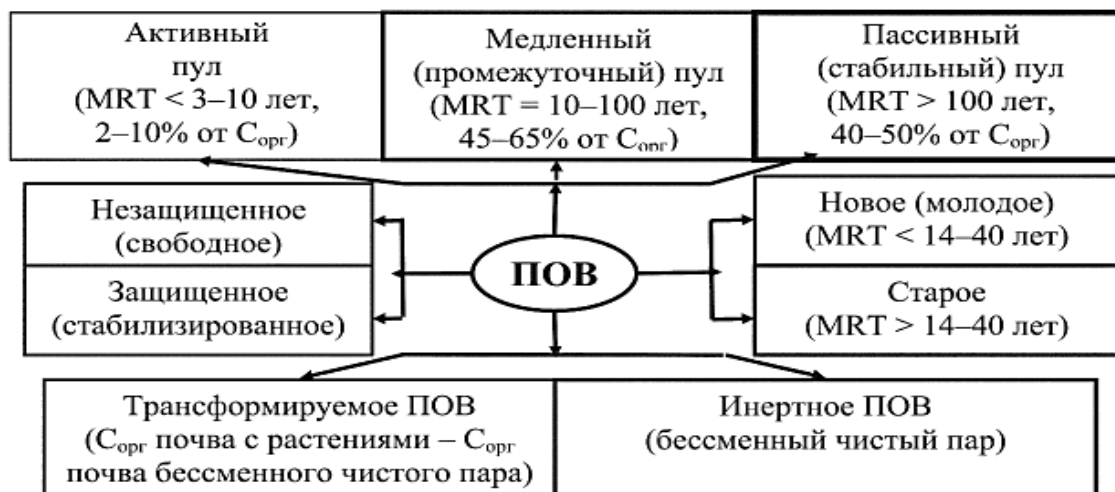


Рисунок 3 – Классификация почвенного органического вещества

Таким образом, ПОВ представляет собой чрезвычайно сложную и гетерогенную систему. Отказ от модели единого полимера в пользу концепции супрамолекулярных ассоциаций, варьирующих в разных почвенных «отсеках», позволяет глубже понять его природу и разработать инновационные методы управления углеродным циклом и плодородием почв.

Органоминеральное взаимодействие гуминовых веществ

Формирование и стабилизация гумуса в почве происходят в результате его взаимодействия с минеральной матрицей - частицами глинистых силикатов и оксидов железа и алюминия (рис.4). Благодаря большой удельной поверхности и заряду минералы, выступают активными сорбентами. Связь между гумусовыми кислотами и минералами осуществляется через ионы-«мостики» (Fe^{3+} , Al^{3+}), которые одновременно взаимодействуют с анионными группами гумусовых кислот и поверхностью минералов [160, 221]. Образующиеся органоминеральные комплексы устойчивы к микробному разложению, обеспечивая долговременное накопление органического вещества в почве [205]. Некоторые исследователи [140, 216, 218] объясняют формирование или стабилизацию координационных гуминовых полимеров посредством синтеза адсорбционных органоминеральных комплексов. Этот процесс включает полимеризацию растворимых веществ на минеральных поверхностях почвы,

катализируемую иммобилизованными оксидазами (гетерогенный биокатализ).

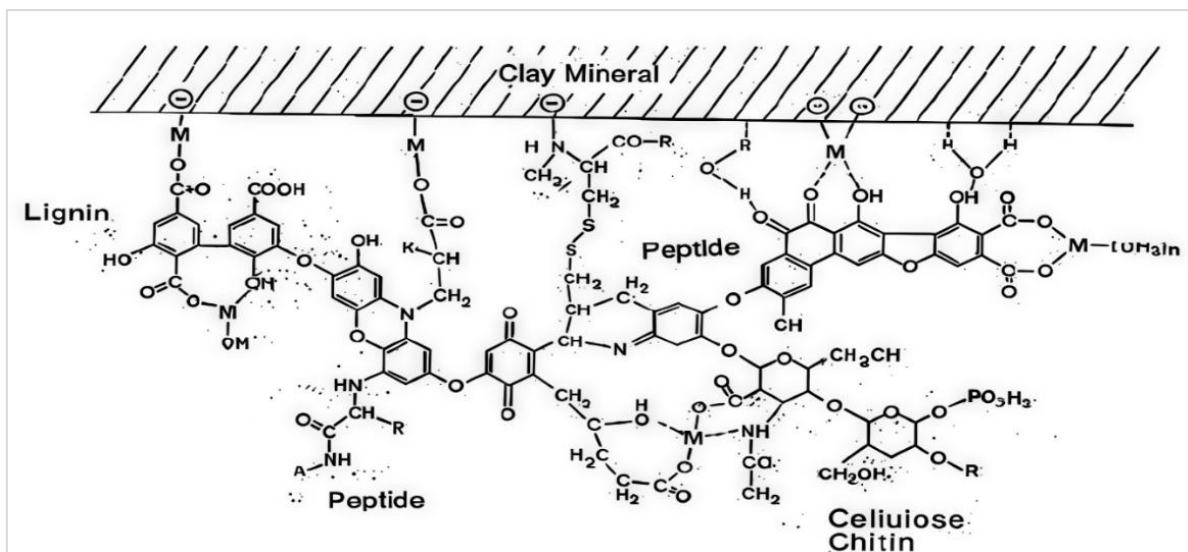


Рисунок 4 – Схема структуры молекулы гумуса на границе с глинистым минералом

Для успешного протекания данного процесса требуются следующие факторы: 1) присутствие кислорода; 2) оптимальный уровень влажности; 3) наличие растительности; 4) присутствие минеральной структуры, обладающей способностью к адсорбции ферментов и органических веществ; 5) присутствие организмов, секретирующих окислительные экзоферменты; 6) повышенная активность закрепленных фенолоксидаз.

Важно отметить, что формирование высокомолекулярных гумусовых веществ невозможно без минеральной составляющей [51, 186].

Гуминовые вещества – высокодисперсные коллоидные системы, существующие в форме зелей и гелей. Они обладают развитой поверхностью, пористой структурой и выраженным отрицательным зарядом. Эти свойства определяют их ключевые функции: сорбцию гидрофобных соединений (например, пестицидов) во внутренних полостях и избирательное связывание катионов благодаря ионообменным центрам на своей поверхности. Представленные минеральные, органические и органо-минеральные соединения образуют единый почвенно-поглощающий комплекс [51, 186, 190].

1.5. Влияние ППК на основные характеристики почв.

Почвенно-поглощающий комплекс является активным компонентом почвы, оказывающим определяющее влияние на химические, физические и биологические свойства, а следовательно, и на плодородие.

На рисунке 5 представлена взаимосвязь почвенно-поглощающего комплекса с основными характеристиками почв.

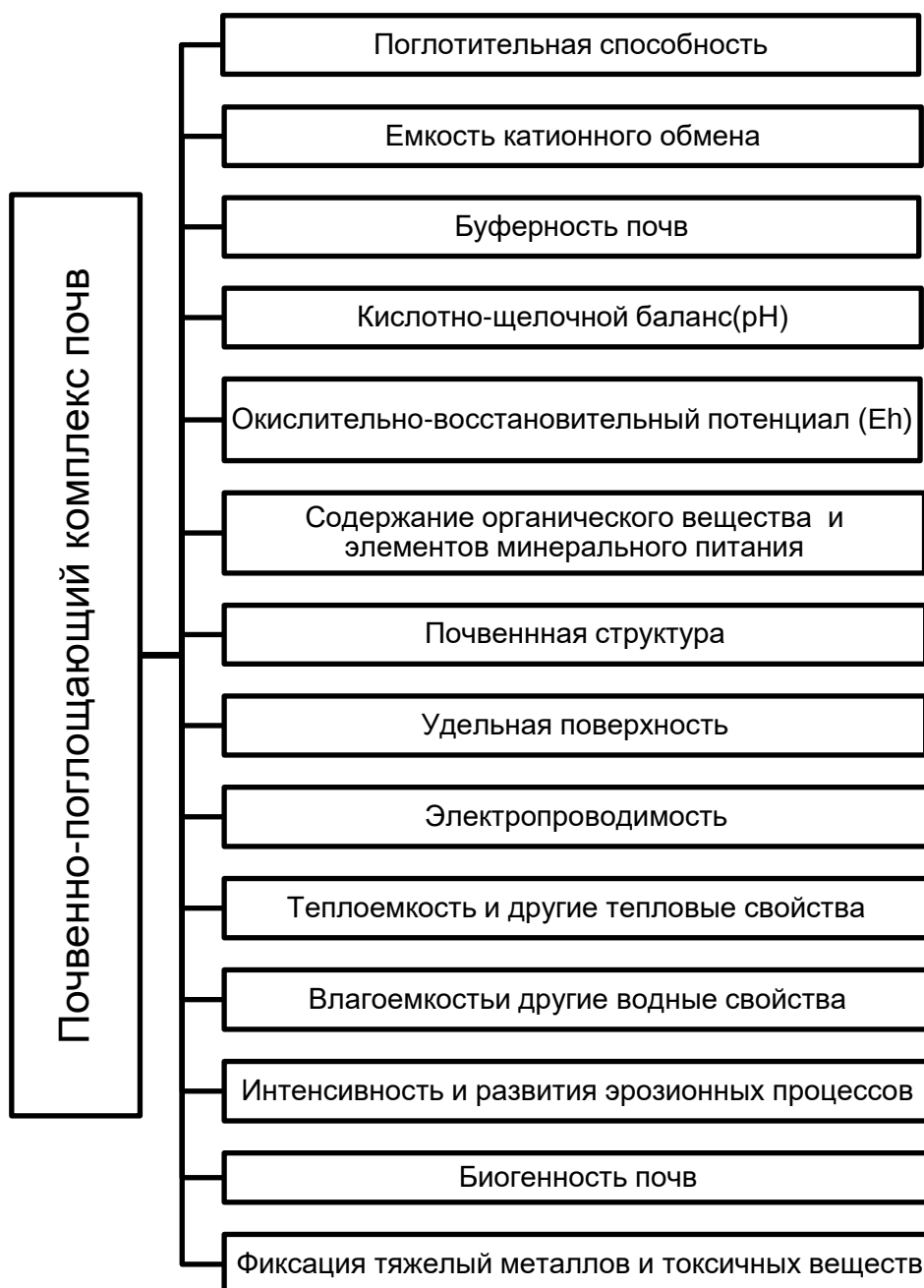


Рисунок 5 – Взаимосвязь ППК с основными свойствами почв.

Почвенно-поглощающий комплекс – это не просто "хранилище" элементов питания, а динамичная система, вовлеченная в постоянный обмен и

взаимодействие с почвенным раствором и живыми организмами. Перечислим основные функции ППК:

1. ППК участвует в формировании профиля почвы, определяя перемещение веществ по вертикали. Иллювиирование и элювиирование глинистых минералов и органического вещества происходит именно благодаря способности ППК связывать эти компоненты. Распределение элементов питания по слоям почвы, таким образом, напрямую зависит от свойств ППК [200, 207].

2. Определяет буферность почвы - её способность противостоять изменениям кислотности (рН). Высокая ёмкость катионного обмена (ЕКО) ППК стабилизирует рН, сглаживая воздействие удобрений или кислотных дождей. Буферность напрямую зависит от состава ППК: типа глинистых минералов и содержания органического вещества, которые влияют на величину ЕКО [112, 221].

3. ППК определяет обеспеченность растений элементами минерального питания, удерживая их от вымывания из почвы [81].

4. ППК влияет на физические и водно-физические свойства почвы, определяет почвенную структуру, воздухопроницаемость, водоудерживающую способность. Двухвалентные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}) коагулируют почвенные коллоиды [64]. В засушливых регионах они также регулируют водоудерживающую способность [173].

5. ППК регулирует биологическую активность, создавая условия благоприятные для почвенных микроорганизмов, например, почвенную кислотность.

6. ППК влияет на окислительно-восстановительный потенциал, адсорбируя ионы металлов разной валентности (Fe II и Fe III) [174].

7. Связывает тяжелые металлы, радионуклиды и органические токсины, снижая их подвижность и биодоступность, выступая геохимическим барьером. Исследования А. В. Козлова показывают, что кремниевая кислота в составе ППК выполняет важную экологическую и структурную функцию: её анионы способны связывать токсичные вещества, а сам кремний формирует в

коллоидах активные сорбционные центры, на которых закрепляются питательные элементы, органические соединения, ферменты и микроорганизмы, что усиливает защитные и буферные свойства почвы [82].

8. Является ключевым фактором в поддержании биологического разнообразия почвы. Разнообразие химических и физических свойств, обусловленное составом ППК, создает благоприятные условия для развития различных групп микроорганизмов и почвенной фауны [193, 218].

Таким образом, ППК – это не просто компонент почвы, а активный участник почвообразовательных процессов и регулятор экологического равновесия, влияющий на плодородие почвы и устойчивость экосистем

Несмотря на то, что ППК и поглотительная способность являются консервативными показателями почвенного плодородия, в условиях высокоинтенсивного сельскохозяйственного производства, они, наряду с другими свойствами, претерпевают различные изменения. Например, в работах [38, 56, 176, 199] представлены данные об изменении состава и свойств ППК под влиянием различных систем удобрений и выращиваемых культур.

1.6. Современное состояние черноземов Воронежской области

Земельные ресурсы Воронежской области сформировались в лесостепной и степной зоне, на стыке Средне-Русской, Калачской возвышенности и Окско-Донской низменности. На рисунке 6 представлена диаграмма распределения земельного фонда Воронежской области.

Площадь земель сельскохозяйственного назначения по состоянию на 01.01.2025 г. составила 4173,7 тыс. га, из которых 3808,4 тыс. га – сельскохозяйственные угодья, в том числе 2902,7 тыс. га пашни.

Воронежская область имеет высокий агрономический потенциал благодаря благоприятному климату, а также плодородным почвам. Около 75% территории Воронежской области занимают черноземы — одни из самых плодородных почв на планете, которые играют важное место в аграрном секторе России. Они представляют собой национальное достояние,

способствующее обеспечению продовольственной безопасности, развитию экономики и устойчивости экосистем.

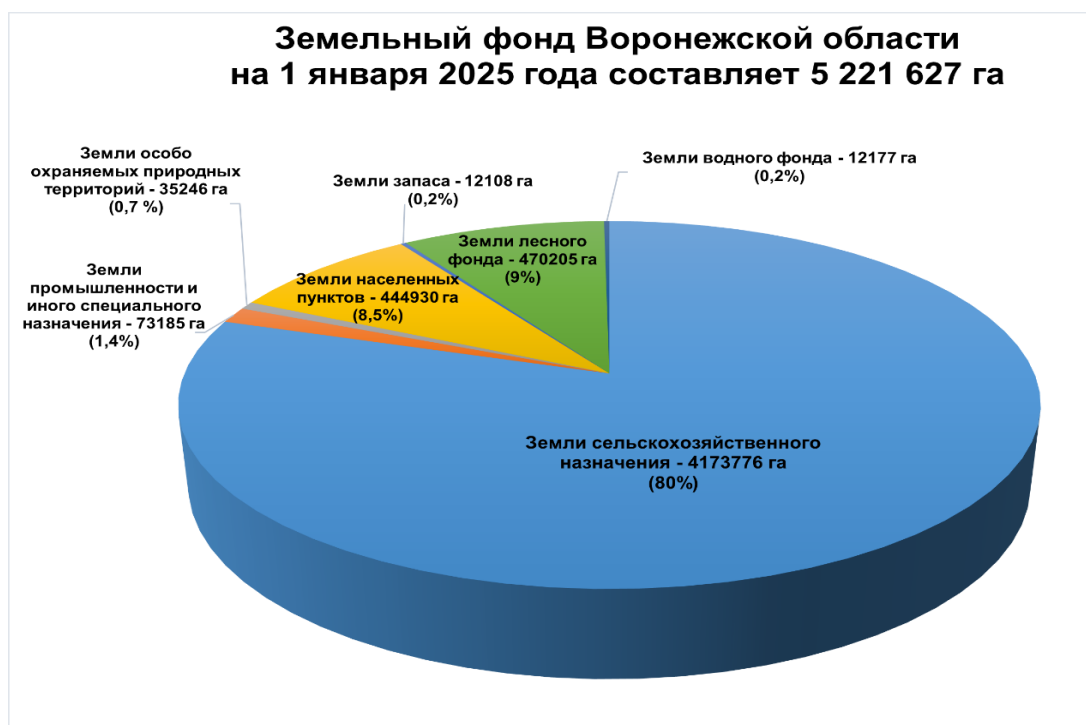


Рисунок 6 – Земельный фонд Воронежской области

Однако в нашей области отмечаются природные предпосылки для деградации земель, которые обостряются в процессе интенсивного сельскохозяйственного землепользования. В пределах области 80% территории занимают земли сельскохозяйственного назначения, при этом на большей части территории преобладают пашни. В этой связи возрастает необходимость в изучении процессов деградации земель для создания условий оптимизированной агро-экосистемы.

Согласно данным Воронежского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужба» в составе почв Воронежской области выделяются:

1. черноземы типичные – 43%;
2. черноземы обыкновенные – 30%;
3. почвы овражно-балочных склонов – 7,2%;
4. пойменные луговые почвы – 5,8%;
5. черноземы выщелоченные и оподзоленные – 5,7%;
6. лугово-черноземные и черноземно-луговые почвы – 3%;
7. черноземы карбонатные – 1,5%.

Мы видим, что преобладающими почвами нашего региона являются черноземы типичные и обыкновенные.

Для оценки динамики состояния черноземных почв на диаграммах представлены результаты агрохимического обследования за 2012 и 2024 гг. (рис 7.)

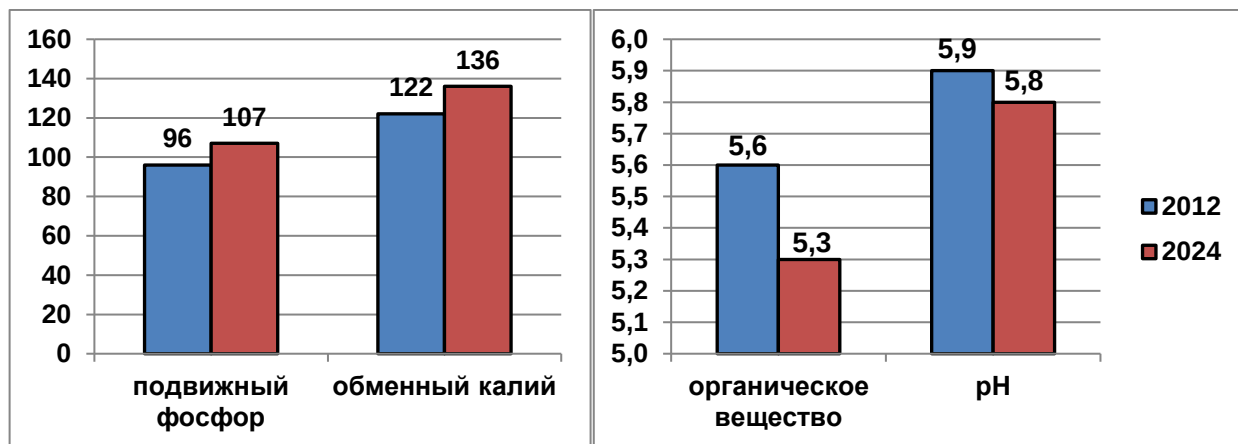


Рисунок 7 – Изменение агрохимических показателей почвенного покрова Воронежской области (по материалам Воронежского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужбы»)

По материалам агрохимического обследования 2024 года средневзвешенное содержание подвижного фосфора по области составляет 107 мг/кг почвы, обменного калия - 136 мг/кг почвы. Таким образом, мы видим, что содержание подвижного фосфора и обменного калия увеличилось на 11,5% с 2012 по 2024 гг. Это можно объяснить интенсификацией сельскохозяйственного производства, связанной с применением высоких доз минеральных удобрений. Однако по мнению большинства почвоведов, баланс питательных веществ в почвах по основным химическим элементам минерального питания растений отрицательный [71].

Средневзвешенное содержание органического вещества в пахотных угодьях Воронежской области на данный момент составляет 5,3%. Содержание органического вещества снизилось на 5% с 2012 до 2024 гг.

В зависимости от содержания органического вещества в пахотном слое черноземов выделяют следующие виды почв. Данные обследования за 2024 год представлены на рисунке 8.

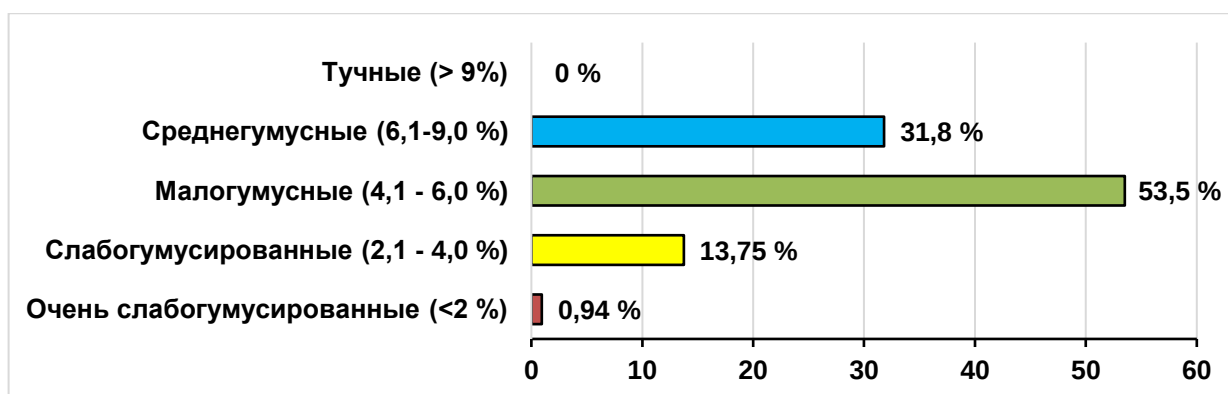


Рисунок 8 – Площади черноземных почв Воронежской области разных видов гумусированности

Выявлено, что преобладающая часть почвенного покрова Воронежской области представлена мало- и среднегумусными черноземами (85,3%). Высокое содержание гумуса до 7,0% характерно для северных районов области, особенно в Панинском, Верхнехавском, Эртильском. Тучных черноземов с содержанием гумуса свыше 9% при проведении мониторинга в 2024 году не выявлено.

Установлено, что с 2012 года кислотность почвенного покрова Воронежской области возросла на 0,1 ед. рН. В настоящее время в области около 35% пашни характеризуются неблагоприятными показателями почвенной кислотности и нуждаются в известковании, из них: 1. сильнокислые – 0,47%; 2. среднекислые – 9,02%; 3. слабокислые – 24,14%.

По данным экологического мониторинга 2023 года, около 7% образцов почвы в Воронежской области имеют повышенное содержание тяжёлых металлов (свинца и кадмия) из-за воздействия сельского хозяйства и промышленности. Согласно официальной статистике, в аграрном секторе области в год используется свыше 100 наименований пестицидов для обработки более 900 тыс. га. Основной объём приходится на гербициды (370 тыс. га, свыше 360 т), инсектициды (400 тыс. га, 160 т) и биопрепараты (35 тыс. га, 35 т). Фунгицидами обрабатывается более 30 тыс. га (14 т), десикантами – свыше 5 тыс. га (9,5 т). Средняя химическая нагрузка на агроэкосистемы составляет от 0,2 до 2 кг пестицидов на гектар.

Согласно данным, эрозия почв приводит к значительной деградации агроэкосистем. В области более 52% земель подвержены эрозии (водной – свыше 950 тыс. га, ветровой - около 145 тыс. га). На склонах крутизной от 1% годовые потери почвы достигают 7 т/га. С ливневыми осадками ежегодно вымывается около 7 кг/га питательных веществ, преимущественно азота (80%). Наблюдения за агроэкосистемами выявили, что в среднем за год вымывается 10–20% азотных, 10–15% калийных и до 2% фосфорных удобрений.

Скорость эрозии чернозёмов на пашне в 3–4 раза превышает скорость почвообразования [18, 25]. Если за год формируется около 0,2 мм почвы, то теряется 0,6–0,8 мм. За годы интенсивного использования на склонах был практически полностью смыт пахотный слой (25–27 см), для естественного восстановления которого потребуется 1250–1350 лет. В результате эрозии теряются гумус и питательные элементы, ухудшаются свойства почв, а их плодородие снижается на 30–50%.

В Воронежской области выделяются черноземные почвы разной степени смытости (рис. 9). Установлено, что в Воронежской области преобладают слабосмытые почвы (это почвы, у которых смыто не более половины гумусо-аккумулятивного горизонта).

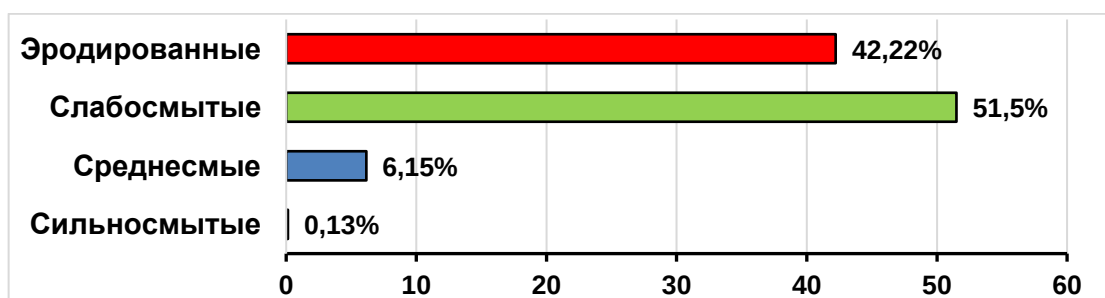


Рисунок 9 – Группы эродированности почвенного покрова Воронежской области

Таким образом, в настоящее время черноземы Воронежской области испытывают существенное влияние процессов деградации, которые проявляются в дегумификации, подкислении, а также развитии эрозии. Интенсивность развития этих деградационных процессов тесно связана с состоянием ППК как гаранта почвенного плодородия. Известно [19, 68, 69], что при насыщении

ППК кальцием, мы получаем стабильную экосистему с развитым процессом гумификации и последующим закреплением гуматов кальция в гумусо-аккумулятивном горизонте, близкой к нейтральной почвенной кислотностью и высокой способностью противостоять процессам водной эрозии.

Для предотвращения развития деградационных процессов необходимы разработка и внедрение комплексной программы по охране черноземных почв, включающей в себя мониторинг состояния земель, научные исследования и внедрение лучших агрономических практик с использованием минеральных и органических удобрений, кальцийсодержащих мелиорантов, проектированием противоэрозионных мероприятий и др. Кроме того, важным аспектом является просвещение населения о важности защиты почв и устойчивого экологичного подхода к ведению агропромышленного производства. Сохранение такого ценного ресурса, как черноземы – это инвестиция в стабильность и процветание общества и экономики, фундамент нашего будущего.

2. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Оценка показателей окружающей среды при формировании почв агроценоза

Почвенный покров формируется под комплексным воздействием множества почвообразующих факторов: особенностей рельефа, климатических параметров, влияния как поверхностных, так и подземных вод, исходных материнских пород, биоты, растительного покрова и антропогенной деятельности. Указанные факторы оказывают определяющее влияние на состав и строение почвы, обуславливая многообразие её разновидностей.

В ходе научно-исследовательской работы был осуществлен анализ почвенных образцов чернозема выщелоченного, отобранных в длительном стационарном полевом опыте с использованием удобрений и мелиоранта, заложенным в 1987 г. на базе кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» имени императора Петра I.

2.1.1. Климат

Район исследования расположен в зоне умеренно-континентального климата, характеризующегося переходными чертами. Продолжительность периода без заморозков достигает примерно 250 суток, при этом годовое количество осадков незначительно – 550–600 мм. Климатические особенности данной местности позволяют выделить четыре четко выраженных времени года: зимний, весенний, летний и осенний периоды. Лето отличается повышенными температурами, в то время как зима характеризуется умеренными морозами. Тип почв соответствует преобладающим климатическим условиям.

Среднегодовая температура воздуха составляет +7,5 °С, с незначительными колебаниями до 1,8 °С между северными и южными участками. Самым холодным месяцем является январь со средней температурой -6 °С, а наиболее теплым – июль, характеризующийся частыми осадками и средней температурой +21°С.

Длительность вегетационного периода в среднем составляет 180 дней. Сумма активных температур, превышающих +10°С, колеблется в пределах от

2440 до 2930 °С, что обеспечивает благоприятные условия для развития сельскохозяйственных культур.

Заморозки представляют собой распространенное явление для данной территории. Вероятность наступления отрицательных температур существует в поздние весенние месяцы (в конце апреля - начале мая) и в начале осеннего периода (в конце сентября). Отмечаются редкие случаи заморозков в августе.

Более подробный анализ климатических условий будет проведен на основе данных, полученных за 2021–2024 годы исследования.

Таблица 1 – Количественные показатели климата за 2021–2024 гг. (по данным Воронежской метеостанции)

Показатель	2021	2022	2023	2024	Среднемного- летние значения
Среднегодовая температура воздуха, °С	8,3	8,2	8,5	9,6	7,5
Годовое количество осадков, мм	586	862	870	382	572
Безморозный период ($T > 0^{\circ}\text{C}$), дней	277	271	276	263	250
Вегетационный период ($T > 10^{\circ}\text{C}$), дней	155	167	172	185	180
Сумма активных температур ($T > 10^{\circ}\text{C}$), °С	3067	2933	3034	3608	-
Количество осадков за вегетационный период (май-сентябрь), мм	190	240	313	144	219
ГТК за год	0,69	0,93	1,4	0,59	-
Коэффициент увлажнения	0,57	0,9	0,86	0,34	-

На рисунке 10 представлены данные по количеству осадков и температурные кривые за 2021–2024 годы наблюдений, а также их средние многолетние значения (приложение А). Выявлено, что в 2021 году максимальное количество осадков, значительно превосходящее среднемноголетние значения для данной местности, отмечается в июне и в сентябре (98 и 99 мм соответственно), а минимальное количество наблюдается в октябре – 6 мм, при среднемноголетней норме 51 мм.

В 2022 максимальное количество осадков выпало в сентябре – 135 мм, что соответствует 265% от среднемноголетней нормы (51 мм), также наибольшее количество осадков выпало в июле и декабре (122 и 105 мм соответственно). В 2023 году максимум смещен на июль, и также большое количество осадков выпало в ноябре и декабре (в виде снега). В сентябре 2024 года в

Воронеже зафиксирован минимум осадков за весь период метеорологических наблюдений (с 1861), который составил 0 мм, максимальное количество осадков за вегетационный период выпало в июле (67 мм).

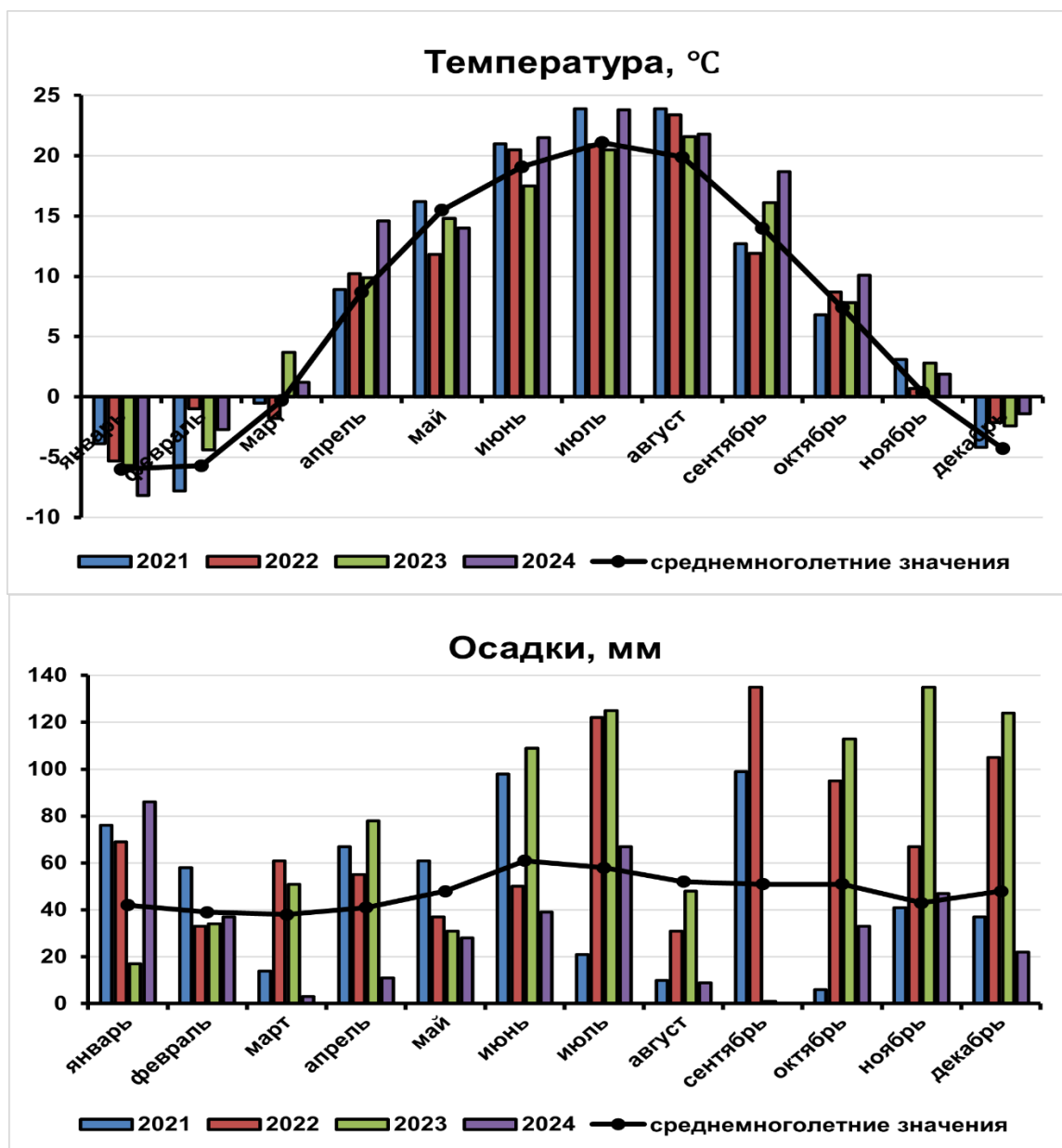


Рисунок 10 – Сравнение метеорологических данных за годы наблюдений со среднегодовыми значениями по данным Воронежской метеостанции

За 2021 год выпало 586 мм осадков, что практически совпадает со среднегодовой нормой – 572 мм, за 2022 год выпало 860 мм осадков, что соответствует 150% от нормы, в 2023 году - 866 мм (152% от нормы), самым засушливым оказался 2024 год – 382 мм (67% от среднегодовой нормы).

Общая динамика температурных показателей за исследуемый период

соответствует многолетним климатическим нормам. Вместе с тем, выделяются отдельные месяцы с высокими температурами: 2021 год – май и июнь, 2022 год – апрель и июнь, в 2023 году март и сентябрь, в 2024 – апрель, июль и сентябрь, а также август и ноябрь (кроме 2022 года) на протяжении всего анализируемого периода, продемонстрировали превышение средних многолетних показателей. Также наблюдаются отклонения от нормы с более низкими температурами: февраль 2021 и январь 2024 годов.

Характерной особенностью данного климата является неравномерность выпадения осадков в течение холодного и теплого периодов года. В течение холодного периода года выпадает 38–51% годового количества осадков, таким образом, на теплый период приходится оставшаяся часть составляющая 49–62% (рис. 11).

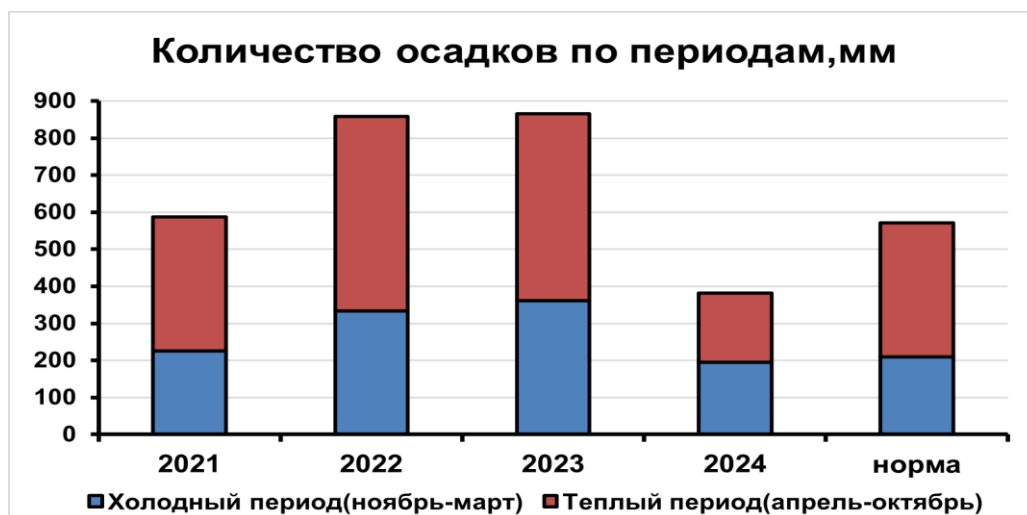


Рисунок 11 – Количество выпавших осадков за различные периоды анализируемых годов

Так, за теплый период (апрель–октябрь) исследуемых годов выпало 187–525 мм осадков при среднемноголетней норме – 362 мм, что составляет 33–92% среднемноголетней годовой нормы – 572 мм.

Глобальное потепление климата повлекло за собой ощутимые перемены в характеристиках континентального климата. За анализируемый период 2021–2024 годов наблюдается повышение годовой температуры воздуха на 0,7–2,1°C по сравнению со среднемноголетней нормой +7,5°C, что соответствует росту на 9–28%.

Зимние периоды стали менее суровыми, в то время как летние месяцы отличаются повышенной влажностью и пониженными температурами, что сопровождается резкими колебаниями температур. Переход от жаркой и засушливой погоды к холодной и влажной может происходить в течение короткого времени, иногда в пределах одного дня.

Коэффициент увлажнения (КУ) - ключевой климатический и экологический индекс, характеризующий баланс влаги на территории. Он представляет собой отношение годового количества атмосферных осадков к величине суммарной испаряемости (потенциального испарения) за тот же период.

Коэффициент увлажнения определяется по соотношению предложенному Высоцким Г. Н. [30]:

$$КУ = P/E_0,$$

где КУ – коэффициент увлажнения, P – годовая сумма осадков, мм;
E₀ – годовая сумма испаряемости, мм.

Испаряемость, фигурирующая в уравнении, отражает потенциальное испарение в конкретной местности, не ограниченное почвенной влагой и обусловленное совокупностью метеорологических факторов.

Принимая во внимание ориентированность на доступность данных, в частности температуры воздуха и осадков, для вычисления годовых значений испаряемости используется формула, предложенная Шумовой Н.А. [176]

$$E_0 = \alpha(\Sigma T > 0),$$

где E₀ – испаряемость, мм; $\Sigma T > 0$ – сумма среднесуточных положительных температур воздуха, °C; $\alpha = 0.28$.

По данным Иванова Н. Н. [67], коэффициенты увлажнения варьируются в зависимости от природной зоны: для лесной зоны они составляют 1,0–1,5; для лесостепи – от 0,6 до 1,0; степь имеет показатели от 0,3 до 0,6; в полупустынных районах уровень увлажнения находится в пределах 0,1–0,3; а в пустынях он составляет менее 0,1.

Рассчитанные коэффициенты увлажнения за исследуемый период 2021–2024 годы характерны для двух природных зон: степной (2021, 2024) и

лесостепной (2022, 2023). При среднем значении за исследуемый период коэффициент увлажнения – 0,67, диапазон его изменений находится в пределах 0,34–0,90.

Одним из наиболее распространенных количественных индикаторов климата является гидротермический коэффициент (ГТК), предложенный Г. Т. Селяниновым [9], который отражает период, когда средние суточные температуры воздуха превышают 10°C (так называемый вегетационный период).

$$\text{ГТК} = 10 P_{>10} / \Sigma T_{>10},$$

где ГТК – гидротермический коэффициент; $P_{>10}$ – сумма осадков за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10°C, мм; $\Sigma T_{>10}$ – сумма среднесуточных температур воздуха за тот же период, °C.

В 1958 году Т.Г. Селянинов выделил семь природных зон, опираясь на гидротермические параметры: тайга (ГТК более 1,6); смешанная тайга и лиственные леса (от 1,6 до 1,3); лесостепь (от 1,3 до 1,0); типичная степь (от 1,0 до 0,7); степь на южных чернозёмных и каштановых почвах (от 0,7 до 0,4); полупустыня (от 0,4 до 0,2); пустыня (менее 0,2)[176].

В среднем за анализируемый период значение гидротермического коэффициента за год составило 0,90 при диапазоне его изменения от 0,59 до 1,40. Изменения ГТК за период с 2021 по 2024 годы отражают природную зональность, варьирующую от степей до смешанной тайги и лиственных лесов. В течение этого временного промежутка в двух случаях гидротермические условия соответствовали зоне южных степей (2021, 2024), в одном случае – зоне типичной степи (2022), а в 1 случае – зоне смешанных лиственных лесов (2023) (приложение Б).

Более детальные изменения ГТК за вегетационный период представлены на рисунке 12.

Количество выпавших осадков неравномерно по декадам месяца и в целом за весь вегетационный период. Максимальное значение гидротермического коэффициента (ГТК) – 4,16 зафиксировано в 3 декаде июня 2023 года, за данный период выпало 73 мм осадков. Самыми засушливыми оказались 1 и 2

декады мая 2023 года, а также 2 и 3 декады августа 2024 года при полном отсутствии осадков.

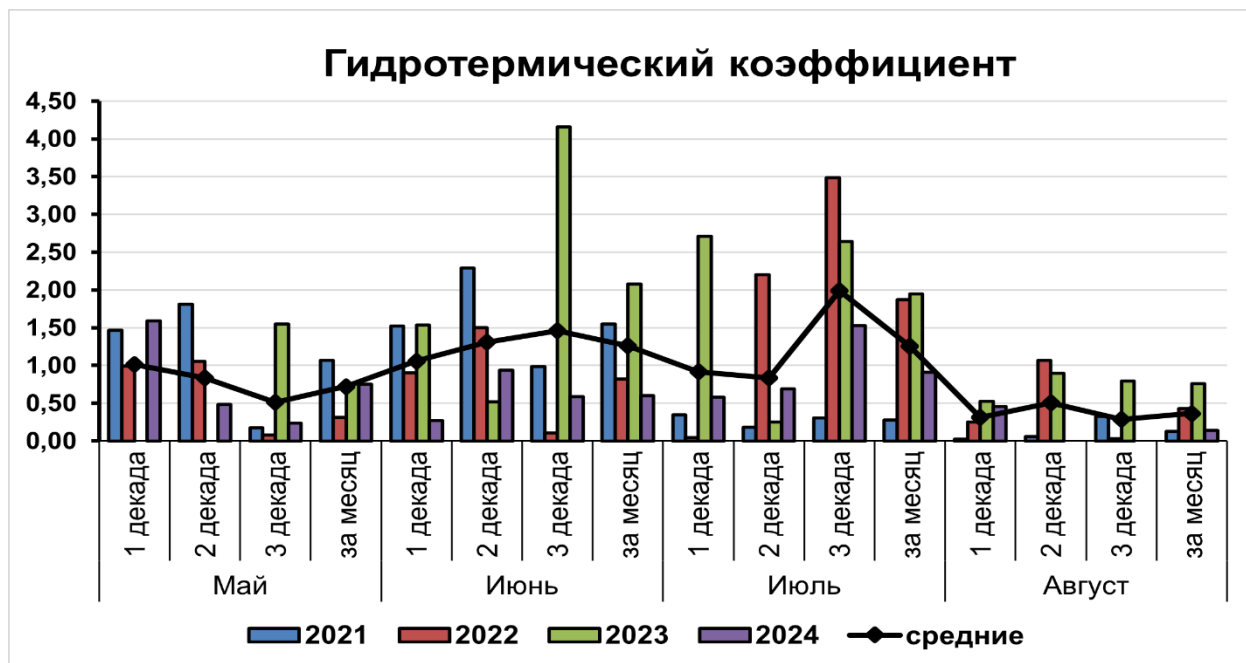


Рисунок 12 – Гидротермические условия вегетационного периода за исследуемые годы

Усредненные показатели ГТК по декадам и за полные месяцы анализируемого периода находятся в диапазоне 0,29–1,99, минимальные показатели наблюдаются в августе, где недостаток влаги в сочетании с высокими температурами привел к низким значениям ГТК.

2.1.2. Почвообразующие породы

Материнские породы выступают ключевым фактором в процессе формирования почвы. Горные породы определяют химический, минералогический и гранулометрический состав образующейся на них почв. Кроме того, кислые породы, такие как гранит, риолиты, формируют кислые почвы. Основные горные породы обуславливают формирование почв с нейтральной или слабощелочной реакцией среды.

Территория стационара расположена в южной части Дон-Воронежского водораздела. Преобладают покровные четвертичные глины и суглинки, флювогляциальные пески, а также лессовидные суглинки. Эти горные породы обладают высоким содержанием карбоната кальция [117].

2.1.3. Рельеф

Рельеф является ключевым фактором, определяющим характеристики почв и их потенциал для использования в сельскохозяйственном производстве. Он определяет процессы водной и ветровой эрозии, перераспределяет потоки тепла, влаги, аккумуляцию и миграцию продуктов выветривания и почвообразования.

Рассматриваемая территория представляет собой равнинную местность с незначительной степенью эродированности, расположенную на высоте 150–160 метров над уровнем моря. Данная область известна как Придонская или Дон-Воронежская низменность. Глубина залегания грунтовых вод, превышающая 6 метров, исключает их существенное влияние на процессы почвообразования. Воды характеризуются пресным составом с минерализацией, не превышающей 0,3–0,5 г/л, с преобладанием ионов кальция и магния. Под воздействием этих факторов на данной территории сформировались черноземные почвы, образование которых связано с дерновым или степным типом почвообразования.

2.1.4. Растительность

Растительность, будучи одним из ключевых факторов формирования почвы, неразрывно связана с климатическими условиями. Согласно ботанико-географическому делению, территория опытной станции ВГАУ располагается в зоне типичной лесостепи [3].

Из-за интенсивной распашки земель, сохранившиеся лесные массивы сконцентрированы на небольших участках плато, склонах, в балках и речных долинах. Основу древесного покрова составляют дубы с примесью ясеня (доминирующие породы), а также клен и вяз (второстепенные породы). В поймах рек и низинах встречаются осинники, а вдоль рек и в оврагах – березняки. Подлесок образован лещиной, черемухой, бересклетом европейским и бородавчатым, жимолостью и другими кустарниками.

В травостое преобладают сныть и медуница, на переувлажненных

участках – осоки, мятлик лесной, бор развесистый, ясменник душистый, душица, ландыш, пролеска весенняя, колокольчик крапиволистный, чина весенняя, звездчатка, иван-да-марья, чистец лесной и другие травы.

Активное использование земель под сельскохозяйственные нужды приводит к исчезновению естественной травянистой флоры. Процессы почвообразования происходят преимущественно за счет возделываемых культур. Травянистый покров отличается высокой скоростью биологического круговорота веществ.

В отличие от естественных фитоценозов, где биологический цикл практически замкнут, в агроценозах отчуждается до 50–70% производимой биомассы. Нехватка органики, в особенности ее подвижных форм, ведет к постепенному уменьшению содержания органического вещества в почве до критического уровня. Таким образом, главной особенностью современного почвообразования на данной территории является постоянный дефицит свежего органического вещества.

2.2. Объект исследования

Научные наблюдения по данной теме проводились в 2021–2024 годах в длительном стационарном полевом опыте с удобрениями и мелиорантом, который был заложен в 1987 году на территории опытной станции Воронежского ГАУ им. императора Петра I. Она расположена в левобережном районе подзоны типичной лесостепи и входит в Воронежско-Эртильский агропочвенный район Воронежской области.

Севооборот в опыте – шестипольный, со следующим чередованием культур: чистый пар – озимая пшеница – сахарная свекла – вико-овес на зеленый корм – озимая пшеница – ячмень. К моменту окончания настоящих исследований началась седьмая ротация севооборота.

Образцы почвы отбирались с поля № 1 под культурами: озимая пшеница по занятому пару (2021 г.), ячмень (2022 г.), в чистом пару (2023 г.), озимая пшеница по чистому пару (2024 г.) на глубину до 1 метра послойно через 20 см.



Рисунок 13 – Схема расположения полей многолетнего стационарного опыта кафедры агрохимии, почвоведения и агроэкологии

Схема опыта включает 15 вариантов. Для проведения исследований были взяты семь вариантов:

1. Контроль без удобрений;
2. Фон – 40 т/га навоза за ротацию или 6,7 т/га ежегодно;
3. Фон + NPK ($N_{30}P_{30}K_{30}$ - под ячмень, $N_{60}P_{60}K_{60}$ - под озимую пшеницу);
5. Фон + 2NPK ($N_{60}P_{60}K_{60}$ - под ячмень, $N_{120}P_{120}K_{120}$ - под озимую пшеницу);
12. Фон + NPK ($N_{30}P_{30}K_{30}/N_{60}P_{60}K_{60}$) + дефекат (последствие);
13. Фон + дефекат (последствие);
15. NPK ($N_{30}P_{30}K_{30}/N_{60}P_{60}K_{60}$) + дефекат (последствие).

В опыте использовались следующие минеральные удобрения: аммиачная селитра (34,5%), азофоска (16:16:16), двойной суперфосфат (46%), хлористый калий (60%), дефекат ООО "Перелешинский сахарный комбинат" (карбонат кальция 46%).

Дефекат в последний раз был внесён в дозе 22 т/га в 2005 году в начале четвёртой ротации севооборота. Таким образом, в опыте испытывались три системы удобрения: без удобрений, органическая и органоминеральная. Так как дефекат последний раз был внесён в 2005 году, следует рассматривать его отдалённое (20 лет) последствие.

Таблица 2 – Насыщенность 1 га удобрениями, среднее за 2021–2024 гг.*

Вариант	Минеральные, кг д.в./га			Органические (навоз), т/га
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1. Без удобрений – контроль	0	0	0	0
2. 40 т/га навоза – фон	0	0	0	6,7
3. Фон + NPK	37,5	37,5	37,5	6,7
5. Фон + 2NPK	75,0	75,0	75,0	6,7
12. Фон + NPK + дефекат по 1,0 Нг	37,5	37,5	37,5	6,7
13. Фон + дефекат по 1,0 Нг	0	0	0	6,7
15. NPK + дефекат по 1,0 Нг	37,5	37,5	37,5	6,7

*: обеспеченность 1 га органическими удобрениями рассчитана в среднем за 6 лет

Повторность опыта четырехкратная, размещение повторений двухъярусное, расположение делянок систематическое шахматное. Общая площадь опытной делянки составляла 191,7 м².

Почвенный покров опытного участка представлен черноземом выщелоченным, среднемощным, малогумусным тяжелосуглинистым на покровных суглинках (рис. 14) [117].

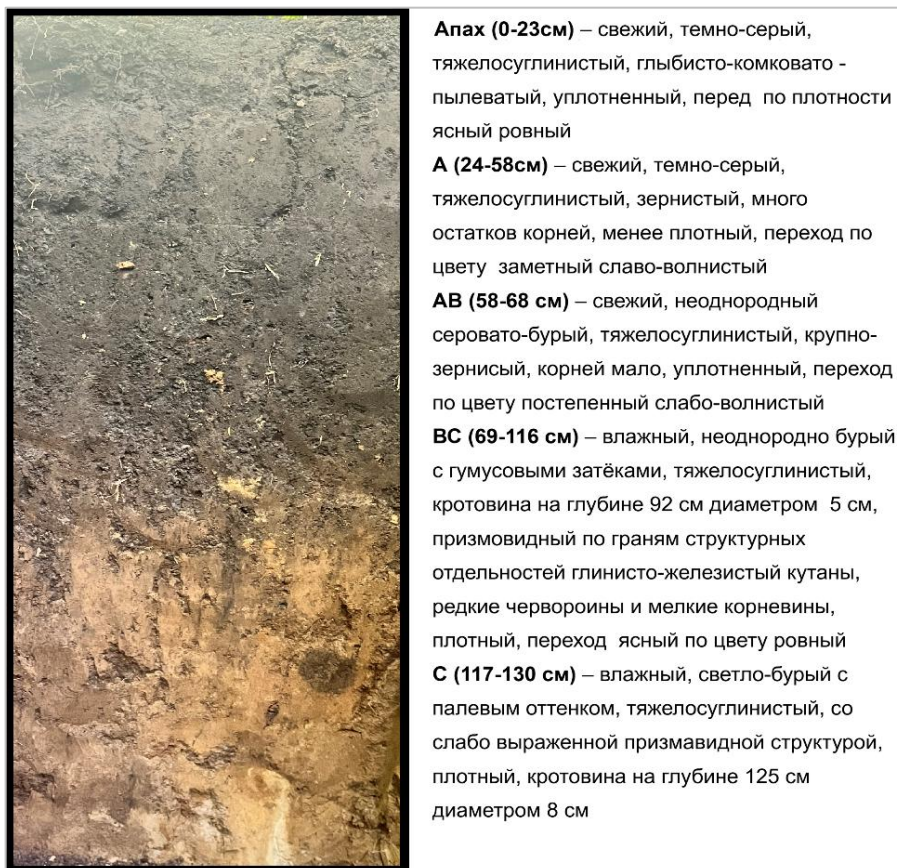


Рисунок 14 – Морфологическое описание почвенного профиля на примере разреза № 1

2.3. Методы исследования

В почвенных пробах определялись:

- гранулометрический состав методом пипетки (вариант Н.А. Качинского с подготовкой почвы к анализу пирофосфатным методом по С. И. Долгову и А. И. Личмановой) [32];
- величина удельной поверхности с помощью геометрического метода [40];
- pH водной и солевой вытяжек по методу ЦИНАО [28];
- гидролитическую кислотность по Каппену в модификации ЦИНАО [167];
- обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} трилонометрическим методом [167];
- сумма поглощенных оснований – по Каппену-Гильковицу (ГОСТ 27821–88);
- содержание подвижных форм фосфора (по Чирикову в модификации ЦИНАО, ГОСТ 26204–91);
- содержание обменных форм калия (по методу Чирикова ГОСТ 26204–91);
- содержание гумуса по методу Тюрина с фотоколориметрическим окончанием [32];
- содержание подвижного органического вещества по Егорову [115];
- групповой состав гумуса по методу Кононовой-Бельчиковой [32];
- поглощательная способность почвы методом построения изотерм сорбции [28];
- буферная способность почв по методу О. Аррениуса [28].

3.ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЧВ

Гранулометрический состав - фундаментальная и относительно стабильная характеристика, влияющая на водно-воздушный режим, поглотельную способность, устойчивость к эрозии и, в конечном счете, на уровень почвенного плодородия (рис.15). Его учет необходим для рационального землепользования и управления плодородием. В большинстве систем оценки земель и почвенных классификаций гранулометрическому составу отводится ключевая роль [39, 95, 161].



Рисунок 15 – Влияние гранулометрического состава почв на некоторые показатели почвенного плодородия

Несмотря на консервативность этого показателя, при интенсивном сельскохозяйственном использовании он может претерпевать изменения. Установлено, что длительное применение высоких доз минеральных удобрений на бурой лесной кислой почве приводило к агролессиважу в верхних почвенных горизонтах с образованием текстурно-дифференцированных профилей [11, 116].

Для оценки антропогенного влияния в качестве контроля использованы данные по гранулометрическому составу многолетней залежи (с 1948 г.). Сравнение с этим стабильным природным аналогом позволило выявить направленность и интенсивность трансформации инертного показателя за 26 лет землепользования [128].

В таблице 3 представлены результаты определения гранулометрического состава анализируемых почвенных образцов. На рисунке 18 представлены профили распределения содержания физической глины (суммы почвенных агрегатов размером менее 0,01 мм) в исследуемых образцах.

Таблица 3 – Гранулометрический состав анализируемых образцов

Вариант	слой	Фракции, мм					
		1-0,25	0,25–0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Залежь	0-20	11,50	3,74	30,77	11,46	15,47	27,06
	20-40	12,73	4,95	28,26	9,67	15,37	29,02
	40-60	10,89	5,68	33,36	9,00	16,03	29,33
	60-80	10,56	6,15	37,09	6,44	10,53	29,23
	80-100	12,44	6,06	38,12	4,12	9,79	29,47
1. Контроль	0-20	8,18	17,74	23,02	10,60	10,70	29,76
	20-40	9,36	15,44	24,81	9,05	11,35	29,99
	40-60	8,73	13,51	25,21	9,44	3,63	39,48
	60-80	6,73	13,78	24,00	10,76	13,04	31,69
	80-100	9,35	19,27	21,78	7,87	11,25	30,49
2. 40 т/га навоза – фон	0-20	9,24	16,83	23,89	8,13	13,44	28,47
	20-40	8,76	15,44	25,04	6,03	16,06	28,67
	40-60	10,50	14,40	23,34	9,01	12,69	30,06
	60-80	9,07	13,28	26,49	4,94	15,37	30,85
	80-100	12,04	16,80	23,88	9,22	9,48	28,58
3. Фон + NPK	0-20	7,20	13,13	26,46	9,37	13,40	30,44
	20-40	8,23	19,99	22,78	6,45	14,75	27,81
	40-60	7,11	11,33	27,68	9,35	12,96	31,57
	60-80	7,19	20,72	20,46	7,57	11,36	32,69
	80-100	7,62	14,42	26,22	9,05	12,60	30,09
5. Фон + 2 NPK	0-20	9,66	13,99	24,77	9,38	13,23	28,97
	20-40	6,89	12,05	25,43	10,87	12,69	32,08
	40-60	6,58	11,89	25,88	9,92	12,70	33,03
	60-80	5,61	12,13	25,42	9,71	10,98	36,15
	80-100	10,79	16,70	23,94	10,06	10,95	27,57
12. Фон + NPK + дефекат (последствие)	0-20	11,35	16,85	23,51	8,27	12,91	27,12
	20-40	11,97	14,47	23,03	8,47	12,96	29,10
	40-60	7,79	11,81	25,59	8,59	14,81	31,40
	60-80	7,40	13,49	25,60	9,37	11,39	32,75
	80-100	11,20	15,59	25,07	7,47	12,40	28,27

продолжение таблицы 3

13. Фон + дефект (последствие)	0-20	9,27	16,48	24,15	9,03	13,60	27,47
	20-40	8,92	13,18	26,05	6,28	16,84	28,72
	40-60	9,62	14,28	24,28	7,75	16,81	27,26
	60-80	9,89	15,17	27,26	6,74	14,21	26,73
	80-100	12,65	21,05	22,95	5,31	12,93	25,12
15. NPK + дефект (последствие)	0-20	10,26	16,16	25,63	5,17	15,99	26,80
	20-40	8,012	12,48	26,29	6,63	15,39	31,20
	40-60	18,62	5,21	22,11	10,65	13,04	30,37
	60-80	6,06	15,40	26,66	6,82	15,09	29,97
	80-100	9,14	17,42	25,84	7,54	12,31	27,75

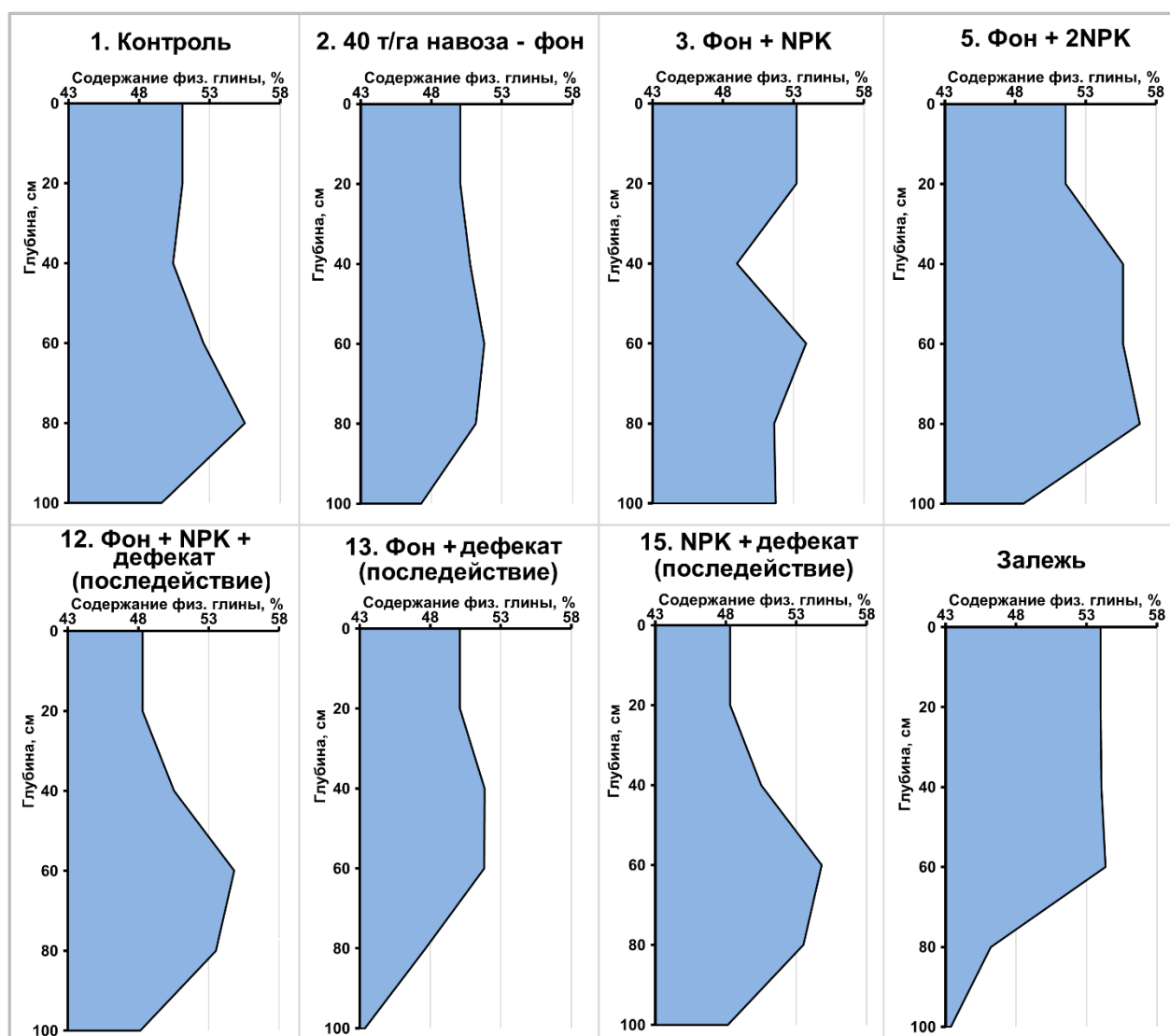


Рисунок 16 – Профильное распределение содержания физической глины в почвенных образцах залежи и вариантах опыта

Из данных таблицы и рисунка 16 видно, что почвы всех анализируемых образцов по классификации Н.А. Качинского относятся к разновидностям пылевато-иловатых тяжелых суглинков. Содержание физической глины по

профилю находилось в пределах 43,35–56,84%. Причём максимальное содержание (56,84%) отмечается в слое 60–80 см на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по фону навоза (вар. 5), а минимальное (43,35 %) в слое 80–100 см на варианте с применением кальциевого мелиоранта совместно с органическими удобрениями (вар. 13). В верхнем слое (0–20 см) содержание физической глины варьировало в интервале 47,95–53,21%, наименьшее значение отмечается на дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар.15), наибольшее значение зафиксировано на унавоженном варианте с внесением одинарных доз удобрений (вар. 3). При этом образец залежи характеризуется содержанием физической глины в верхнем слое 53,99% вниз по профилю содержание физической глины снижается до 43,38%.

Распределение физической глины по почвенному профилю имеет разные особенности. У образца залежи наблюдается незначительное увеличение содержания глины в середине почвенного профиля и резкое уменьшение в слое 60–100 см, что свойственно для равномерно регрессивно-аккумулятивного профиля.

Аккумулятивно-элювиально-иллювиальный тип распределения физической глины наблюдается на двух вариантах опыта. Более выровненный профиль зафиксирован на контрольном варианте, где в слое 20–40 см отмечается снижение содержания до 50,39 % и плавное увеличение до 55,49% в слое 60–80 см. Сильно выраженный профиль отмечается на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 3) сначала резкое уменьшение содержания от 53,21 до 49,00% и рост в слое 60–80 см до 53,88%.

На всех остальных вариантах опыта отмечается элювиально-иллювиальный профиль. На вариантах 2, 12 и 15 максимальное содержание 51,76%, 54,81% и 54,06% соответственно прослеживается в средней части в слое 40–60 см. На дефекатированном варианте с навозом (вар.13) наибольшее содержание (51,85%) наблюдается в слое 20–40 см. На варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5) наибольшее содержание отмечается в слое 60–80 см.

В верхней части почвенного профиля залежи (0–40 см) наблюдается минимальное изменение содержания физической глины (на 0,07%) из-за отсутствия антропогенной нагрузки. Длительное использование почв в качестве пашни приводит к обеднению верхней части профиля глинистыми частицами и некоторому увеличению их содержания в средней части профиля, что можно объяснить слабовыраженным протеканием процесса лессиважа под влиянием антропогенного воздействия [46, 62, 152].

Известно, что различные фракции механических элементов отличаются по составу, свойствам и структуре. Однако существует общая закономерность: уменьшение размера частиц приводит к снижению доли кварца и повышению содержания слюды и вторичных минералов [47, 124, 142]. С уменьшением размера частиц также уменьшается содержание кремния, основного элемента кристаллической решетки. С другой стороны, содержание алюминия, железа, кальция и магния увеличивается при переходе от фракций песка к илу [10, 139].

Каждая фракция обладает своими характерными свойствами, и если одна из них преобладает в гранулометрическом составе, она будет играть ведущую роль в определении состава и свойств почвы в целом [44, 161].

Крупные частицы (камни, гравий, песок), представленные первичными минералами, формируют почвенный скелет, обеспечивая хорошую водопроницаемость и аэрацию, но обладают низкой влагоёмкостью и плохо удерживают питательные вещества. Фракции пыли (особенно средней и мелкой) служат переходным звеном: они способны удерживать влагу, проявлять связующие свойства и участвовать в структурообразовании, однако их избыток может приводить к уплотнению и плохой водопроницаемости [116, 138].

Среди гранулометрических фракций именно илистая играет ключевую роль в формировании почвенного плодородия и структуры ППК. Благодаря огромной удельной поверхности (до 200–250 м²/г), эта фракция служит основной площадкой для важнейших физико-химических процессов. Для нее характерна высокая поглотительная способность, а также повышенное содержание

гумуса и элементов питания. Илистая фракция составлена коллоидами, которые ответственны за создание (ППК) и структурообразование [95, 97, 139].

Результаты определения содержания различных фракций гранулометрических элементов в анализируемых почвенных образцах представлены на рисунке 17.

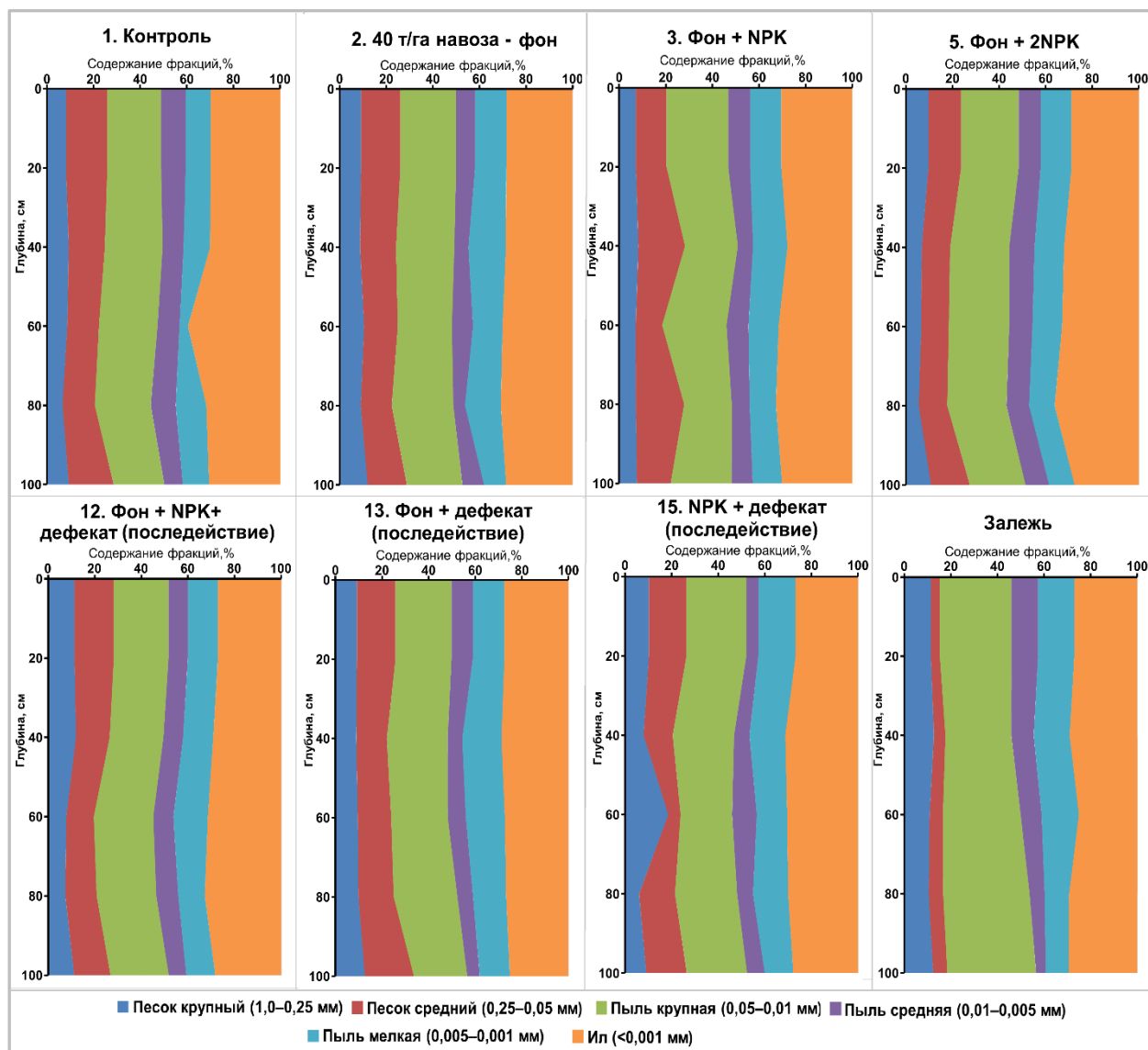


Рисунок 17 – Профильное распределение фракций гранулометрического состава анализируемых вариантов

Выявлено, что максимальное содержание крупного и среднего песка (1–0,25 мм) отмечается на варианте с применением минеральных удобрений по дефекату (вар. 15) – 18,62%. В среднем по вариантам опыта оно составляет примерно 10%. Содержание мелкого песка (0,25–0,05 мм) максимально (21,05 %) на варианте с внесением дефеката по органическому фону (вар. 13) в слое

0–20 см, минимально на залежи также в слое 0–20 см (3,74%). В среднем по опыту оно равно 13,74%.

Содержание фракции крупной пыли (0,05–0,01 мм), известной как лесовая, на опытных вариантах варьировало от 20,46% до 27,68%, тогда как на залежном участке составляло 30,77–38,12%. Данный показатель является ключевым диагностическим признаком для определения генезиса почвообразующей породы, и его превышение уровня 30–40% достоверно указывает на лесовое происхождение материнской породы [145]. Максимальное значение (38,12%) отмечено в нижнем горизонте залежи (80–100 см). На опытных вариантах минимальное (20,46%) и максимальное (27,68%) содержание лесовой фракции зафиксировано в слоях 60–80 см и 40–60 см соответственно, оба значения относятся к варианту с одинарной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 3).

Содержание фракции средней пыли (0,01–0,005 мм) на залежном участке изменялось в пределах от 4,12% (слой 80–100 см) до 11,46% (слой 0–20 см). В вариантах опыта диапазон составил 4,94–10,87%. Минимальное значение (4,94%) зафиксировано в слое 60–80 см на фоновом варианте (вар. 2), а максимальное (10,87%) в слое 20–40 см на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5).

Количество фракции мелкой пыли (0,005–0,001 мм) имеет наибольшее значение в слое 20–40 см варианта с применением дефеката на фоне навоза (вар. 13), низкий показатель отмечается на контрольном варианте (вар. 1) в слое 40–60 см.

Илистые частицы размером менее 0,001 мм доминируют во всех почвенных профилях изучаемых вариантов и находятся в интервале 25,12–39,48%. Максимум отмечается на контрольном варианте в слое 40–60 см (39,48%), минимум (25,12%) на варианте с применением дефеката по фону навоза (вар. 13) в слое 80–100 см. На залежном участке содержание илистой фракции составило 27,06–29,47%, демонстрируя тенденцию к увеличению с глубиной почвенного профиля.

3.1. Удельная поверхность вариантов опыта

Удельная поверхность почвы является фундаментальным свойством, детерминированным её гранулометрическим и минералогическим составом. В современном почвоведении эта характеристика признаётся ключевым интегральным параметром, связывающим строение почвенной массы с её функциональными свойствами [46]. Анализ удельной поверхности необходим для объективной оценки генезиса почв, прогнозирования их поведения и разработки научно обоснованных режимов землепользования. Несмотря на установленную корреляцию удельной поверхности с широким спектром физико-химических и биологических показателей плодородия, методические аспекты её определения и непосредственное использование в прикладных исследованиях остаются недостаточно разработанными, что ограничивает её применение в качестве стандартизированного диагностического признака [8, 171].

На рисунке 18 приведены рассчитанные геометрическим методом [40] значения удельной поверхности почвенных образцов, полученные на основе данных их гранулометрического состава.

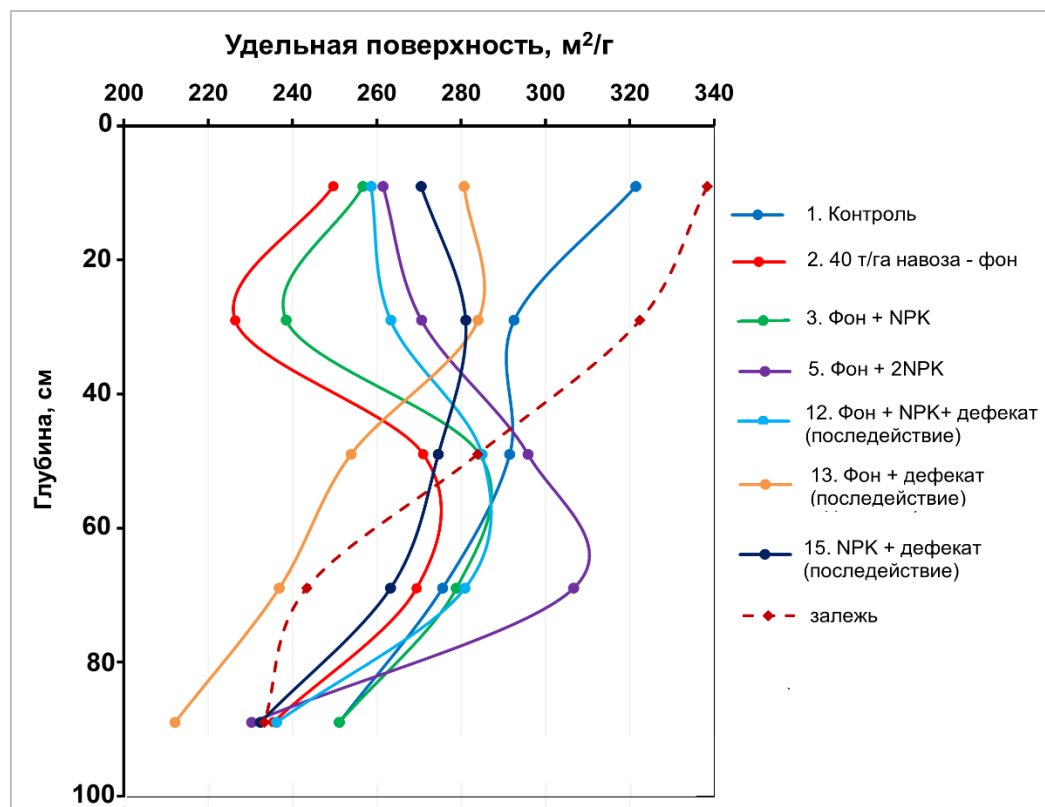


Рисунок 18 – Удельная поверхность почв изучаемых вариантов и залежного участка

Анализ данных позволяет выявить значительные различия между изучаемыми вариантами. Наибольшая величина удельной поверхности зафиксирована в образце из верхнего горизонта залежного участка (338,3 м²/г). Контрольный вариант также показал высокий результат (321,4 м²/г), тогда как самый низкий показатель отмечен для фонового варианта (249,6 м²/г). Для залежного и контрольного вариантов наблюдается общая тенденция к снижению удельной поверхности с увеличением глубины отбора проб.

В то же время, различные агротехнические приемы оказывают дифференцированное влияние на распределение этого параметра по почвенному профилю. Для вариантов 2, 3 и 12 (фон, одинарная доза удобрений по навозу, совместное внесение удобрений и дефеката по фону) характерен четкий аккумулятивно-элювиально-иллювиальный профиль с двумя выраженными максимумами в слоях 0–20 см и 40–60 см. При внесении двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5) максимум показателя смещается в более глубокий слой 60–80 см. Использование дефеката на фоне навоза (вар. 13) способствует формированию более плавного, равномерно убывающего профиля с небольшим слабовыраженным повышением в слое 20–40 см.

Можно предположить, что выявленные закономерности обусловлены долгосрочным воздействием применяемых химических средств (минеральные удобрения, навоз и дефекат). Их влияние, вероятно, реализуется опосредованно – через комплексное изменение ключевых свойств почвы, таких как состав гумуса, плотность сложения, минералогия и гранулометрический состав, что в итоге и отражается на величине удельной поверхности.

Ключевой задачей исследования являлось определение зависимости удельной поверхности почв от содержания тонкодисперсных частиц – физической глины и, в особенности, илистой фракции. Результаты данной оценки представлены на рисунках 19 и 20.

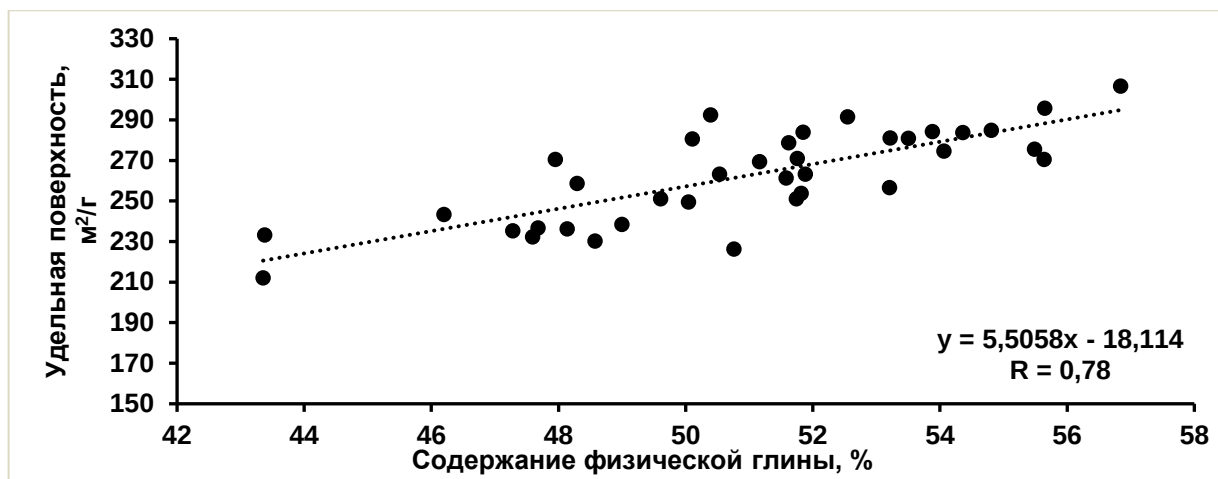


Рисунок 19 – Зависимость удельной поверхности почв анализируемых вариантов от содержания физической глины.

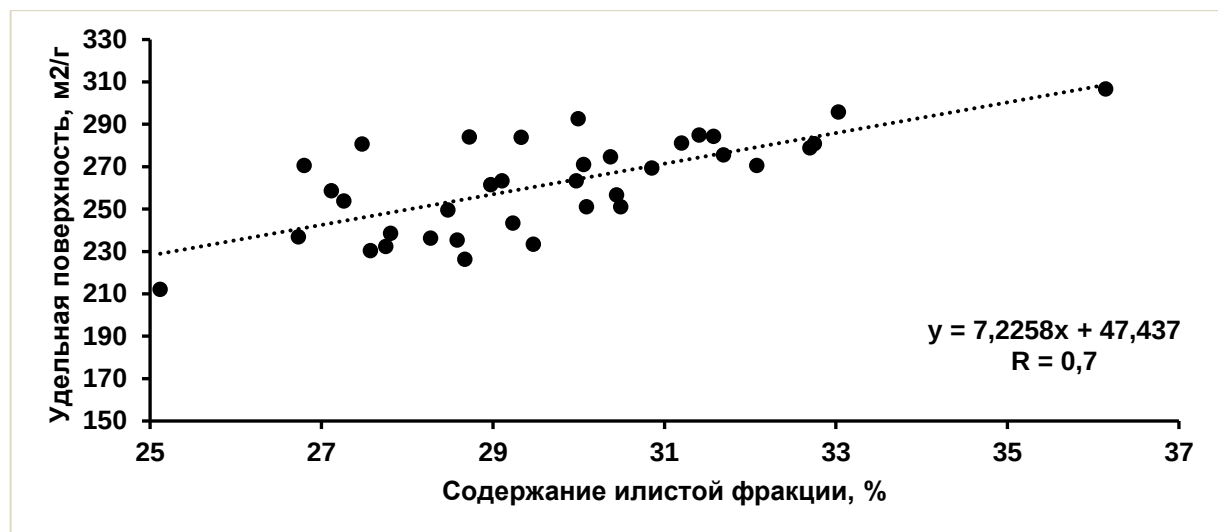


Рисунок 20 – Зависимость удельной поверхности почв анализируемых вариантов от содержания илистой фракции

Статистический анализ выявил наличие линейной зависимости между изучаемыми параметрами, которая описывается следующими уравнениями регрессии:

1. Для физической глины: $y = 5,51x - 18,11$ ($r = 0,78$).
2. Для илистой фракции: $y = 7,23x + 47,44$ ($r = 0,70$).

Полученные значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о сильной и тесной связи между содержанием дисперсных фракций и величиной удельной поверхности почв.

Как отмечено ранее, удельная поверхность напрямую определяет погло-
тительную способность почвенного комплекса, включая процессы сорбции и

закрепления гумусовых веществ. В связи с этим представляет научный и практический интерес установление корреляции между содержанием гумуса и удельной поверхностью в рамках исследуемых вариантов. Полученная зависимость визуализирована на рисунке 21.

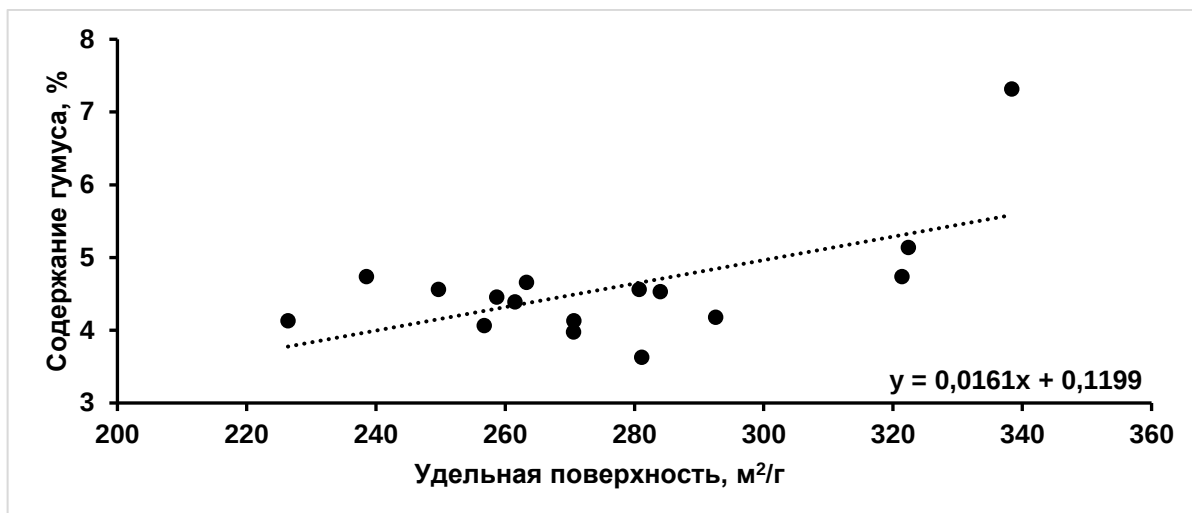


Рисунок 21 – Зависимость содержания в анализируемых почвенных образцах гумуса от величины удельной поверхности

Установлен линейный характер данной зависимости с коэффициентом корреляции $r = 0,60$ (умеренная, статистически значимая связь)

Таким образом, в результате проведенных исследований, мы установили, что под влиянием длительного применения удобрений происходит снижение содержания лессовой фракции на 14–23% в пахотном слое опытных вариантов относительно целины. Это свидетельствует о проявлении элементарного почвообразовательного процесса – лессиважа или внутripочвенного оглинивания. Рассчитаны значимые взаимосвязи между величиной удельной поверхности почвы и содержанием в ней гумуса, физической глины и илистой фракции.

4.ТРАНСФОРМАЦИЯ ППК ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕГО СТАЦИОНАРНОГО ОПЫТА

4.1. Физико-химические параметры

В XXI веке отмечается устойчивое снижение плодородия почвенного покрова всех регионов России, что связано с деградацией и загрязнением сельскохозяйственных земель, с развитием эрозии [1, 125, 156, 175]. Для рационального управления природными ресурсами необходимо проведение мероприятий по учету и контролю агрохимических показателей почвенного плодородия с последующим составлением рекомендаций по предотвращению деградации [66, 74]. С данной задачей справляется агрохимический мониторинг.

Результаты определения основных физико-химических параметров исследуемых образцов за годы наблюдения представлены в приложениях В–Е.

Известно, что почвенная кислотность играет ключевую роль в процессах почвообразования, влияя на химический состав почвы, доступность питательных веществ растениям, жизнедеятельность микроорганизмов и структуру самой почвы [147]. Протоны водорода, определяющие кислотность, поступают в раствор из различных источников, в частности, из угольной кислоты и множества органических кислот разной степени диссоциации. В зонах техногенного воздействия, значительным источником протонов могут выступать сильные неорганические кислоты, особенно серная и азотная. Кроме того, соединения Al, Fe и Mn, обладающие кислотными характеристиками, также способны повышать концентрацию протонов в почвенном растворе [7, 14]. Регулирование почвенной кислотности необходимо для повышения продуктивности и устойчивости агроэкосистем. Федеральный закон № 101-ФЗ «О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения» возлагает на правообладателей обязанность по контролю за уровнем кислотности почв как часть мер по обеспечению плодородия земель [120].

На рисунках 22–26 представлены результаты определения актуальной и обменной кислотности в почвенных образцах исследуемых вариантов.

Результаты исследований реакции среды свидетельствуют о том, что показатели pH водной и солевой вытяжки близки между собой и проявляют общую тенденцию к увеличению вниз по почвенному профилю. Также необходимо отметить закономерность к смещению актуальной и обменной кислотности в щелочную сторону в слое 60–100 см. В условиях опыта на величину pH оказывают влияние удобрения и дефека.

Исследования показали, что актуальная кислотность почвенного профиля за весь период варьировала в интервале 5,42–8,25 ед. pH, в то время как значения обменной кислотности находились в пределах 4,30–7,22 ед. pH.

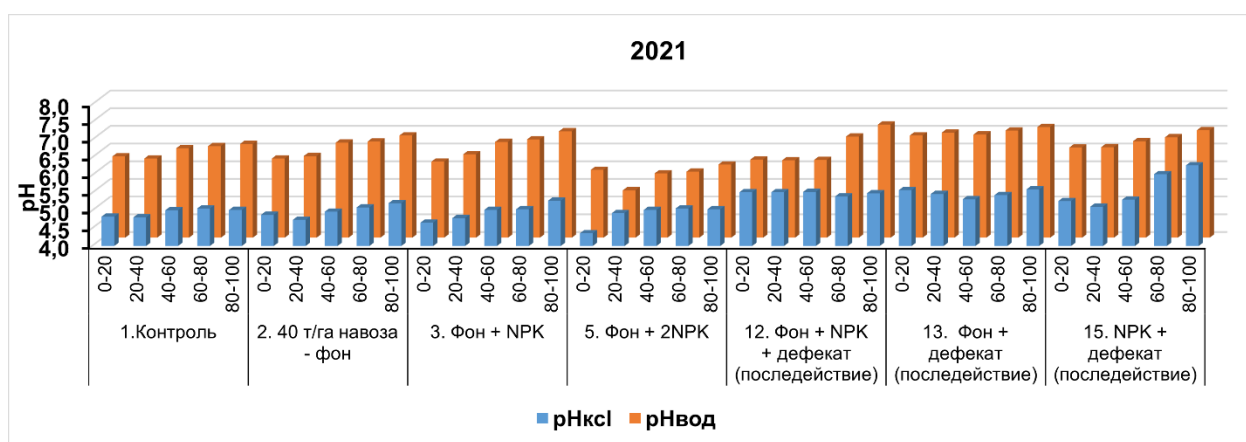


Рисунок 22 – Значение актуальной и обменной кислотности за 2021 год

В 2021 году диапазон значений актуальной кислотности ($pH_{\text{вод}}$) составил 5,92–7,20, а обменной кислотности (pH_{KCl}) 4,36–6,28 ед. pH. В слое 0–20 см минимальные значения $pH_{\text{вод}}$ (5,92 ед. pH) и pH_{KCl} (4,36 ед. pH) отмечены на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений по фону навоза (вар. 5), а максимальные (6,89 ед. pH и 5,58 ед. pH соответственно) на дефека-тированном варианте по органическому фону (вар. 13). В нижележащем слое 80–100 см наименьшее значение $pH_{\text{вод}}$ (6,07 ед. pH) также зафиксировано на варианте 5, а наибольшее (7,20 ед. pH) на варианте комплексного действия минеральных удобрений и дефеката по фону навоза (вар. 12), для pH_{KCl} наименьшее значение (5,02 ед. pH) наблюдается на контрольном варианте и наибольшее (6,28 ед. pH) отмечается на варианте с внесением минеральных удобрений по последдействию дефеката (вар. 15).

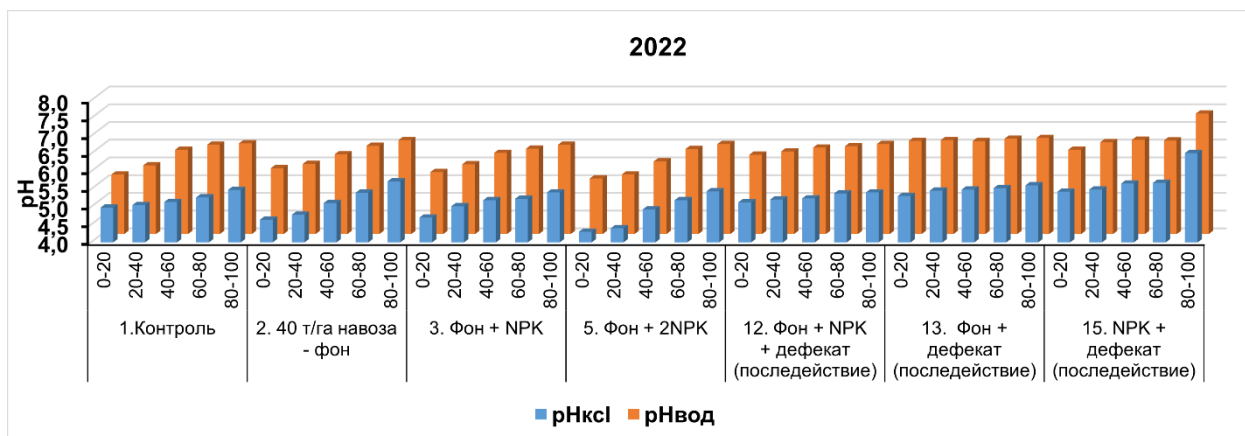


Рисунок 23 – Значение актуальной и обменной кислотности за 2022 год

В 2022 году диапазоны изменений кислотности составили: для $pH_{\text{вод}}$ 5,57–7,40 ед. pH, для pH_{KCl} 4,30–6,52 ед. pH. Анализ показал, что в слое 0–20 см оба показателя достигали пиков значений на одних и тех же вариантах: минимумов ($pH_{\text{вод}}$ 5,57 ед. pH; pH_{KCl} 4,30 ед. pH) на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5) и максимумов ($pH_{\text{вод}}$ 6,63 ед. pH; pH_{KCl} 5,3 ед. pH) на дефекарированном варианте по фону навоза (вар. 13). В слое 80–100 см максимальные значения $pH_{\text{вод}}$ (7,40 ед. pH) и pH_{KCl} (6,52 ед. pH) были зафиксированы на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15), тогда как минимальные значения $pH_{\text{вод}}$ (6,52 ед. pH) отмечались на унавоженном варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений (вар. 3) и pH_{KCl} (5,41 ед. pH) наблюдались сразу на двух вариантах 3 и 12.

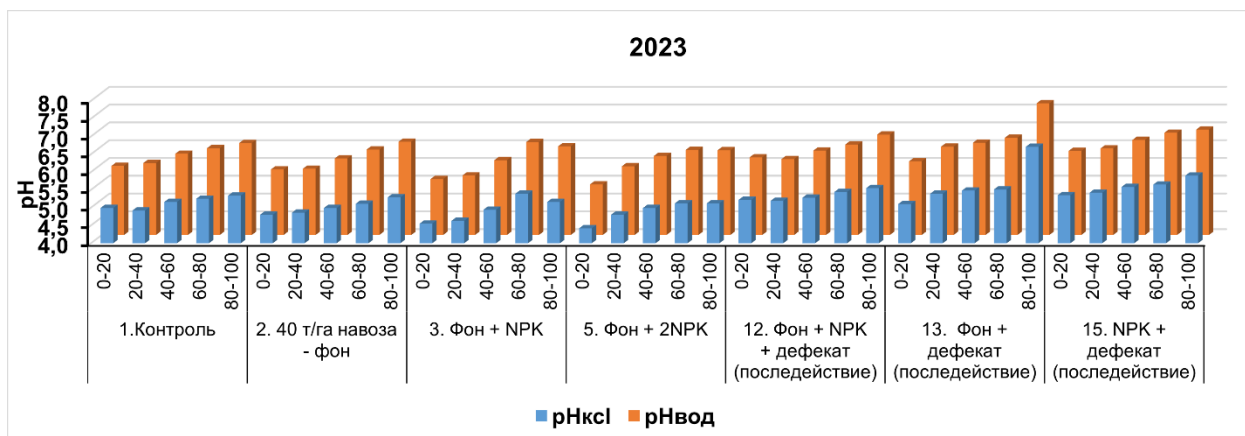


Рисунок 24 – Значение актуальной и обменной кислотности за 2023 год

В 2023 году пределы колебания кислотности составили $pH_{\text{вод}}$ (5,42–7,70 ед. pH) и для pH_{KCl} (4,42–6,71 ед. pH). В слое 0–20 см минимумы обоих показателей ($pH_{\text{вод}}$ 5,42 и pH_{KCl} 4,42) наблюдаются на унавоженном варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5), а максимумы (6,36 ед. pH и 5,35 ед. pH соответственно) отмечаются на варианте внесения минеральных удобрений по последствию дефеката (вар.15). В слое 80–100 см максимальные значения (7,70 ед. pH и 6,71 ед. pH) отмечены на варианте совместного последствия дефеката и навоза (вар. 13), а минимальные (6,38 ед. pH и 5,12 ед. pH) на варианте 5.

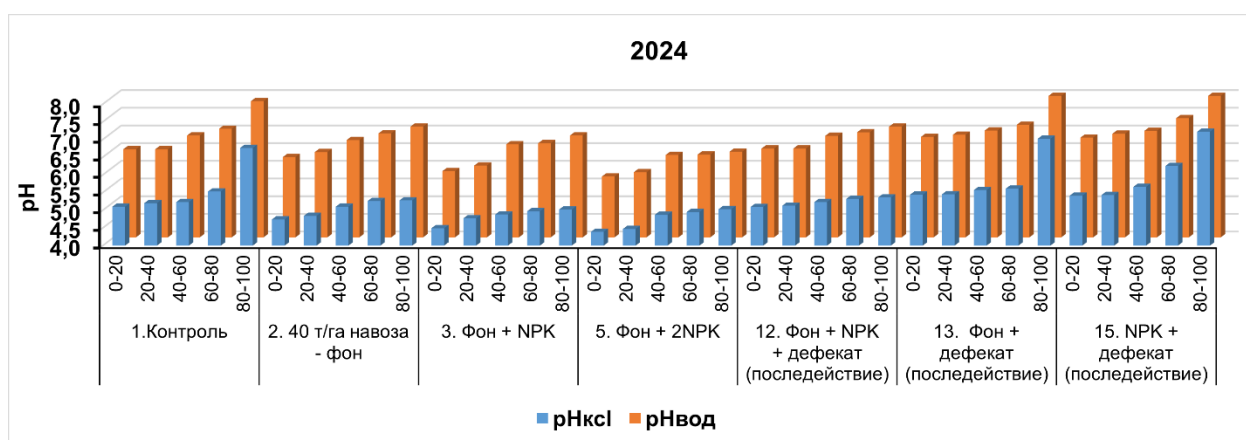


Рисунок 25 – Значение актуальной и обменной кислотности за 2024 год

Результаты 2024 года демонстрируют значительное расширение диапазонов кислотности по сравнению с предыдущими годами: $pH_{\text{вод}}$ 5,72–8,25 ед. pH и pH_{KCl} 4,39–7,22 ед. pH. В слое 0–20 см оба показателя достигают минимальных значений $pH_{\text{вод}}$ (5,72 ед. pH) и pH_{KCl} (4,39 ед. pH) на варианте с высокими дозами минеральных удобрений (вар. 5) и максимальных $pH_{\text{вод}}$ (6,84) и pH_{KCl} (5,44 ед. pH) на варианте совместного последствия дефеката и навоза (вар. 13). В нижележащем слое 80–100 см наибольшие значения для обеих форм кислотности (8,25 ед. pH и 7,22 ед. pH соответственно) отмечаются на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15). Минимальные значения отмечены на разных вариантах: для $pH_{\text{вод}}$ (6,42 ед. pH) на варианте 5, для pH_{KCl} (5,02 ед. pH) на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 3).

Кислотность по почвенному профилю – динамичный показатель, определяемый сложным взаимодействием факторов, изменяющихся с глубиной. Верхние горизонты, богатые органикой, имеют повышенную кислотность, обусловленную выделением органических кислот при разложении остатков и ионов H^+ корнями растений. По мере углубления в профиле возрастает роль выщелачивающих процессов: под действием техногенного подкисления (кислотные осадки, удобрения) происходит вынос кальция. Также на величину почвенной кислотности влияет динамика водно-солевого режима и сочетание повышенных температур с количеством осадков [72, 118].

Влияние удобрений и дефеката на кислотность почвы детально рассмотрено для слоя 0–40 см (рис. 26). Этот слой является ключевым для земледелия: в нём сосредоточена основная масса корней растений и питательных элементов, протекают важнейшие микробиологические процессы, а также проводится основная обработка почвы и внесение агрохимикатов. Анализ данного горизонта позволяет оценить эффективность применяемых агроприемов, определить оптимальные дозы удобрений и мелиорантов для повышения урожайности и снижения экологической нагрузки [153, 179, 189].

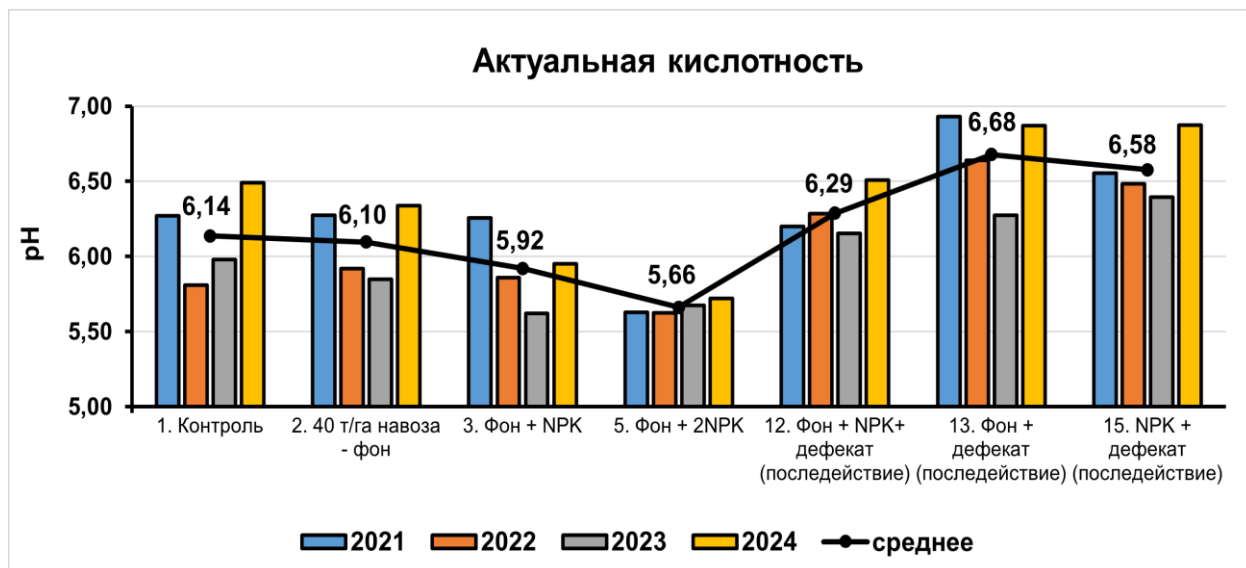


Рисунок 26 – Изменение актуальной кислотности в слое 0–40 см
за 2021–2024 годы ($НСР_{05} = 0,23$)

Актуальная кислотность в слое 0–40 см варьировала в пределах 5,62–6,93 ед. рН со средними значениями 5,66–6,68 ед. рН. Минимальное значение

за период наблюдений 5,62 ед. рН зафиксировано в 2023 году на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3). Максимальное значение (6,93 ед. рН) отмечается в 2021 году на варианте совместного последействия дефеката и навоза (вар. 13).

Анализ усредненных показателей за период проведения исследований 2021–2024 годов свидетельствует о колебании изменений актуальной кислотности в сопоставлении с контрольным вариантом. Так, на фоновом варианте (вар. 2) наблюдается снижение на 0,04 ед. рН (- 0,71% относительно контроля), на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3) - 0,22 ед. (- 3,56%), а на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 5) - 0,48 (- 7,78%). На вариантах последействия дефеката наблюдается увеличение значения актуальной кислотности, так на варианте комплексного воздействия удобрений и дефеката (вар. 12) на 0,15 ед. рН (+ 2,40% по сравнению с контролем), на варианте совместного последействия органического фона и дефеката (вар.13) на 0,54 (+ 8,77%) и на варианте с использованием минеральных удобрений по последействию дефеката (вар.15) на 0,44 (+ 7,13%).

На рисунке 27 представлены средние значения обменной кислотности за анализируемый период исследований.

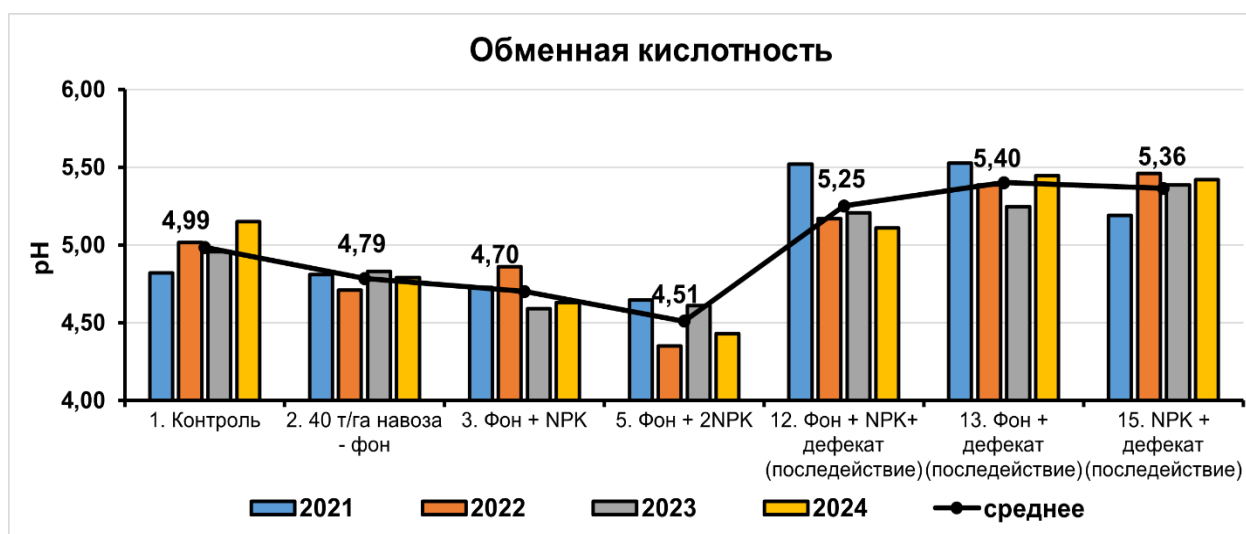


Рисунок 27 – Изменение обменной кислотности в слое 0–40 см за 2021–2024 годы ($HCP_{05}=0,20$)

Обменная кислотность изменялась в среднем 4,51–5,40 ед. рН, при диапазоне изменений 4,35–5,53 ед. рН. Минимальное значение кислотности 4,35 ед. рН отмечается в 2022 году на варианте с высокой дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), что соответствует категории сильно-кислых почв. Максимальное значение обменной кислотности 5,53 ед. рН отмечается в 2021 году на варианте совместном последствии дефеката и навоза (вар. 13), что соответствует категории слабокислых почв.

Сравним средние значения величины обменной кислотности по вариантам опыта. Так, на фоновом варианте (вар. 2) наблюдается снижение на 0,21 ед. рН (- 4,11% относительно контрольного варианта), на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3) - 0,29 ед. рН (- 5,79 %), а на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вариант 5) - 0,48 (- 9,64 %). На вариантах последствия дефеката наблюдается увеличение значения обменной кислотности. Так, на варианте комплексного воздействия удобрений и дефеката (вар. 12) на 0,26 ед. рН (+ 5,24%), на варианте совместного последствия органического фона и дефеката (вар. 13) на 0,41 (+ 8,22%) и на варианте с использованием минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15) на 0,37 (+ 7,49%) относительно контрольного варианта.

По усредненным показателям солевой вытяжки почва на вариантах 1, 2, 3 и 5 относится к категории среднекислых почв, а на вариантах с последствием дефеката (вар. 12, 13 и 15) – к категории слабокислых почв.

Таким образом, выявлено хорошо выраженный эффект подкисления на вариантах с применением органоминеральной системы удобрения (особенно 5 вариант). Дефекат даже в последствии стабилизирует актуальную и обменную кислотность в оптимальном диапазоне.

Одним из важнейших агрохимических показателей является гидролитическая кислотность (Нг) – это потенциальная кислотность почвы, которая определяется количеством ионов водорода и алюминия, удерживаемых почвенным поглощающим комплексом и вытесняемых при реакции с раствором

соли слабой кислоты и сильного основания, например, ацетатом натрия [167].

Результаты определения гидролитической кислотности представлены на рисунках 28–31. Применение удобрений и дефеката оказало существенное влияние на изменение величины гидролитической кислотности. Направленность этих изменений на вариантах с удобрениями и дефекатом следующая: если удобрения способствуют повышению, то дефекат обуславливает снижение величины гидролитической кислотности. В течение всего периода исследований гидролитическая кислотность демонстрировала значительные колебания, находясь в диапазоне 0,26–7,81 мг-экв/100 г почвы в метровом слое почвы.

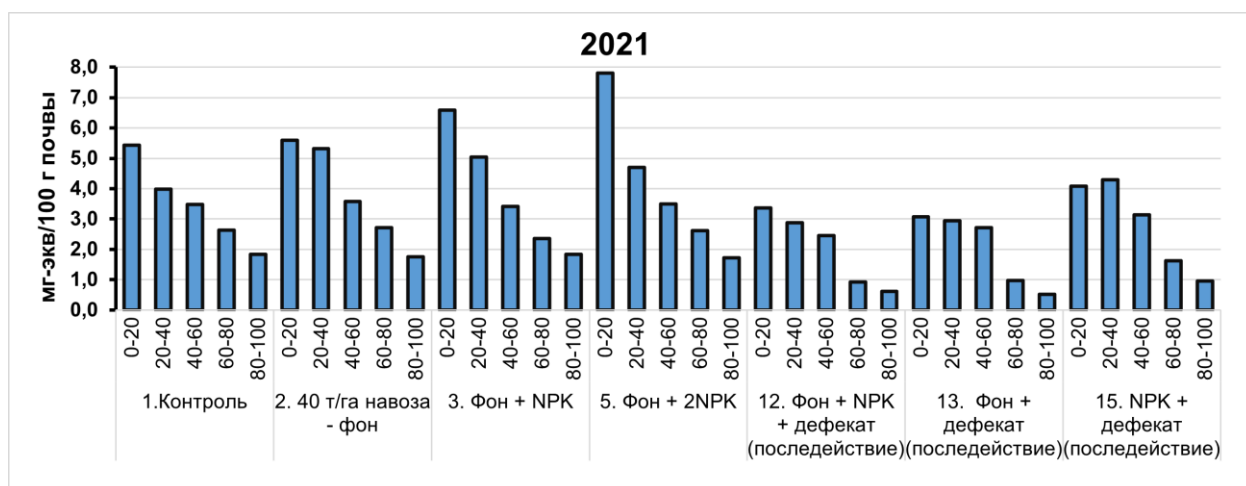


Рисунок 28 – Гидролитическая кислотность анализируемых образцов за 2021 год

Так, в 2021 году гидролитическая кислотность варьировала в пределах 0,62–7,81 мг-экв/100 г почвы: в слое 0–20 см её минимум (3,07 мг-экв/100 г почвы) наблюдался на варианте совместного действия минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12), а максимум (7,81 мг-экв/100 г почвы) на унавоженном варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар.5); в слое 80–100 см минимальное значение (0,62 мг-экв/100 г почвы) зафиксировано на варианте совместного последствия дефеката и навоза (вариант 13), а максимальное (1,84 мг-экв/100 г почвы) на унавоженном варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений (вар. 3).

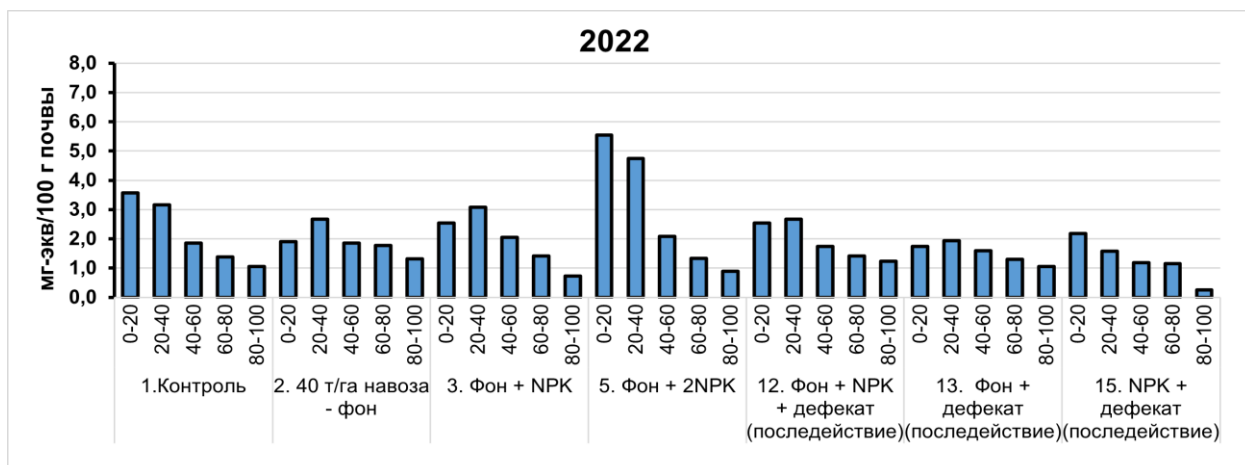


Рисунок 29 – Гидролитическая кислотность анализируемых образцов за 2022 год

В 2022 году диапазон значений гидролитической кислотности составил 0,26–5,54 мг-экв/100 г почвы. В верхнем слое 0–20 см максимальная кислотность (5,54 мг-экв/100 г почвы) отмечена на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений по унавоженному фону (вар.5), а минимальная (1,75 мг-экв/100 г почвы) на варианте последействия дефеката по органическому фону (вар. 13). В слое 80–100 см наименьшая кислотность (0,26 мг-экв/100 г почвы) отмечается на дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар.15), а наибольшая (1,31 мг-экв/100 г почвы) на фоновом варианте (вар. 2).

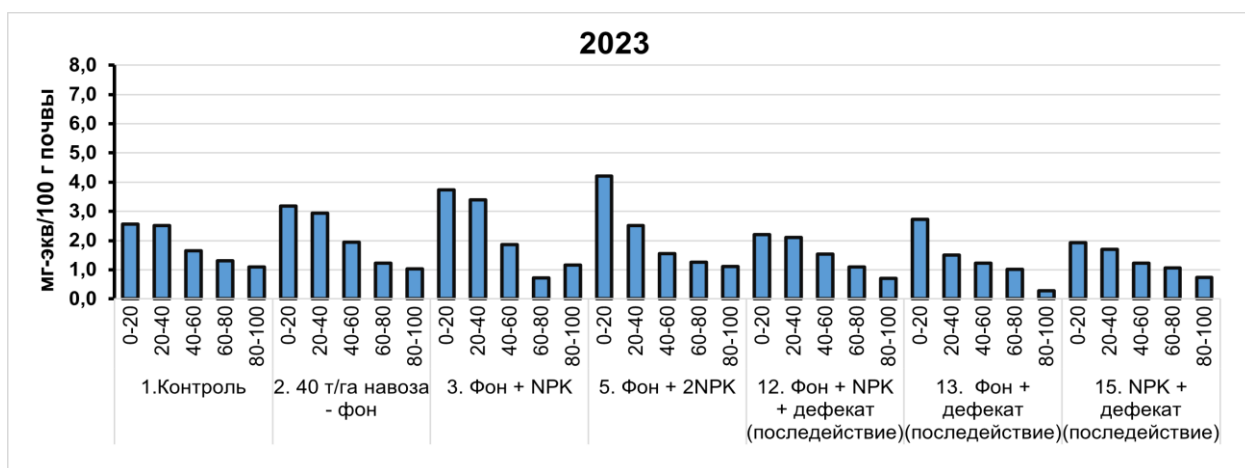


Рисунок 30 – Гидролитическая кислотность анализируемых образцов за 2023 год

В 2023 году общий уровень гидролитической кислотности был ниже, чем в предыдущие годы (0,28–4,21 мг-экв/100 г почвы). Анализ по почвенным

горизонтам показал, что в слое 0–20 см наибольшая кислотность (4,21 мг-экв/100 г почвы) была зафиксирована на унавоженном варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5), тогда как наименьшая (1,93 мг-экв/100 г почвы) на дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар.15). В нижележащем слое (80–100 см) минимальная величина (0,28 мг-экв/100 г почвы) отмечается на дефекатированном варианте по фону навоза (вар. 13), а максимальная (1,16 мг-экв/100 г почвы) на варианте с внесением минеральных удобрений по фону навоза (вар.3).

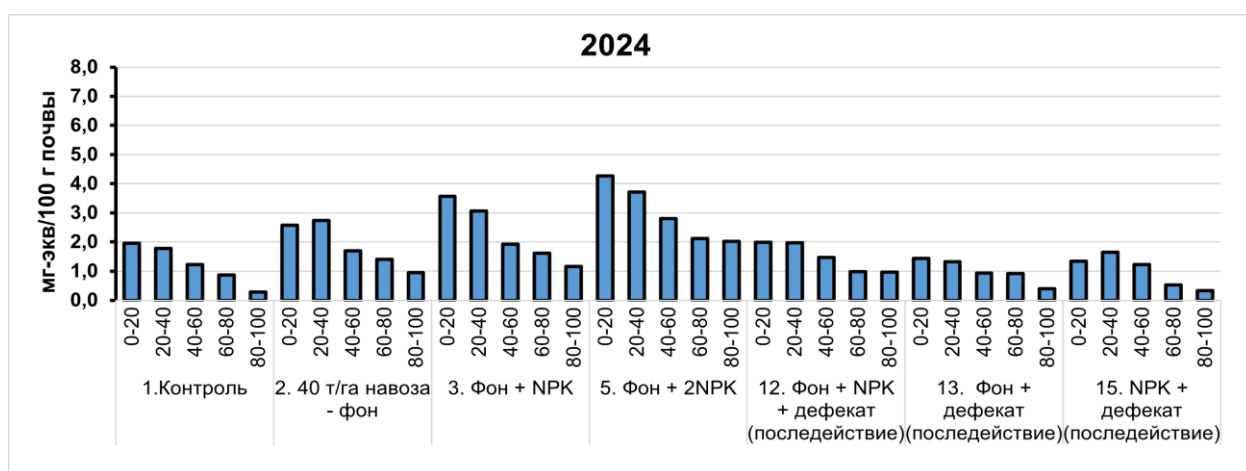


Рисунок 31 – Гидролитическая кислотность анализируемых образцов за 2024 год

В 2024 году гидролитическая кислотность варьировала в пределах 0,29–4,27 мг-экв/100 г почвы. В слое 0–20 см наиболее кислая реакция (4,27 мг-экв/100 г почвы) сформировалась, как и в предыдущие годы исследования, на варианте с высокими дозами минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), тогда как минимальная величина (1,34 мг-экв/100 г почвы) отмечается на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар.15). В слое 80–100 см минимальное значение кислотности (0,29 мг-экв/100 г почвы) зафиксировано на контрольном варианте, а максимальное (2,02 мг-экв/100 г почвы) вновь на варианте 5.

На рисунке 32 представлены значения гидролитической кислотности почвенного слоя 0–40 см.

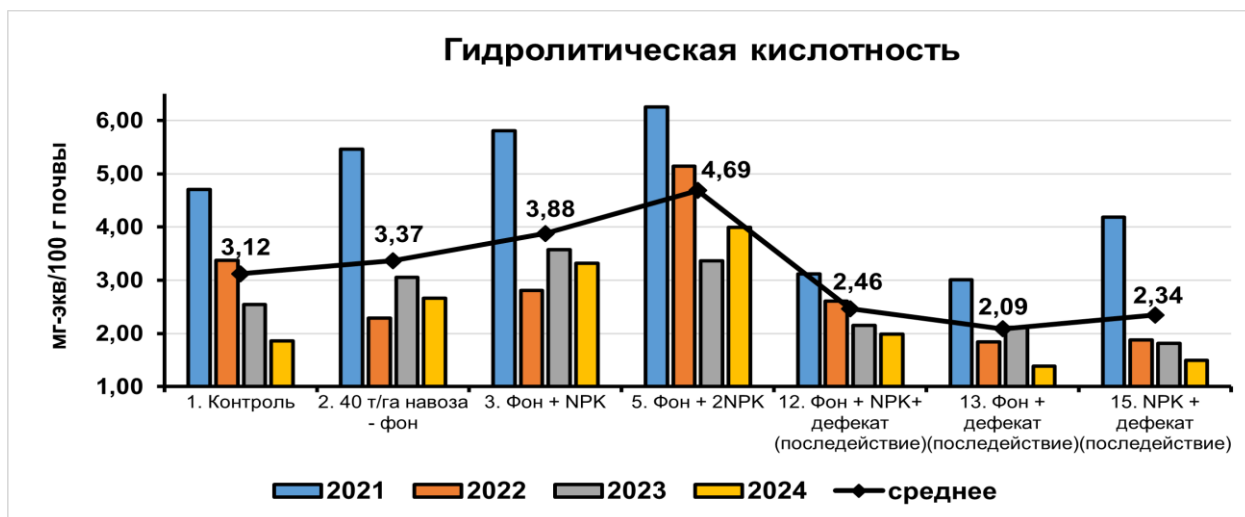


Рисунок 32 – Изменение гидролитической кислотности в слое 0–40 см по вариантам опыта за 2021–2024 годы ($HCp_{05} = 0,82$)

Гидролитическая кислотность варьировала от 1,38 до 6,26 мг-экв/100 г почвы со средними значениями 2,09–4,69 мг-экв/100 г почвы. Минимальное значение (1,38 мг-экв/100 г почвы) отмечается в 2024 году на варианте совместного последствия дефектата и навоза (вар. 13), максимальное значение (6,26 мг-экв/100 г почвы) зафиксировано в 2021 году на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5).

Анализ усредненных показателей значения гидролитической кислотности в течение проведения исследований свидетельствует об изменении в сравнении с контрольным вариантом. К примеру, на фоновом варианте (вар. 2) произошло увеличение показателя на 0,25 мг-экв/100 г почвы (+ 7,89%). На вариантах с внесением минеральных удобрений по унавоженному фону: с одинарной дозой (вар. 3) на 0,76 мг-экв/100 г почвы (24,28%), с двойной дозой (вар. 5) на 1,57 мг-экв/100 г почвы (50,24%). Напротив, на вариантах с последствием дефектата наблюдается снижение гидролитической кислотности: так, на варианте комплексного последствия дефектата с навозом и минеральными удобрениями (вар. 12) на 0,66 мг-экв/100 г почвы (21,02%), на варианте совместного последствия мелиоранта с органическим фоном (вар. 13) на 1,03 мг-экв/100 г почвы (33,1%), на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефектата (вар. 15) на 0,78 мг-экв/100 г почвы (24,9%).

По средним показателям гидролитической кислотности верхних

горизонтов почва на вариантах 1, 2 и 3 относится к категории слабокислых почв (IV класс кислотности), на варианте с высокой дозой минеральных удобрений (вар. 5) характеризуется как среднекислая (III класс кислотности почв), а на вариантах с последствием дефеката (вар.12, 13 и 15) почва относится к категории близких к нейтральным (V класс кислотности).

Если рассматриваемые выше параметры физико-химического состояния почвы достаточно динамичны во времени и пространстве, такие характеристики, как сумма поглощенных оснований, емкость катионного обмена и степень насыщенности основаниями, зачастую квалифицируются экспертами как относительно постоянные величины [38, 168]. В большинстве случаев это соответствует действительности, особенно в отношении черноземных почв, характеризующихся значительной устойчивостью к изменениям.

Однако нашими исследованиями установлено, что данные параметры почв достаточно динамичны и подвержены существенным изменениям по почвенному профилю под воздействием длительного применения удобрений и мелиоранта.

Сумма обменных кальция и магния (S) - ключевой показатель плодородия почвы. Высокое содержание этих оснований свидетельствует о благоприятных условиях: нейтральной реакции, хорошей структуре и доступности питания для растений, что способствует развитию корневой системы и продуктивности агроценозов [177].

Высокая сумма обменных оснований в черноземах формируется благодаря комплексу факторов: значительному содержанию гумуса, преобладанию тяжёлых фракций в гранулометрическом составе и генетически обусловленной высокой карбонатности почвообразующих пород (лессов и лессовидных суглинков) [153].

Сумма обменных оснований в анализируемых образцах за 2021 год варьирует от 23,9 до 29,33 мг-экв/100 г почвы; в 2022 году в диапазоне 20,33–30,00 мг-экв/100 г почвы; в 2023 году находилась в пределах 15,07–24,73 мг-экв/100 г почвы; в 2024 году варьировалась от 20,80 до 30,83 мг-экв/100 г

почвы, что характерно для дернового почвообразовательного процесса, протекающего на горных породах с высоким содержанием карбонатов кальция.

Данные изменения суммы обменных оснований вниз по почвенному профилю представлены на рисунке 33.

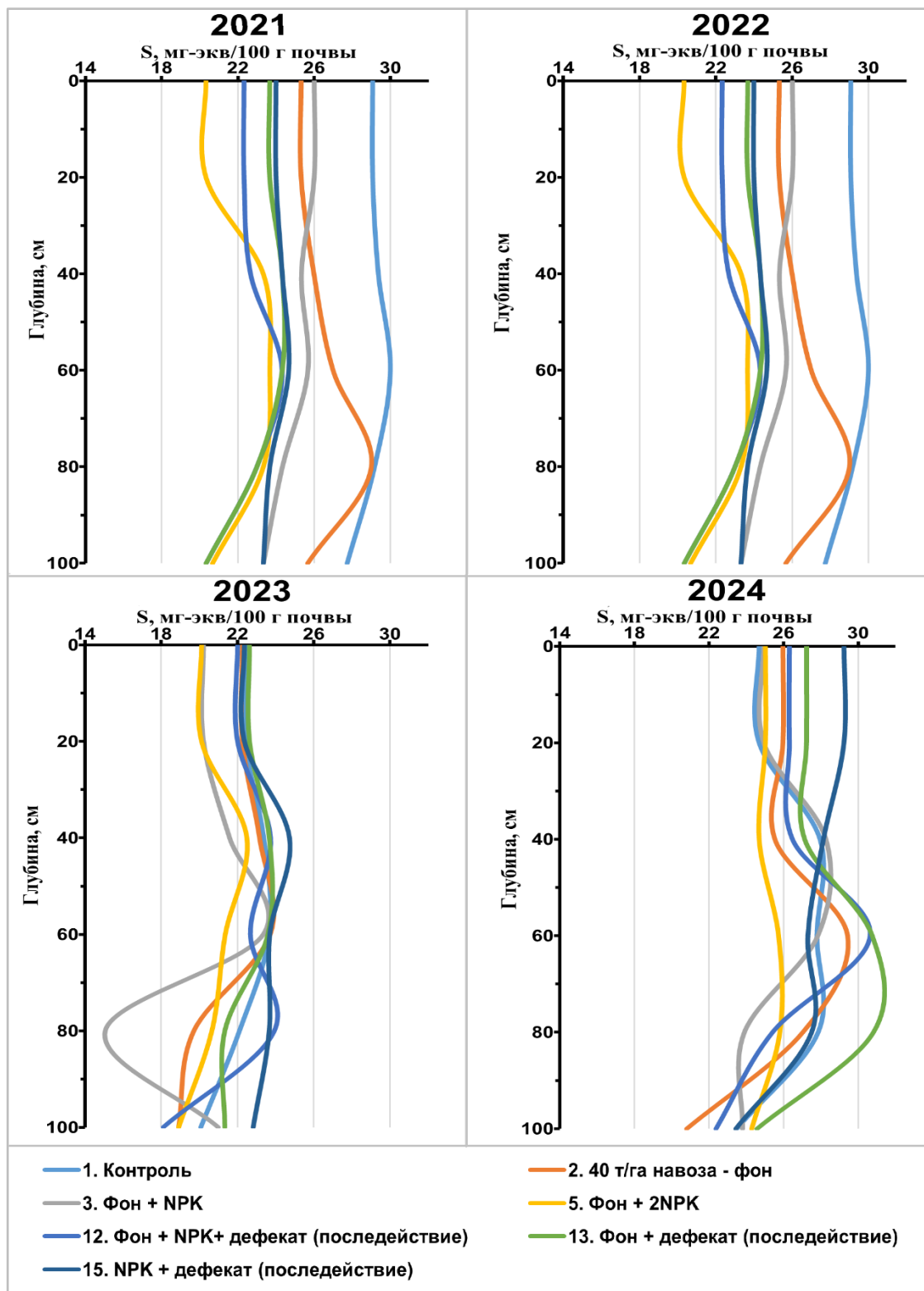


Рисунок 33 – Изменение профильного распределения суммы обменных оснований в исследуемых образцах

В 2021 году на всех исследуемых вариантах, за исключением вариантов 5 и 13, прослеживается закономерное увеличение содержания обменных оснований к середине профиля, что характеризует элювиально-иллювиальный тип профиля. На варианте с высокой дозой минеральных удобрений максимальное значение (26,33 мг-экв/100 г почвы) отмечается в слое 20–40 см. На дефекарованном по органическому фону варианте (вар.13) наблюдается равномерно-аккумулятивный профиль (плавное снижение значений вниз по почвенному профилю).

В 2022 году распределение суммы обменных оснований по почвенному профилю для большинства образцов имело элювиально-иллювиальный характер. Максимальные значения в средней части профиля (слой 40–60 см) зафиксированы на вариантах 1, 5, 12 и 15. На фоновом варианте (вар.2) максимальное содержание оснований (29 мг-экв/100 г почвы) наблюдается в слое 60–80 см. На варианте с совместным последствием дефеката и навоза (вар.13) наибольшее содержание (24,33 мг-экв/100 г почвы) наблюдалось в слое 20–60 см. Исключением стал унавоженный вариант с внесением одинарной дозы минеральных удобрений (вар.3), для которого было характерно аккумулятивно-элювиально-иллювиальное распределение с максимумом в пахотном слое (0–20 см), снижением в нижележащем горизонте и последующим ростом до 25,67 мг-экв/100 г почвы в слое 40–60 см.

В 2023 году наблюдалось более выраженное изменение суммы обменных оснований в почвенном профиле, однако на большинстве вариантов, как и в 2022 году, преобладал элювиально-иллювиальный тип распределения, но с максимальным содержанием в слое 20–40 см. На варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар.3) прослеживается аккумулятивно-элювиально-иллювиальный тип с наибольшим содержанием в середине почвенного профиля (23,37 мг-экв/100 г почвы) и резким спадом (до 15,07 мг-экв/100 г почвы) в слое 60–80 см, и затем увеличением в нижележащем горизонте. Наиболее отчетливое проявление аккумулятивно-элювиально-иллювиального типа распределения наблюдается на варианте совместного

воздействия дефеката и удобренного навозом фона в сочетании с внесением минеральных удобрений (вар. 12). В данном случае первоначально фиксируется увеличение суммы обменных оснований в слое почвы 20–40 см, после чего отмечается его снижение до уровня 22,67 мг-экв/100 г почвы. Затем вновь наблюдается повышение её до 23,93 мг-экв/100 г почвы, с последующим снижением до 18,10 мг-экв/100 г почвы в слое 80–100 см.

В образцах, отобранных в 2024 году, элювиально-иллювиальный характер распределения отмечается на вариантах 1, 3, 12 и 13. При этом максимальное содержание в слое 20–40 см наблюдается на контрольном (вар. 1) и унавоженном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 3). На варианте комплексного воздействия минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12) отмечается снижение (с 30,63 мг-экв/100 г почвы) в слое 40–60 см. На варианте совместного влияния последствия дефеката и органического фона (вар. 13) наблюдается максимальное содержание (30,83 мг-экв/100 г почвы) в слое 60–80 см. Аккумулятивно-элювиально-иллювиальный тип распределения наблюдается на оставшихся вариантах 2, 5 и 15. Плавное уменьшение, а затем рост в слое 40–60 см прослеживается на фоновом варианте (вар. 2) и варианте с двойной дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 5). На дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 15) наблюдается снижение и затем плавное увеличение в слое 60–80 см. Таким образом, характер распределения суммы обменных оснований по почвенному профилю является аккумулятивно-элювиально-иллювиальным.

Соотношение кальция и магния также имеет важное значение. Оптимальным считается соотношение Ca:Mg от 5:1 до 10:1 [162]. При нарушении этого соотношения, например, при избытке магния, может ухудшиться структура почвы, снизиться доступность фосфора и калия для растений [5, 166]. На рисунках 34–37 представлено изменение соотношения катионов кальция и магния.

В период 2021–2024 гг. наблюдались существенные изменения в составе обменных оснований почвы. Процентное содержание и соотношение катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в их общей сумме претерпевали значительные колебания, что свидетельствует о высокой динамике процессов, влияющих на катионный баланс почвы в это время.

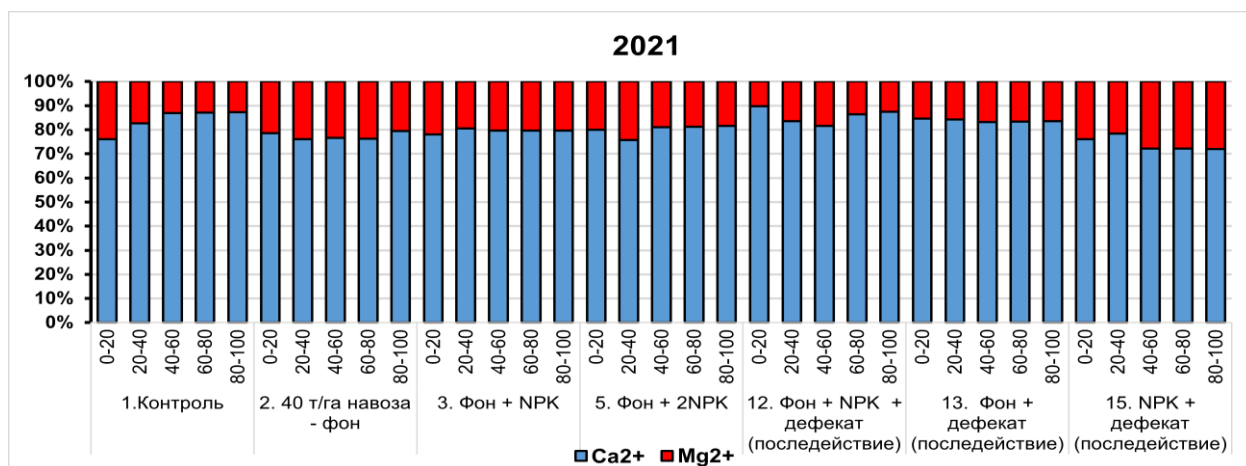


Рисунок 34 – Изменение доли содержания кальция и магния по вариантам опыта за 2021 год

В 2021 году в сумме обменных оснований наблюдалось значительное количественное преобладание кальция над магнием (рис. 34). Доля кальция составляла 72,1–89,9%, а магния - 10,1–27,9%, что формировало соотношение $\text{Ca}:\text{Mg}$ в диапазоне от 2,59 до 8,88. Наиболее низкое соотношение (2,59) было отмечено в глубоких слоях 40–100 см на варианте внесения минеральных удобрений по последствию дефеката (вар.15), где содержание магния достигало 6,93–7,02 мг-экв/100 г почвы. Напротив, максимальное соотношение (8,88) зафиксировано в слое 0–20 см на варианте комплексного применения минеральных, органических удобрений и последствия дефеката (вар.12) при минимальном содержании магния - 2,74 мг-экв/100 г почвы.

В 2022 году доля кальция в обменных основаниях составляла 70–97%, а магния 3–30%, при этом соотношение $\text{Ca}:\text{Mg}$ варьировало от 2,33 до 32,88 (рис. 35). Минимальное соотношение (2,33) наблюдалось на фоновом варианте (вар.2) в слое 60–80 см при содержании магния – 8,7 мг-экв/100 г почвы, а максимальное (32,88) на варианте с совместным применением дефеката и

органических удобрений (вар. 13) на глубине 80-100 см, где содержание магния было наименьшим – 0,6 мг-экв/100 г почвы.

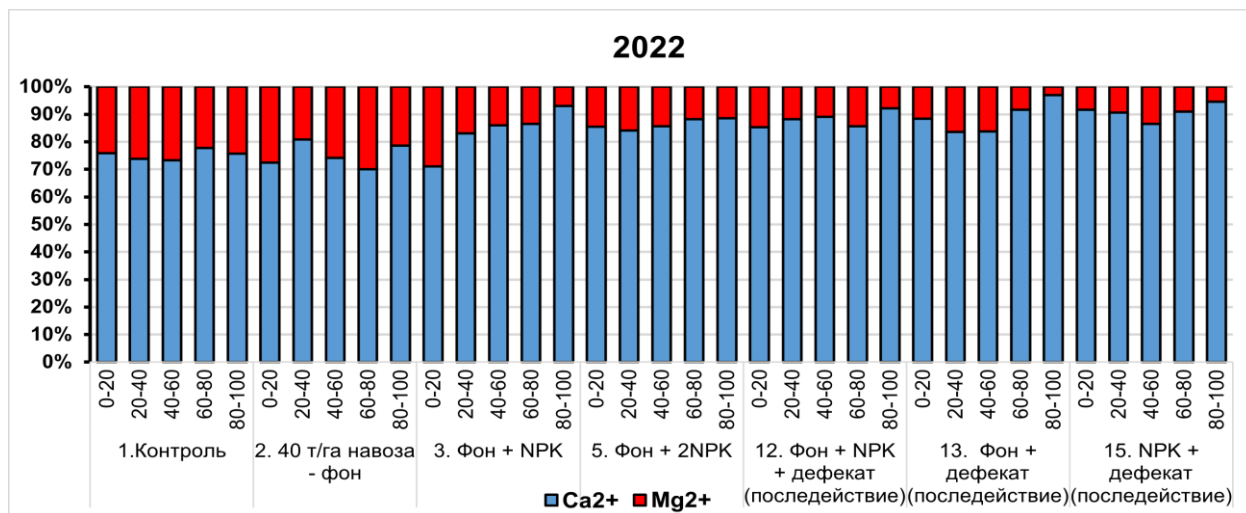


Рисунок 35 – Изменение доли содержания кальция и магния по вариантам опыта за 2022 год

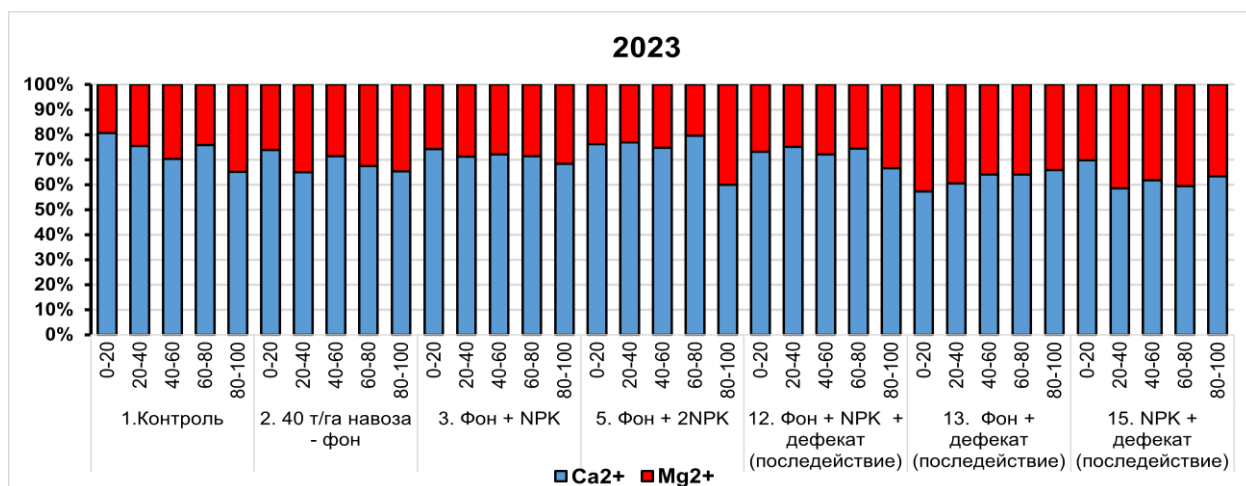


Рисунок 36 – Изменение доли содержания кальция и магния по вариантам опыта за 2023 год

В 2023 году количественное соотношение кальция и магния в почве изменилось: доля кальция снизилась до 57,3–80,7%, а магния возросла до 19,3–42,7%. Различие в их содержании сократилось до 1,34–4,17 раза. Наибольшее превосходство кальция (в 4,17 раза) зафиксировано в слое 0–20 см контрольного варианта (вар.1) с низким содержанием магния (4,33 мг-экв/100 г почвы), тогда как наименьшее (в 1,34 раза) на варианте последействия дефеката по фону навоза (вар. 13), где содержание магния было максимальным (9,66 мг-экв/100 г почвы).

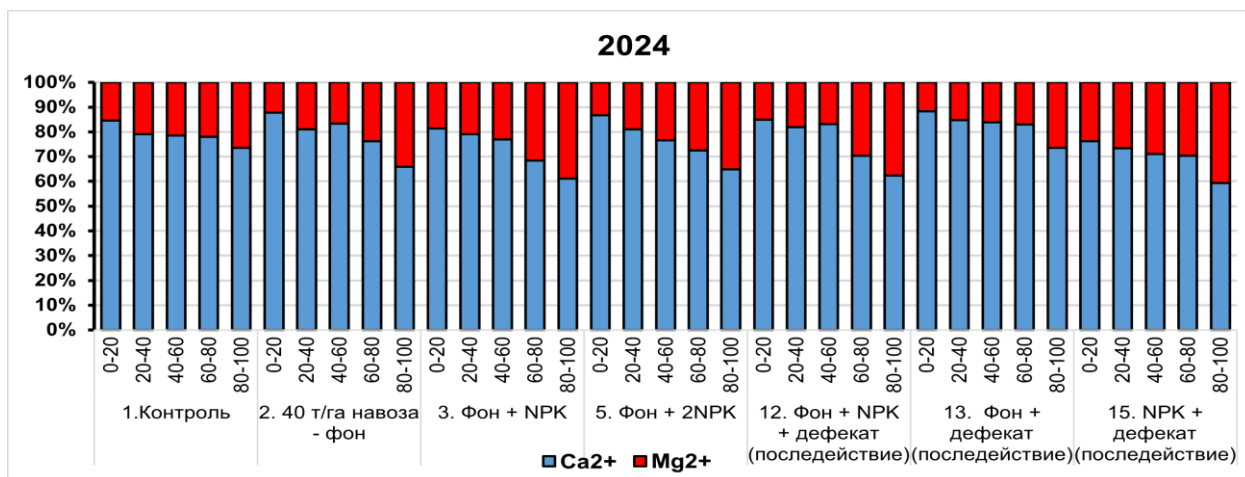


Рисунок 37 – Изменение доли содержания кальция и магния по вариантам опыта за 2024 год

В 2024 году диапазон значений для кальция составил 59,3–88,4%, а для магния 11,6–40,7% в общей сумме поглощённых оснований (рис. 37). Соотношение между ними варьировалось от 1,46 до 7,60 раза. Наименьшее соотношение (1,46 раза) наблюдается в слое 80–100 см на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15), где содержание магния достигало 9,53 мг-экв/100 г почвы. Напротив, максимальное соотношение (7,6 раза) отмечается в слое 0–20 см на варианте последствия дефеката по фону навоза (вар. 13) при минимальном содержании магния - 3,17 мг-экв/100 г почвы.

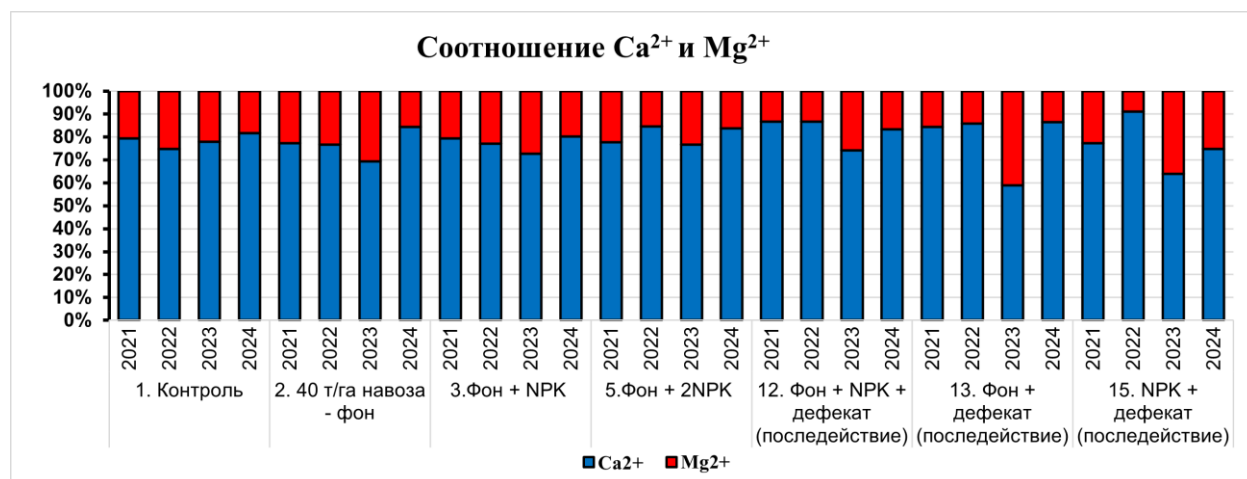


Рисунок 38 – Соотношение катионов кальция и магния в слое 0–40 см за 2021–2024 гг.

В слое 0–40 см соотношение Ca:Mg варьировало от 1,44 до 10,24, при этом доля кальция составляла 58,96–91,10%, а магния 8,90–41,04% (рис. 38).

Минимальное соотношение (1,44) зарегистрировано в 2023 году на варианте последствия дефеката по фону навоза (вар. 13) при содержании магния – 9,50 мг-экв/100 г почвы (что соответствует 41,04% от S). Максимальное соотношение (10,24) зафиксировано в 2022 году на варианте применения минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15) с низким содержанием магния – 2,15 мг-экв/100 г почвы (8,90%) и высоким содержанием кальция - 22,02 мг-экв/100 г почвы (91,10%).

На рисунке 39 представлено изменение суммы обменных оснований в слое 0–40 см различных вариантов опыта.

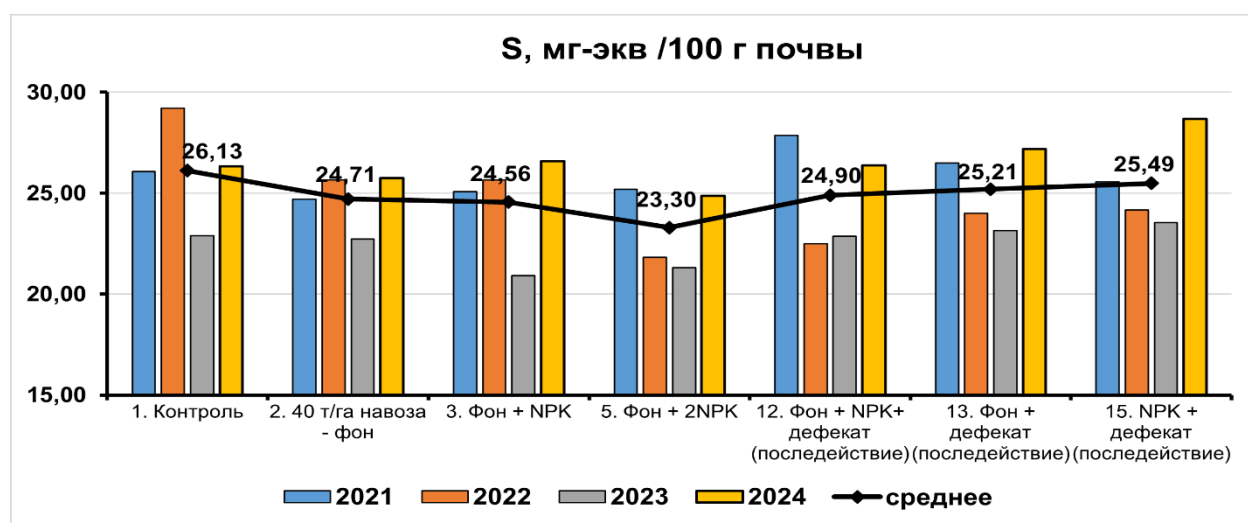


Рисунок 39 – Изменение содержания суммы обменных оснований исследуемых образцов в слое 0–40 см ($HCp_{05}=2,18$)

За период исследований 2021–2024 гг. выявлен широкий диапазон изменений в сумме обменных оснований почвы от 20,92 до 29,22 мг-экв/100 г почвы, при этом средние значения по годам колебались в пределах 23,30–26,13 мг-экв/100 г почвы. Максимальное содержание суммы обменных оснований зафиксировано в 2022 году на контрольном варианте, минимальное содержание наблюдается в 2023 году на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 3).

Анализ усредненных показателей суммы обменных оснований в течение проведения исследований свидетельствует об уменьшении содержания на всех вариантах опыта по сравнению с контрольным вариантом. Наибольшая негативная динамика наблюдалась при внесении минеральных удобрений: на

варианте с двойной дозой (вар. 5) снижение на 2,83 мг-экв/100 г почвы (-10,82% относительно контроля), на варианте с одинарной дозой (вар. 3) на 1,57 мг-экв/100 г почвы (-6,0%). Дефекатированные варианты показали минимальное снижение: вариант с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15) на 0,64 мг-экв/100 г почвы (-2,44%), вариант с внесением навоза по последствию дефеката (вар.13) на 0,92 мг-экв/100 г почвы (-3,53%), вариант комплексного внесения минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12) на 1,23 мг-экв/100 г почвы (-4,69%). Фоновый вариант (вар. 2) также привёл к уменьшению на 1,57 мг-экв/100 г почвы (-5,44%). По средним показателям суммы обменных оснований все варианты опыта характеризуются высокими значениями.

Способность почвы к катионному обмену обусловлена рядом ключевых факторов. Прежде всего, на нее влияет содержание почвенных коллоидов. Чем больше коллоидных частиц, что характерно для почв с более тяжелым гранулометрическим составом, тем выше становится адсорбционная емкость почвы. Второй важный фактор - состав почвенных коллоидов, определяемый их химической и минералогической природой [114, 150]. Глинистые минералы монтмориillonитовой группы демонстрируют более выраженную способность к удержанию катионов по сравнению с другими типами глинистых минералов. При этом гумусовые соединения обладают наибольшей поглотительной способностью по сравнению с другими почвенными компонентами. Наконец, уровень pH также играет роль. С уменьшением кислотности возрастает количество коллоидов с отрицательным зарядом, что, в свою очередь, ведет к увеличению емкости катионного обмена [109, 149, 155, 156].

Рассмотрим соотношение катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Hг в составе ЕКО за исследуемый период (рис. 40).

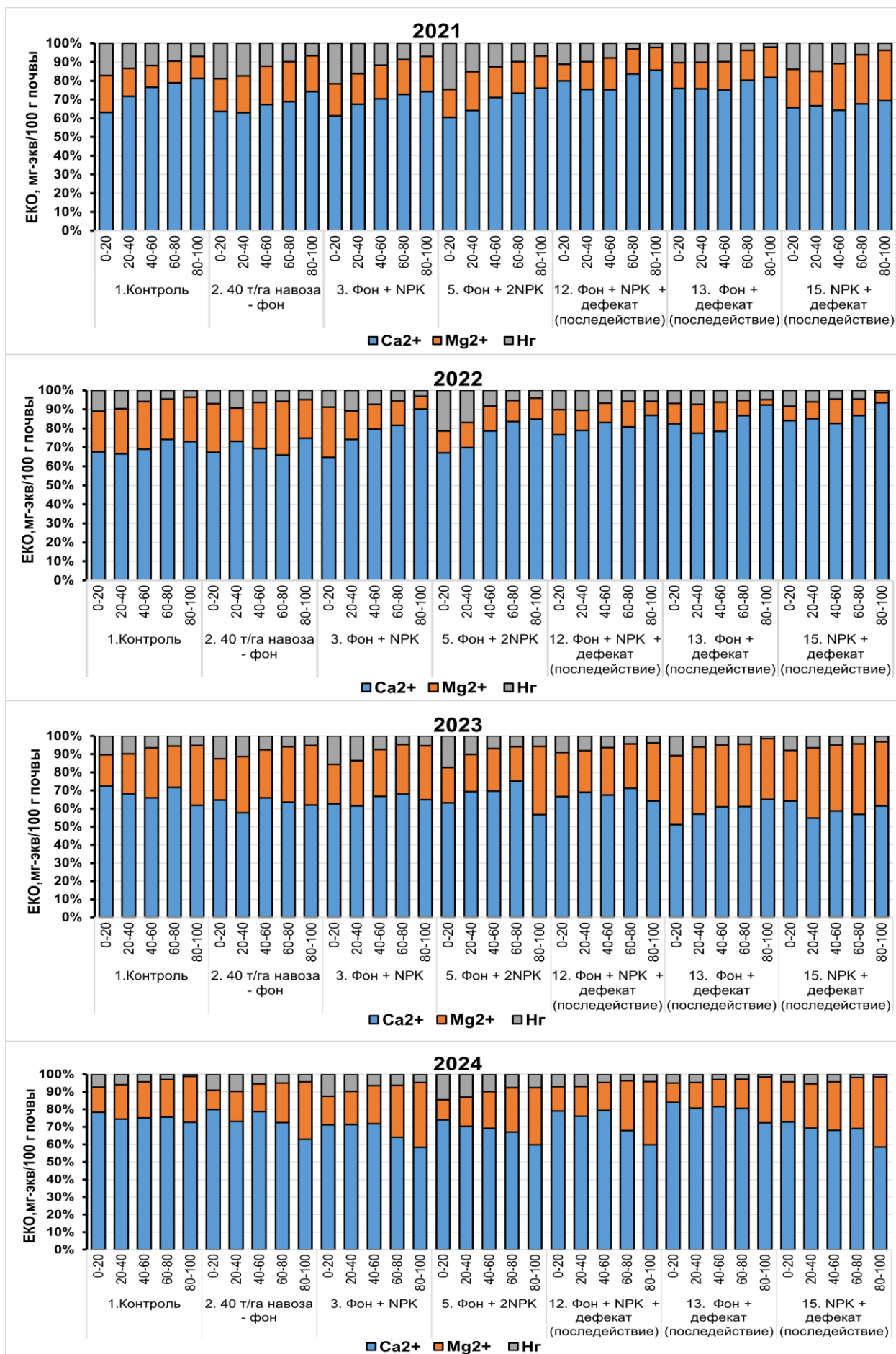


Рисунок 40 – Изменение состава ЕКО по вариантам опыта за 2021–2024 годы

Емкость катионного обмена зависит от общего количества поглощенных катионов почвой. Так, ЕКО в исследуемых образцах отбора 2021 года варьирует от 25,05 до 31,88 мг-экв/100 г почвы, а в исследуемых образцах 2022 находятся в границах 21,38–32,64 мг-экв/100 г почвы, в 2023 году (в чистом пару) в диапазоне 15,78–26,43 мг-экв/100 г почвы, в 2024 году 21,75–32,11 мг-экв/100 г почвы. Максимальное значение отмечается в верхних горизонтах (слой 0–20 см), снижение по почвенному профилю отмечается вследствие уменьшения количества H^+ и Al^{3+} (гидролитической кислотности).

Анализ имеющейся информации показывает, что доминирующим компонентом в структуре катионного обмена выступает ион кальция. В 2021 году доля Ca^{2+} в ЕКО колебалась в диапазоне от 60,5 до 85,7%, тогда как Mg^{2+} составлял 9,6–26,8 %, а $Нг$ 2,1–24,5%. В 2022 году наблюдалась следующая картина: содержание Ca^{2+} варьировалось от 64,9 до 93,6%, Mg^{2+} – от 2,8 до 28,3 %, и $Нг$ – от 1,1 до 21,4 %. Данные за 2023 год демонстрируют аналогичную тенденцию: концентрация Ca^{2+} находилась в пределах 51,1–75,1%, Mg^{2+} 17,3–38,8%, и $Нг$ 1,3–17,3%. В 2024 году содержание Ca^{2+} находилось в диапазоне 58,4–83,9%, Mg^{2+} – от 11 до 40,1%, и $Нг$ – 1,2 -14,6%.

На рисунке 41 представлены средние значения ЕКО в верхнем почвенном слое.

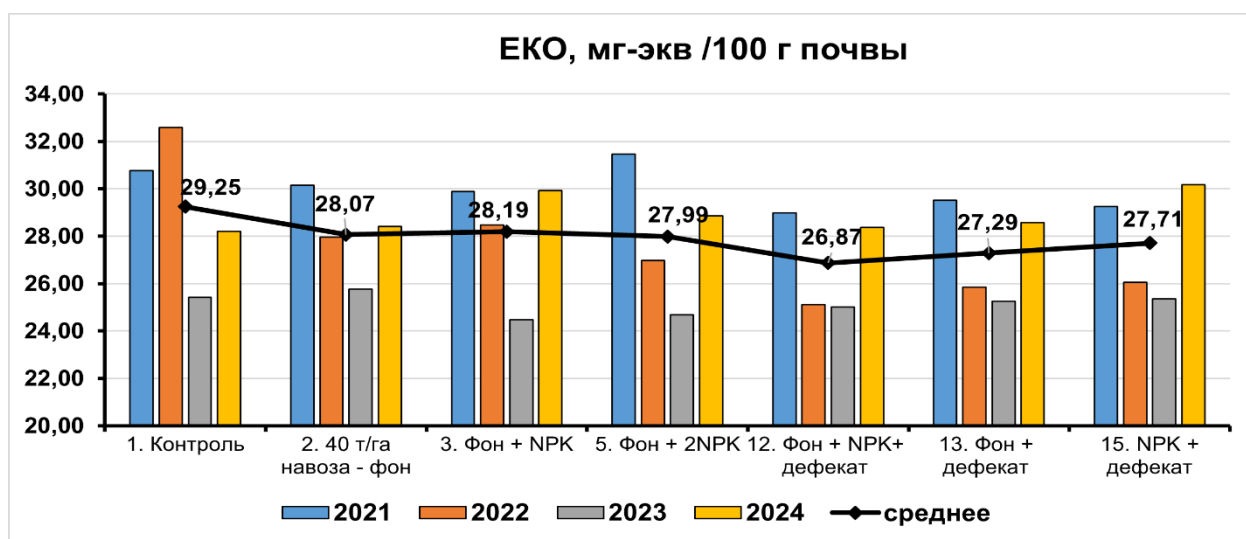


Рисунок 41 – Изменение емкости катионного обмена анализируемых почвенных образцов в слое 0–40 см ($HCP_{05} = 2,04$)

В анализируемом слое почвы ЕКО варьировалась в диапазоне 24,49–32,59 мг-экв/100 г почвы, при среднем колебании изменений 26,87–29,25 мг-экв/100 г почвы. Наибольшее значение ЕКО (32,59 мг-экв/100 г почвы) зафиксировано в 2022 году на контрольном варианте, минимальное содержание (24,49 мг-экв/100 г почвы) наблюдается в 2023 году на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3).

Анализ усреднённых данных показал снижение ЕКО на всех вариантах опыта относительно контроля. Максимальное уменьшение на 2,38 мг-экв/100 г почвы (до 91,86% от контроля) отмечено на варианте комплексного внесения минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12).

На вариантах с применением дефеката по органическому и минеральному фону (вар. 13 и 15) снижение ЕКО относительно контроля составило 1,96 и 1,54 мг-экв/100 г почвы соответственно. Внесение минеральных удобрений по органическому фону уменьшили ЕКО на 1,06 и 1,26 мг-экв/100 г почвы соответственно на варианте 3 и 5. В целом все варианты опыта характеризуются средними показателями ЕКО.

Степень насыщенности основаниями ($V\%$) отражает долю обменных катионов кальция, магния, калия и аммония в общей емкости ППК. Снижение данного показателя связано с насыщением ППК водородом и алюминием, при этом возрастает кислотность почвенного раствора. Это связано с естественными процессами (выщелачивание оснований, дегумификация) и антропогенными факторами (применение кислых минеральных удобрений). В кислых почвах возрастает подвижность токсичных элементов (Al^{3+} , Mn^{2+}), что негативно сказывается на росте растений и продуктивности агроценозов [1, 7, 73, 125, 126].

Изменение степени насыщенности основаниями в почвенном профиле показано на рис. 42.

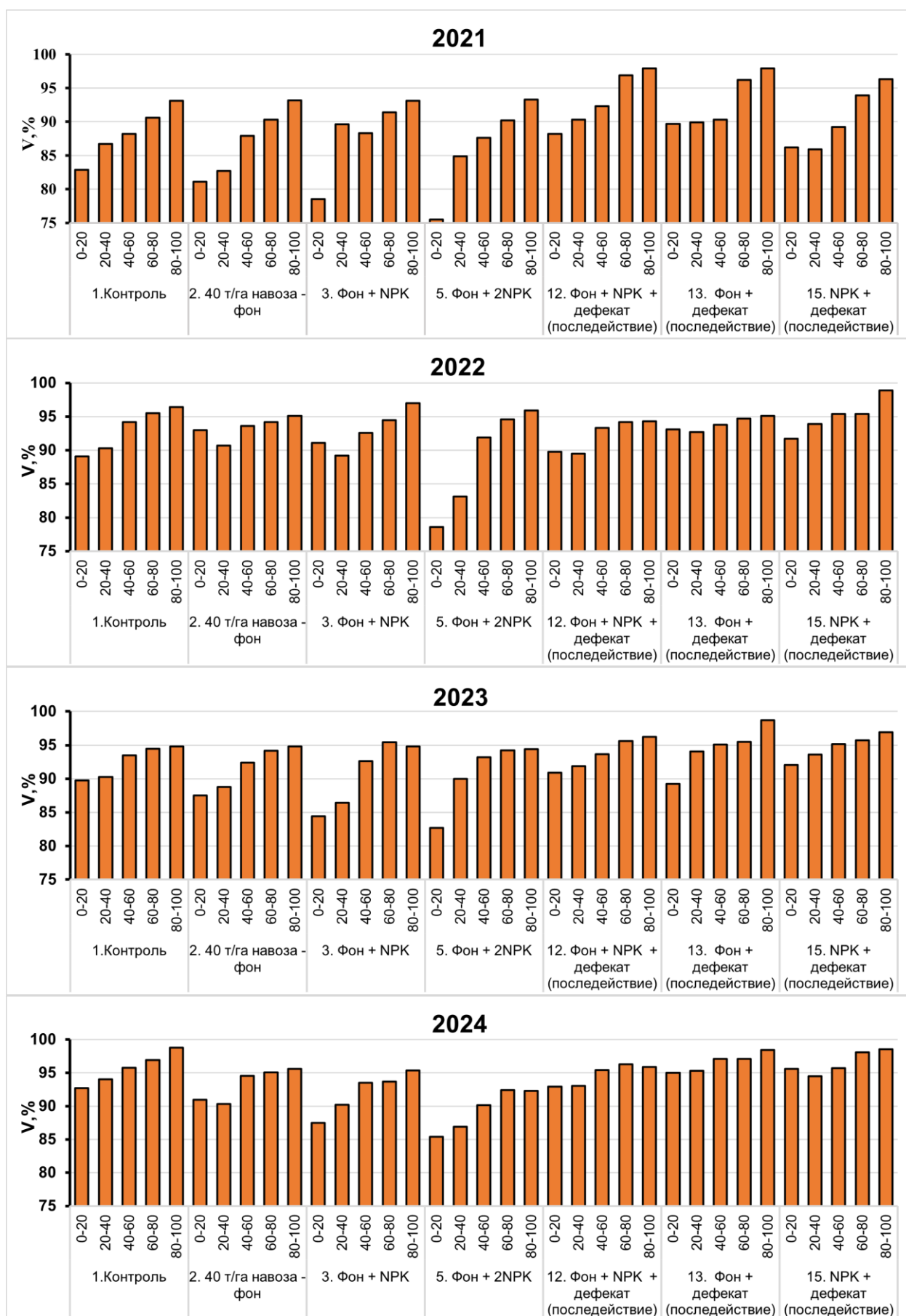


Рисунок 42 – Степень насыщенности основаниями в исследуемых почвенных образцах за 2021–2024 годы

Анализ изучаемого показателя демонстрирует широкий диапазон изменений от 75,5 до 98,9%. Например, в 2021 году варьировал в пределах 75,5–97,9%, наименьшее значение зафиксировано в слое 0–20 см на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), наибольшее значение в слое 80–100 см варианта совместного последействия дефеката и органического фона (вар. 13). В 2022 году данный параметр изменялся в диапазоне 78,6–98,9%, минимальное значение, как и в предыдущем году, наблюдалось в слое 0–20 см на варианте 5, максимальное отмечается в слое 80–100 см дефекатированного варианта с внесением минеральных удобрений (вар. 15). В 2023 году показатель варьировал от 82,71% до 98,7%. Наименьшее значение вновь было выявлено на варианте 5 в слое 0–20 см, наибольшее – на варианте 13 в слое 80–100 см. В 2024 диапазон колебаний составил 85,43–98,79%, наименьшая степень на варианте 5 в слое 0–20 см, наибольшая в слое 80–100 см на варианте с внесением минеральных, органических удобрений и дефеката (вар. 12).

Таким образом, минимальные показатели степени насыщенности основаниями отмечаются в верхних слоях на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений на фоне органических удобрений. Наибольшие показатели отмечаются в нижних слоях на дефекатированных вариантах (12, 13 и 15). Вниз по почвенному профилю отмечается увеличение степени насыщенности основаниями, что связано с материнской породой.

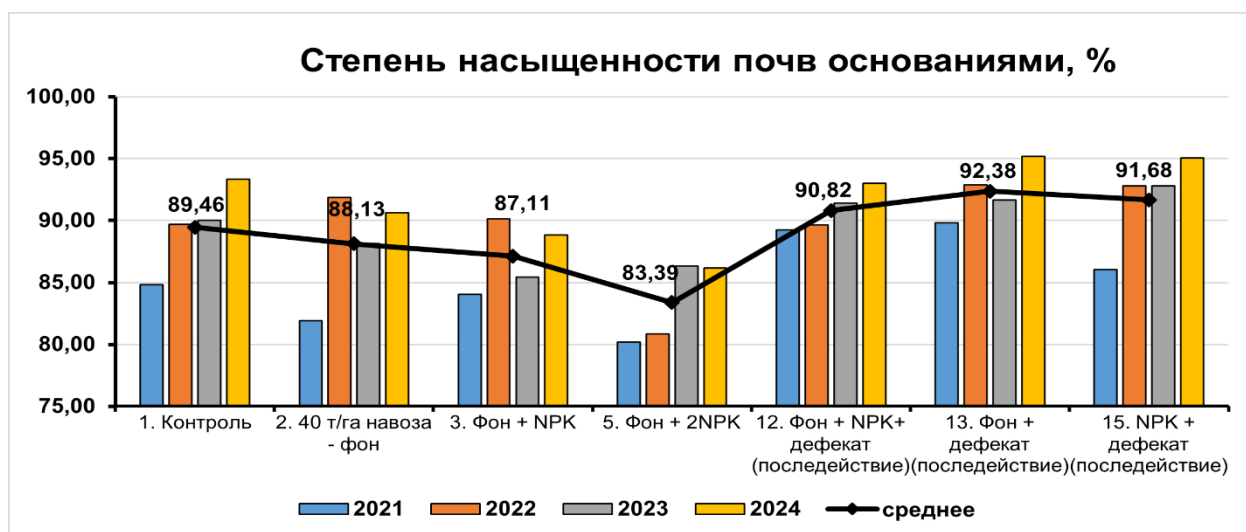


Рисунок 43 – Изменение степени насыщенности основаниями в слое 0–40 см

В слое 0–40 см степень насыщенности основаниями за период исследований изменялась в пределах 80,2–95,15%, при среднем диапазоне изменений 83,39–92,38% (рис.43). Минимальная степень (80,2%) наблюдается в 2021 году на варианте с высокой дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 5), наибольшая (95,15%) зафиксировано в 2024 году на варианте совместного последствия органического фона и дефеката (вар. 13).

При сравнении усредненных данных контрольного варианта с данными вариантов опыта установлено, что внесение дефеката способствует увеличению степени насыщенности основаниями, а использование минеральных удобрений по унавоженному фону приводит к ее уменьшению. К примеру, на фоновом варианте отмечается снижение степени насыщенности основаниями по сравнению с контрольным вариантом на 1,33%. На вариантах с внесением различных доз минеральных удобрений: с одинарной дозой (вар. 3) - 2,35%, с двойной дозой (вар. 5) - 6,07%. На вариантах опыта с последствием дефеката (вар.12, 13, 15) наблюдается увеличение степени насыщенности основаниями по сравнению с контрольным вариантом на 1,36–2,96%. Наибольшее повышение степени наблюдается на варианте совместного последствия дефеката и навоза (вар. 13).

Согласно средним значениям степени насыщенности основаниями все исследуемые варианты относятся к ненасыщенным почвам, при условии выращивания сахарной свёклы ($V > 93\%$), однако варианты опыта без внесения дефеката (вар. 1, 2, 3 и 5) характеризуются повышенной степенью, а варианты с последствием дефеката (12, 13 и 15) относятся к категории почв с высокой степенью обеспеченности.

В таблице 4 представлены результаты расчета коэффициент корреляции физико-химических показателей и климатических условий за годы наблюдений.

Таблица 4 – Корреляция климатических условий с физико-химическими параметрами почв

Корреляция	Показатель							
	pНвод	pНсол	Нг	Сумма	Кальций	Магний	ЕКО	Степень
Осадки	-0,97	-0,47	-	-0,85	-0,72	0,41	-0,73	-
ГТК	-0,94	-0,71	-	-1,00	-0,97	0,82	-0,95	-
Температура	0,64	-	-0,52	0,49	-	-	-	0,67

Установлено, что доминирующее влияние на физико-химические свойства почвы оказывает ГТК. Его увеличение приводит к подкислению, снижению содержания ионов кальция, суммы обменных оснований и ЕКО. Содержание магния при этом возрастает. Повышение температуры, наоборот, уменьшает почвенную кислотность и увеличивает насыщенность почвы основаниями. Данные закономерности полностью согласуются с классическими представлениями о миграции элементов в зависимости от гидротермического режима.

С целью выявления статистически значимых взаимосвязей между составом ППК, её кислотно-основными характеристиками и гранулометрией рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 5)

Таблица 5 – Корреляционный анализ основных показателей ППК с характеристиками почв

Показатели ППК	Физико-химические показатели								Гран. состав		
	pH	pНсол	Нг	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ЕКО	V, %	0,05-0,01	<0,00 1 мм	физ. глина
Ca ²⁺	0,55	0,68	-0,69	0,73	-	-	-	0,69	-0,56	-	-0,62
S	0,67	0,68	-0,73	-	0,73	0,56	-	0,79	-	-	-0,69
ЕКО	-0,42	-0,48	0,44	-	-	0,56	-	-	-	0,67	-
V, %	0,96	0,96	-0,99	0,79	0,69	-	-	-	-	-0,75	-0,77

Установлено, что кислотно-основное состояние почвы определяется балансом в ППК: оно прямо пропорционально насыщенности основаниями (V, %) и обратно пропорционально гидролитической кислотности (Нг). Доминирующую роль в формировании ёмкости ППК играет обменный кальций, однако с увеличением доли физической глины его вклад снижается, а роль кислотных катионов (H⁺, Al³⁺) возрастает, что и объясняет их преобладающее влияние на величину ЕКО в исследуемых почвах.

В рамках статистической обработки данных для моделирования зависимости ЕКО от факторов рН, S и гумуса был выполнен регрессионный анализ (табл.6).

Таблица 6 – Множественная регрессия

Множественный R	0,963859							
R-квадрат	0,929024							
Нормированный R-квадрат	0,927458							
Стандартная ошибка	0,833738							
Наблюдения	140							
Дисперсионный анализ								
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>			
Регрессия	3	1237,407	412,4691	593,3786	6,78E-78			
Остаток	136	94,53627	0,69512					
Итого	139	1331,943						
	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	8,916509	1,075095	8,293691	9,5E-14	6,790442	11,04258	6,790442	11,04258
Переменная X 1	-1,52009	0,163806	-9,27981	3,54E-16	-1,84402	-1,19615	-1,84402	-1,19615
Переменная X 2	0,989775	0,026786	36,95136	8,58E-73	0,936804	1,042746	0,936804	1,042746
Переменная X 3	0,470027	0,074093	6,343779	3,09E-09	0,323504	0,616549	0,323504	0,616549

В результате было получено уравнение множественной регрессии:

$$Y = 8,917 - 1,520 X_1 + 0,990 X_2 + 0,470 X_3,$$

где Y – емкость катионного обмена, X₁ – обменная кислотность; X₂ – сумма обменных оснований; X₃ – содержание органического вещества

Данная модель объясняет 92,9% всей вариации значений ЕКО в выборке.

Y-пересечение (8,917) показывает ту часть ЕКО, которая не объясняется включёнными в модель переменными (рН_{KCl}, S и ПОВ) и обусловлена минералогическим составом тонкодисперсной (глинистой и илистой) фракции почвы - в первую очередь, силикатными глинистыми минералами с постоянным зарядом. В анализируемых почвенных образцах чернозема выщелоченного малогумусного среднемощного пылевато-иловато-тяжелосуглинистого данная часть ЕКО реализуется следующими компонентами ППК: слюды, иллиты, монтмориллониты, хлориты. У этих минералов отрицательный заряд возникает из-за изоморфного замещения в кристаллической решётке (например, Al³⁺

замещает Si^{4+} в тетраэдрах, Mg^{2+} замещает Al^{3+} в октаэдрах). Этот заряд постоянен, не зависит от pH и является основой их высокой ёмкости. Кроме того, оксиды и гидроксиды железа и алюминия с переменным зарядом, зависящим от pH, в нейтральной и слабокислой среде чернозёмов также участвуют в формировании ёмкости. Аморфные минералы (аллофаны, имоголиты), обладая высокой удельной поверхностью, вносят существенный вклад в постоянную (константную) часть поглотительной способности. Это фоновый, базовый уровень плодородия, который достался почве «в наследство» от почвообразующей породы.

Коэффициент pH_{KCl} (-1,520) количественно подтверждает деструктивное влияние кислотности: каждое снижение pH на единицу приводит к потере 1,52 мг-экв/100 г ЕКО. Коэффициент суммы обменных показателей очень высокий и объясняется тем, что данный показатель напрямую определяет ЕКО. Коэффициент ПОВ, равный 0,47, определен ведущей ролью органического вещества в формировании ионообменной поглотительной способности почвы.

Данная математическая модель подтверждает классическую теорию о том, что ёмкость катионного обмена определяется минералогическим составом почвы, содержанием в ней гумуса и обменных оснований, а также почвенной кислотностью.

Полученная модель доказывает, что стратегия воспроизводства плодородия чернозема выщелоченного должна строиться на двух ключевых принципах: системе удобрения, насыщенной органикой, и регулировании почвенной кислотности с помощью кальцийсодержащих мелиорантов.

4.2. Агрохимические параметры

Литературные источники [16, 52, 111] подтверждают, что применение удобрений увеличивает содержание питательных элементов в почве, при этом мелиоранты и навоз могут улучшать доступность этих элементов, оптимизировать их баланс и снижать вымывание, а также улучшать структуру и водный режим почвы. Анализ источников показывает, что комплексное

использование удобрений и мелиорантов является наиболее эффективным методом для поддержания высокого и стабильного содержания элементов питания в почве [24-26, 69]. Результаты наших исследований по изучению влияния систем удобрения на содержание подвижных форм фосфора представлены на рисунке 44.

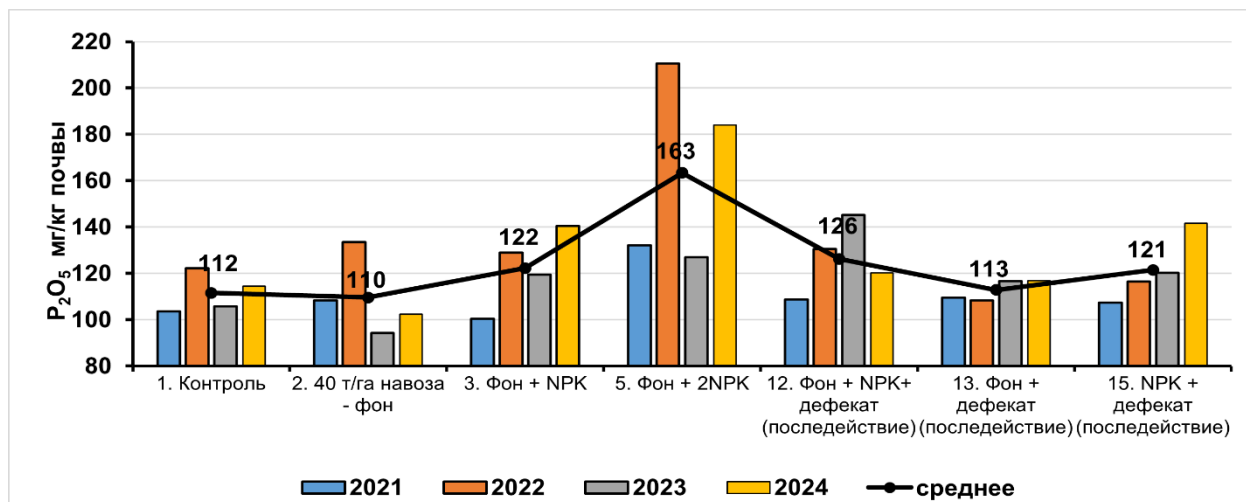


Рисунок 44 – Изменение содержания подвижных форм фосфора (по Чирикову) в слое 0–40 см анализируемых почвенных образцов ($НСР_{05} = 25,65$)

Из представленных данных видно, что в среднем за 2021–2024 гг. наибольшее содержание подвижных форм фосфора в слое почвы 0–40 см отмечается на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 5), минимальное содержание наблюдается на фоновом варианте (вар. 2). В 2021 году зафиксировано максимальное содержание подвижных форм фосфора – 211 мг/кг почвы, что соответствует очень высокому содержанию. Минимальное содержание - 94 мг/кг почвы отмечается в 2023 году на варианте 2, что относится к среднему классу обеспеченности.

Сравнение средних данных контрольного варианта и вариантов с внесением различных доз минеральных удобрений, органического фона и последствия дефеката указывает на увеличение содержания подвижных форм фосфора на всех вариантах, за исключением фонового варианта (вар. 2). На фоновом варианте наблюдается снижение подвижных форм фосфора на 2%. На варианте совместного последствия дефеката и органического фона (вар. 13)

наблюдается увеличение на 1%. На вариантах с внесением минеральных удобрений отмечается рост подвижных форм фосфора: с одинарной дозой (вар. 3) - 9% (на 10 мг/кг почвы), с двойной дозой (вар. 5) - 46% (на 51 мг/кг почвы), на варианте с последствием дефеката (вар. 15) - 8% (на 9 мг/кг почвы). На варианте комплексного воздействия минеральных удобрений, последствия дефеката по органическому фону (вар. 12) отмечается повышение подвижных форм фосфора на 13% (на 14 мг/кг почвы).

По средним показателям содержания подвижных форм фосфора по Чирикову практически все варианты опыта относятся к IV классу, что соответствует повышенному содержанию, однако вариант с внесением высоких доз минеральных удобрений (вар. 5) относится к V классу обеспеченности, что соответствует высокому содержанию подвижных форм фосфора.

Таким образом, внесение минеральных удобрений и мелиоранта способствует повышению содержания подвижных форм фосфора, что соответствует известным литературным данным.

Анализ содержания подвижного калия методом Чирикова выявил схожие закономерности его колебаний по вариантам опыта (рис. 45).

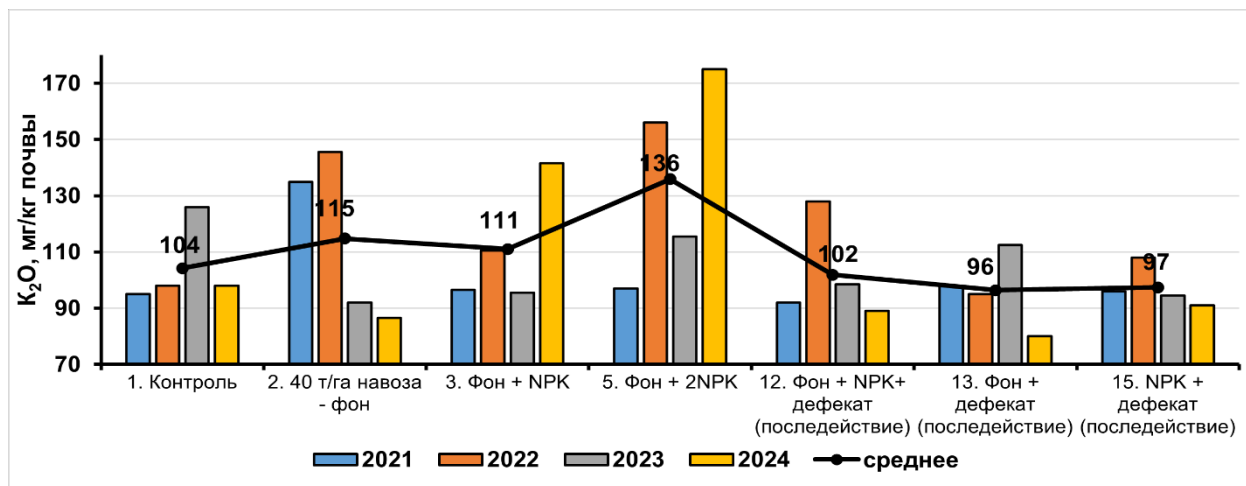


Рисунок 45 – Изменение содержания подвижных форм калия (по Чирикову) в слое 0–40 см исследуемых образцов ($НСП_{05} = 32,85$)

Изучение полученных данных за период с 2021 по 2024 годы демонстрирует, что наибольшая концентрация подвижных для растений форм калия зафиксирована в образцах с внесением двойной дозы минеральных удобрений

по фону навоза (вар. 5). Наименьшее же количество калия обнаружено на варианте совместного последействия дефеката и органического фона (вар. 13). Максимальное содержание подвижного калия в почве 175 мг/кг почвы зафиксировано в 2024 году на варианте 5, что соответствует высокому содержанию. Наименьшая концентрация подвижного калия (80 мг/кг почвы) наблюдается в 2024 году на варианте 13, что характеризуется средним содержанием.

Сравнение данных контрольного варианта со средними данными вариантов с внесением различных доз минеральных удобрений, органического фона свидетельствует об увеличении содержания подвижных форм калия на всех вариантах, за исключением вариантов с последействием дефеката (вар. 12,13,15), где наблюдается уменьшение концентрации подвижного калия. На вариантах с применением дефеката (вар. 12,13 и 15) отмечается уменьшение содержания на 2–8 мг/кг почвы (соответственно на 2–6%, так как калий и кальций являются ионами-антагонистами [16]). На варианте с внесением навоза (вар. 2) наблюдается повышение активности подвижного калия на 11 мг/кг (10%). На варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 3) отмечается увеличение на 7 мг/кг почвы (7% соответственно), на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5) – 32 мг/кг почвы (на 31%).

По средним показателям содержания подвижных форм калия по Чирикову контрольный, фоновый и известкованные варианты относятся к IV классу, что соответствует повышенному содержанию, однако варианты с дефекатом (вар. 12, 13 и 15) относятся к III классу и характеризуется средним содержанием.

Для анализа взаимосвязей между содержанием подвижных форм фосфора, калия и основными физико-химическими свойствами почв были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл.7).

Таблица 7 – Коэффициенты корреляции подвижных форм фосфора и калия с основными характеристиками почв

	pH _{вод}	pH _{сол}	Hг	S	V, %	Ca ²⁺	Фосфор /Калий	<0,001 мм	физ. глина
	Физико-химические параметры							Гран. состав	
Фосфор	-0,62	-0,53	0,67	-0,82	-0,73	-0,46	0,78	0,63	0,79
Калий	-0,90	-0,91	0,94	-0,85	-0,97	-0,69	0,78	0,71	0,80

На основе проведенного корреляционного анализа выявлено, что высокое содержание подвижных фосфора и калия характерно для кислых, ненасыщенных основаниями почв с тяжелым гранулометрическим составом. Это подтверждают сильные отрицательные связи с pH, степенью насыщенности (V%) и кальцием, а также положительные связи с кислотностью (Hг) и содержанием глины/ила. Калий демонстрирует более жесткую зависимость от кислотности (связи с pH и V%: $r > |0.9|$), чем фосфор.

4.3. Биологические показатели

Одним из важнейших биологических показателей потенциального плодородия почв является содержание в ней гумуса. Это консервативный показатель, который является классификационным и генетическим признаком почв и определяется в результате взаимодействия всех факторов почвообразования. Гумус является важнейшим компонентом ППК и выполняет огромное многообразие биоценотических функций. Он, благодаря сложнейшему химическому строению с большим набором функциональных групп, отвечает в первую очередь за физико-химическую поглотительную способность [8, 77]. Состав гумуса очень сложен и разнообразен. Особое значение для питания растений играет подвижное органическое вещество, которое является ближайшим резервом минеральных элементов, необходимых для питания растений. Оно представлено водо- и щелочерастворимыми фракциями [130, 175].

На фоне глобальных вызовов, связанных с изменением климата и ростом населения, вопросы сохранения и повышения плодородия почв становятся всё

более актуальными [9, 90]. Органическое вещество почвы является ключевым компонентом ее плодородия, определяющим способность поддерживать рост растений и устойчивость агроэкосистемы [206]. Черноземные почвы, известные своим высоким содержанием органического вещества, играют особую роль в мировом сельском хозяйстве, обеспечивая значительные урожаи зерновых, овощных и технических культур. Однако интенсивное земледелие, изменение климатических условий и ухудшение экологической обстановки приводят к истощению запасов органических веществ в почве, что ставит под угрозу её плодородие и стабильность агроэкосистем. Этим объясняется пристальное внимание ученых к проблеме всестороннего изучения органического вещества почв [52, 111, 121].

Предложено классифицировать органические вещества в почве на две основные группы: лабильные и консервативные (инертные) (см. рис. 46) [108].



Рисунок 46 – Агрономическая классификационная схема органического вещества почвы

К инертным органическим веществам относятся гуминовые кислоты, гумин и прочно связанные органо-минеральные соединения. Их высокая

устойчивость к разложению обеспечивает долговременное сохранение в почве и определяет её базовые свойства: структуру, цвет, буферность и ёмкость поглощения. Лабильное органическое вещество – это легкоразлагаемый компонент, включающий свежие растительные остатки (сахара, органические кислоты, липиды), а также слабо закреплённые гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК). Оно служит основным источником энергии и питательных элементов для почвенной биоты [15, 83].

Исследование динамики органического вещества в черноземах имеет важное научное и практическое значение. Изучение гумусового состояния черноземов Каменной Степи выявило, что за более чем 50 лет использования под пашню в пахотном слое изученных обыкновенных черноземов произошло уменьшение содержания гумуса на 0,24–0,71% от массы почвы [78]. Аналогичные данные по черноземам Каменной Степи приводятся в работах многих других исследователей [50, 57, 74].

Подобные исследования помогают выявить механизмы накопления и разложения органического вещества, определить влияние различных видов удобрений и мелиорантов на этот процесс, а также оценить эффективность используемых агротехнологий [88, 92, 94, 102]. Результаты такого рода исследований способствуют разработке научно обоснованных рекомендаций по рациональному использованию удобрений и мелиорантов, которые позволяют сохранить и повысить плодородие черноземных почв, обеспечивая стабильное производство сельскохозяйственной продукции. Длительный стационарный полевой опыт представляет уникальную возможность для детального анализа динамики органического вещества чернозема в ответ на длительное воздействие этих факторов [14, 39, 59, 156].

На рисунках 47–50 представлены изменение содержания гумуса исследуемых вариантов опыта за период 2021–2024 годов. Обнаружено, что содержание гумуса значительно изменяется по годам и вариантам опыта, что может быть связано как с метеорологическими факторами, так и со спецификой возделываемых культур и применяемой системы удобрения.

В течение периода исследования средние показатели содержания гумуса варьировали в пределах 1,07%–4,40% в метровом слое почвы. В 2021 году зафиксирован диапазон изменений 1,28%–4,61%, в 2022 году 1,20%–4,93%, в 2023 году 0,65%–4,39%, а в 2024 году 0,98%–4,37%. Наименьшее содержание гумуса по всем исследованным вариантам наблюдается в 2023 году, что обусловлено интенсификацией процесса минерализации органических компонентов в условиях чистого пара.

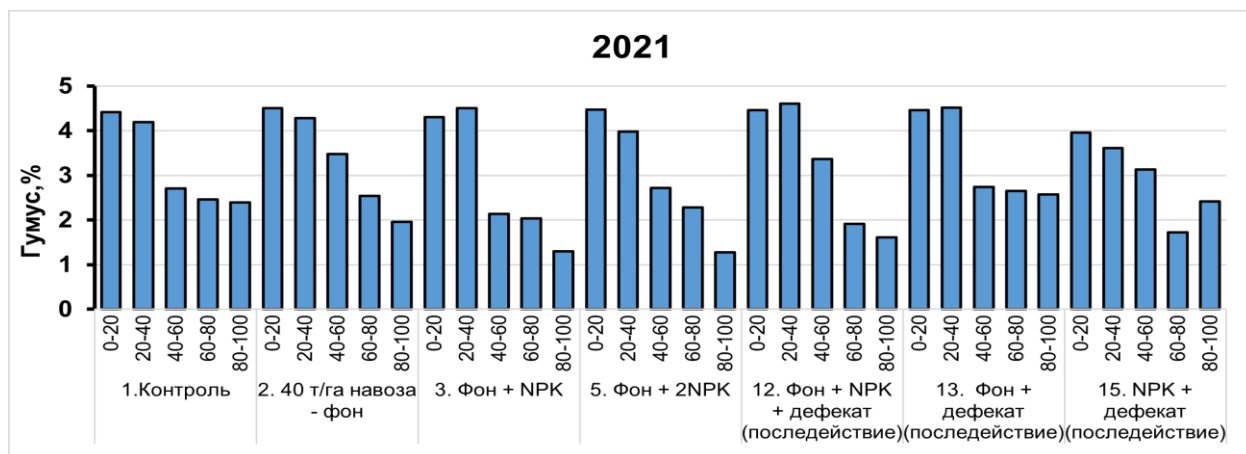


Рисунок 47 – Содержание гумуса в исследуемых почвенных образцах за 2021 год

В 2021 году низкое содержание гумуса (1,28%) зафиксировано в слое 80–100 см на унавоженном варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений (вар. 5). При этом наибольшее (4,61%) отмечено в слое 20–40 см на варианте с совместным внесением минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12).

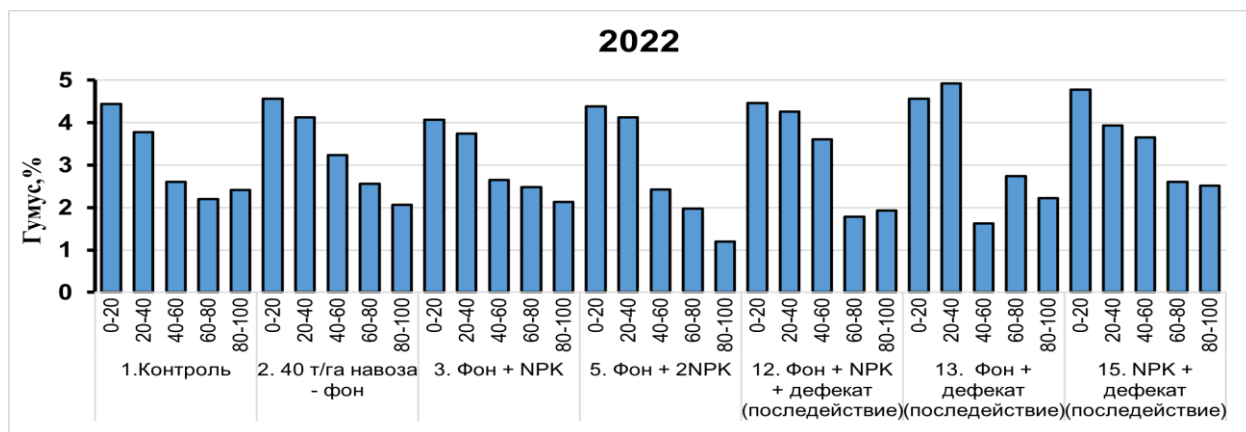


Рисунок 48 – Содержание гумуса в исследуемых почвенных образцах за 2022 год

2022 год подтвердил ранее установленную закономерность распределения гумуса по профилю: минимум (1,20%) вновь наблюдался в слое 80–100 см на варианте 5. Максимальное содержание гумуса (4,93%) наблюдается в слое 20–40 см на варианте совместного последействия дефеката по фону навоза (вар. 13).

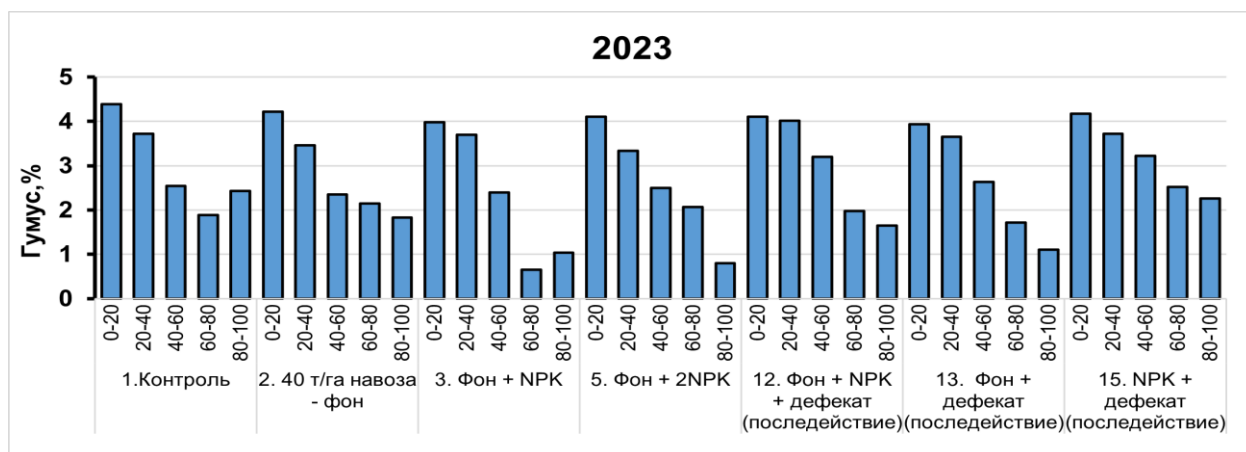


Рисунок 49 – Содержание гумуса в исследуемых почвенных образцах за 2023 год

В 2023 году общая картина изменилась. Минимальное за весь период исследований значение (0,65%) было отмечено в нижнем слое на варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар.3). Наибольшее же содержание гумуса (4,39%) зафиксировано в верхнем слое (0–20 см) контрольного варианта.

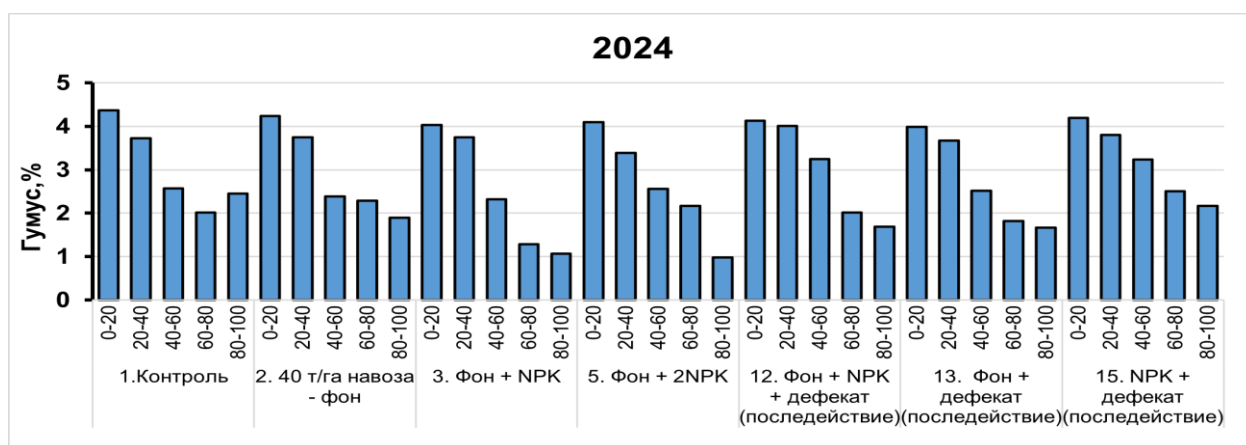


Рисунок 50 – Содержание гумуса в исследуемых почвенных образцах за 2024 год

В 2024 году тенденция 2023 года сохранилась. Минимальное содержание гумуса (0,98%) зарегистрировано на варианте 5 в слое 80–100 см, а

максимальное (4,37%) в слое 0–20 см контрольного варианта. Следует отметить, что различия между максимальными значениями в контрольном варианте за 2023 и 2024 годы статистически недостоверны и могут лежать в пределах погрешности метода.

Далее проведём детальный анализ влияния минеральных удобрений и дефектата на содержание гумуса в слое 0–40 см (рис. 51).

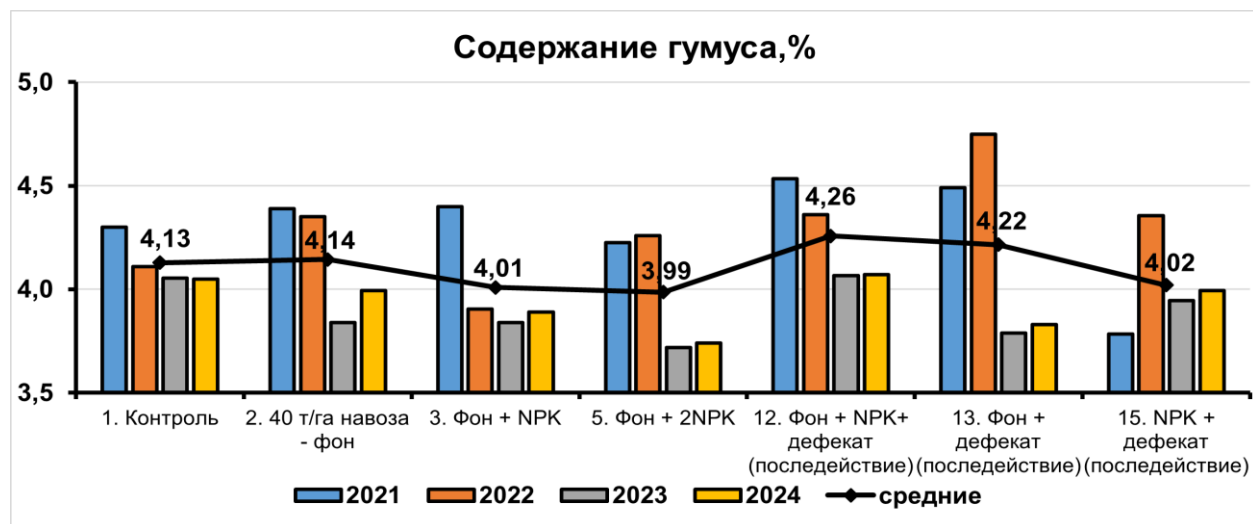


Рисунок 51 – Содержание гумуса в слое 0–40 см за период 2021–2024 годов ($HC_{05}=0,32$)

В среднем за период проведения исследований содержание гумуса в слое 0–40 см изменялось в диапазоне 3,99–4,26%, что относится к малогумусным почвам. Максимальное содержание гумуса – 4,75% отмечается в 2022 году в поле ячменя на варианте совместного последействия органического фона и дефектата (вар. 13), минимальное содержание – 3,72%, наблюдается в 2023 году на унавоженном варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5). Наиболее стабильные показатели гумуса по всем годам исследования наблюдаются на варианте 12.

Анализ усредненных значений содержания гумуса за период исследований показывает изменчивость относительно контрольного варианта. На дефектатированных вариантах по органическому фону 12 и 13 наблюдается увеличение содержания органического вещества на 0,09–0,13%, однако на вариантах с внесением минеральных удобрений 3, 5 и 15 прослеживается закономерное снижение содержания гумуса на 0,11–0,14%. На варианте комплексного

действия минеральных и органических удобрений и дефеката (вар. 12) отмечается увеличение содержания гумуса на 0,13% органического углерода (3,09%), на дефекарированном варианте с навозом (вар. 13) на 0,09 (2,06%). На вариантах с внесением минеральных удобрений прослеживается уменьшение: на дефекарированном варианте (вар. 15) на 0,11% (2,66%), с одинарной дозой по органическому фону (вар. 3) на 0,12% (2,94%), на варианте с двойной дозой (вар. 5) на 0,14% (3,48%).

В целом, за годы исследований минимальные показатели наблюдаются на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), наибольшие показатели отмечаются на варианте совместного последствия навоза и дефеката с внесением минеральных удобрений (вар.12).

Представляет научный и практический интерес изучение подвижного гумуса – легкоразлагаемой фракции органики, включающей свежие растительные остатки и продукты их распада. Эта фракция служит прямым источником питания растений и является чувствительным индикатором изменений почвенного плодородия при различных системах землепользования [31, 87].

Изменение содержания подвижного гумуса в различных вариантах исследования за период 2021–2024 годов продемонстрировано на рисунке 52. Содержание подвижного гумуса за период исследований находилось в почвенном профиле в пределах 0,05–2,16%. В динамике по годам диапазон составлял: 0–2,28% (2021 г.), 0,08–2,34% (2022 г.), 0–2,20% (2023 г.) и 0–2,25% (2024 г.). Анализ данных позволяет выявить значительные различия между изучаемыми вариантами. Наибольшая величина удельной поверхности зафиксирована в образце из верхнего горизонта залежного участка (338,3 м²/г). Контрольный вариант также показал высокий результат (321,4 м²/г), тогда как самый низкий показатель отмечен для фонового варианта (249,6 м²/г). Для залежного и контрольного вариантов наблюдается общая тенденция к снижению удельной поверхности с увеличением глубины отбора проб.

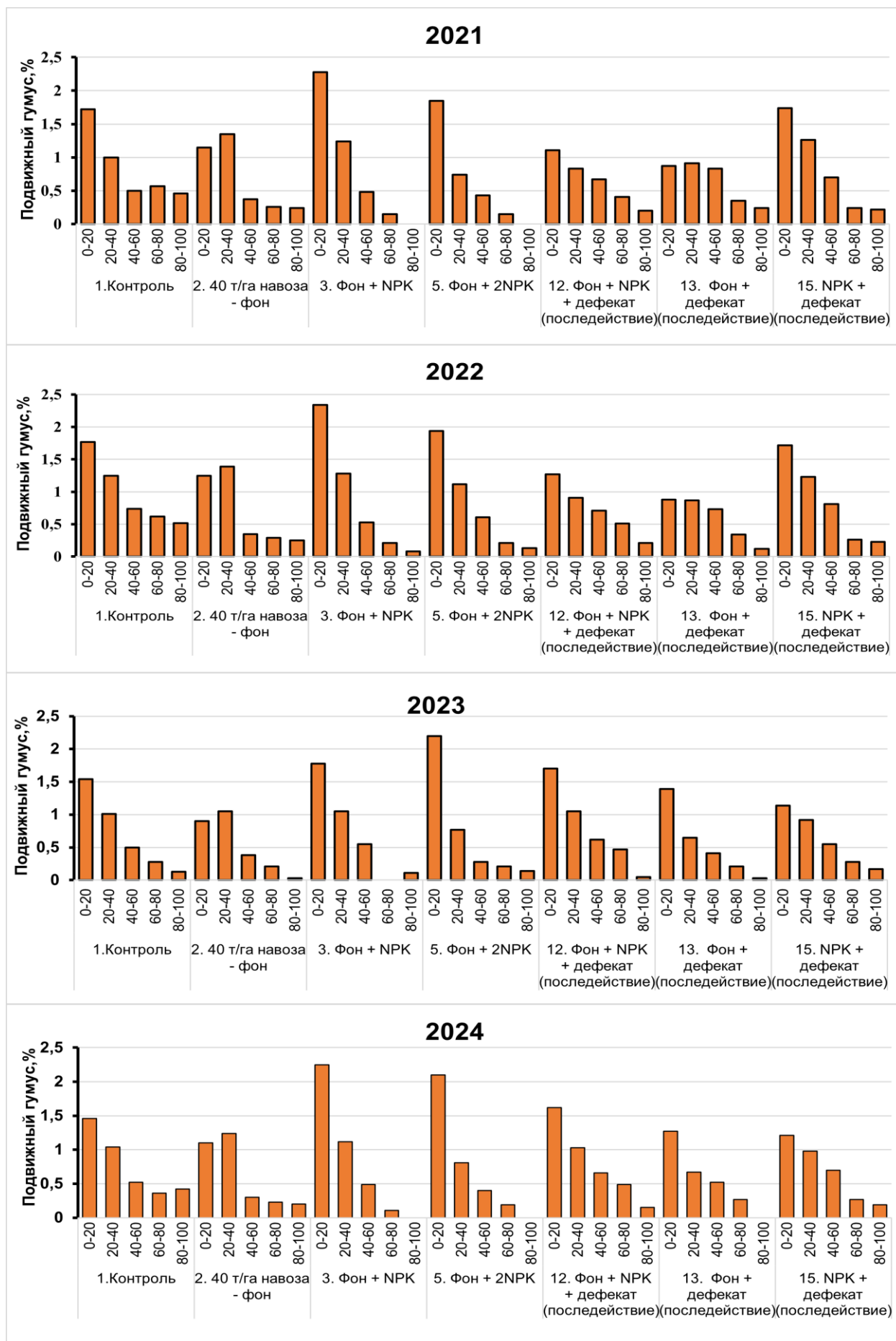


Рисунок 52 – Содержание подвижного гумуса за период 2021–2024 гг.

Содержание подвижного гумуса в слое 0–40 см в среднем за период исследований изменялось в диапазоне 0,94–1,67% (рис. 53).

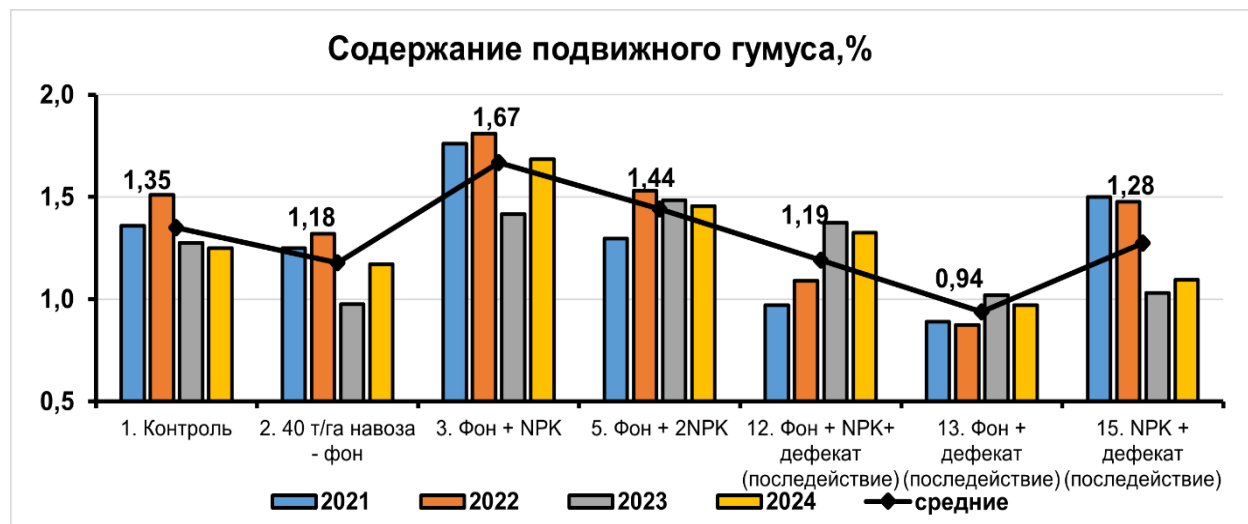


Рисунок 53 – Содержание подвижного гумуса в слое 0–40 см за период 2021–2024 годов ($HC_{P05} = 0,24$)

Анализ полученных данных показал, что максимальная прибавка содержания подвижного гумуса по сравнению с контролем отмечается на варианте с применением одинарной дозы минеральных удобрений на фоне навоза (вар. 3) – 23,5%. На варианте с внесением дефеката по фону навоза (вар. 13) выявлено снижение содержания подвижного гумуса на 69,5% относительно контроля.

Расчет соотношения между содержанием подвижного и общего гумуса в почве является важной задачей. Этот показатель, известный как индекс лабильности (или оборачиваемости) органического вещества, служит важной характеристикой структурно-функционального состояния гумусового фонда [50, 93, 191, 225]. Результаты его расчёта за период исследований представлены на рисунке 54.

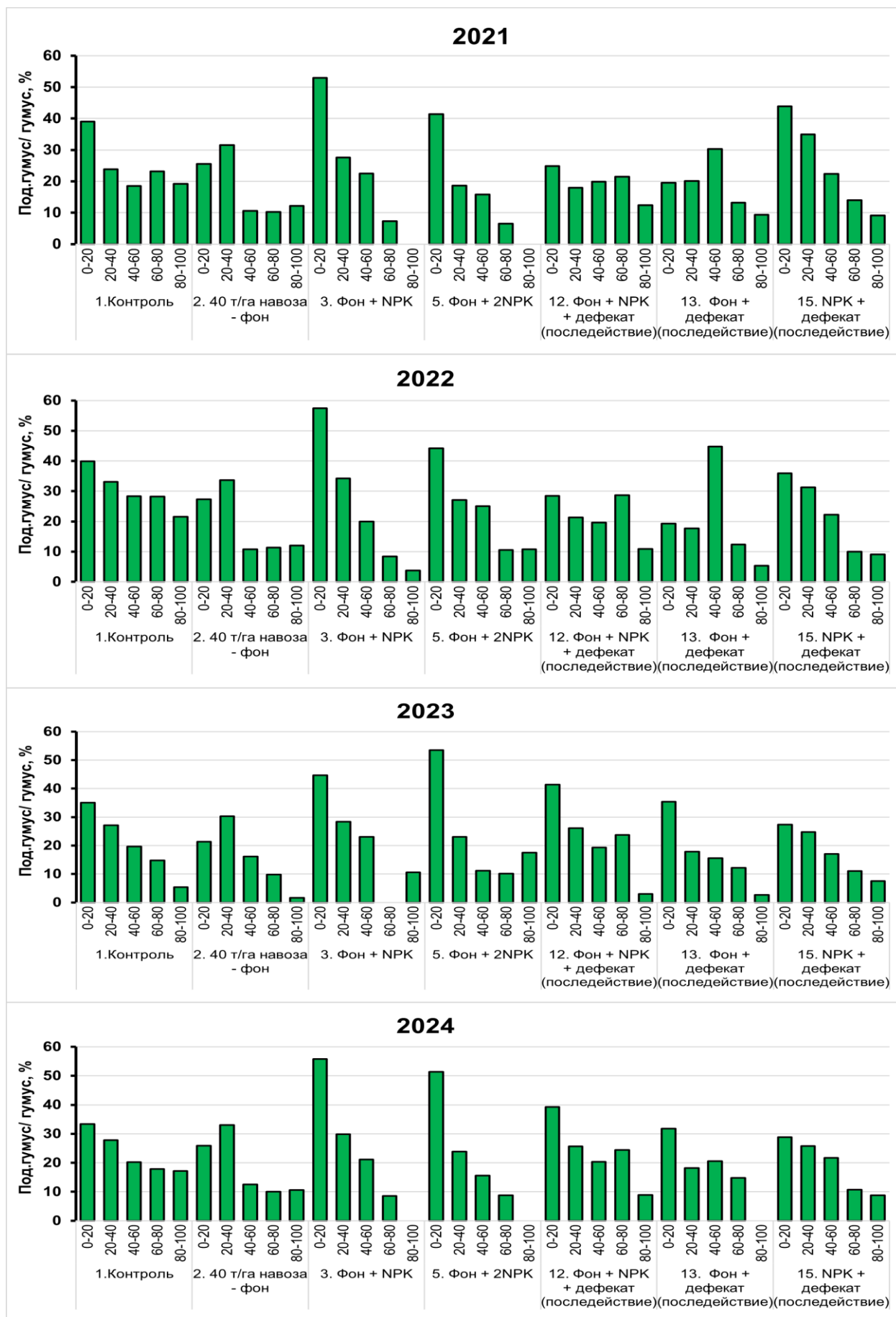


Рисунок 54 – Соотношение подвижного гумуса к общему по вариантам опыта за 2021–2024 годы

На протяжении периода исследований наибольшая доля подвижного гумуса (от 53,0 до 57,5%) в слое 0–20 см наблюдается на вариантах применения минеральных удобрений по фону навоза: максимальное значение (57,5%) зафиксировано в 2022 году на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений (вар. 3), высокие показатели 53,0% (2021 г.) и 55,8% (2024 г.) на этом же варианте, а в 2023 году наибольшая (53,5%) на варианте с двойной дозой минеральных удобрений (вар.5). Минимальные соотношения были существенно ниже: 19,51% (2021 г.) и 19,26% (2022 г.) на варианте внесения навоза по последствию дефеката (вар.13), а также 21,33% (2023 г.) и 25,94% (2024 г.) на фоновом варианте (вар.2).

Таким образом, минеральные удобрения (вар. 3 и 5) способствовали увеличению доли подвижного гумуса в гумусовом фонде, в то время как органические системы и применение дефеката (вар. 2 и 13) приводили к снижению этого показателя, что может указывать на смещение баланса в сторону более стабильных форм органического вещества.

Соотношение подвижного гумуса к общему содержанию в слое 0–40 см находилось в пределах 18,4–46,4% при среднем колебании 22,3–41,6% (рис.55).

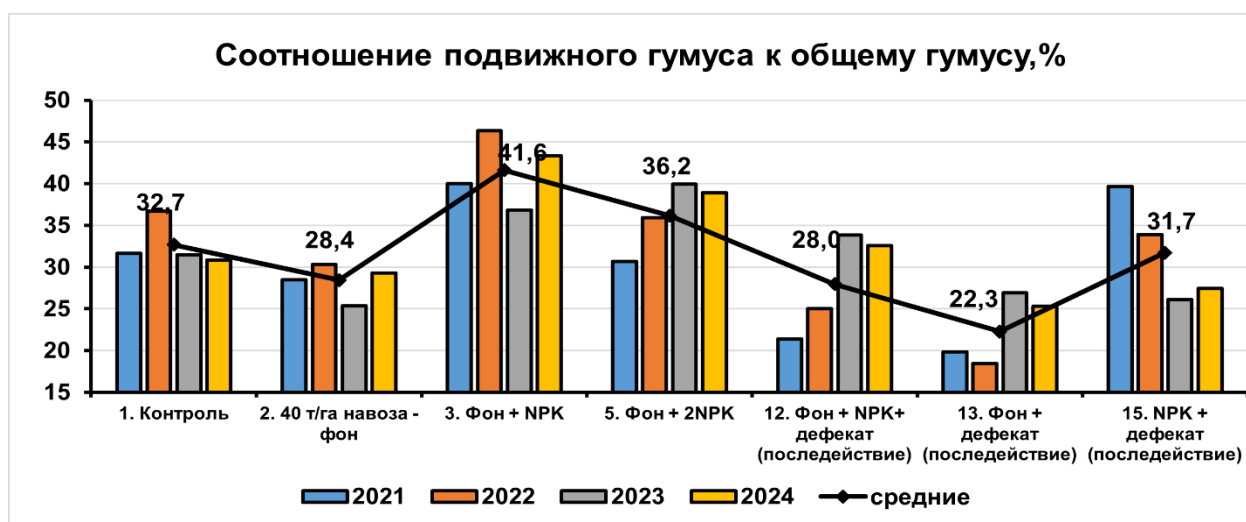


Рисунок 55 – Соотношение подвижного гумуса к общему гумусу в слое 0–40 см за 2021–2024 годы

Наибольшее соотношение (46,4%) подвижного гумуса в общем гумусе зафиксировано в 2022 году на варианте с одинарной дозой минеральных

удобрений по фону навоза (вар. 3), тогда как наименьшая (18,4%) в том же году на варианте с внесением навоза по последствию дефеката (вар. 13). В среднем за период опыта большинство вариантов демонстрировали соотношение выше 30%, в то время как на дефекатированных вариантах по органическому фону (вар. 12 и 13) этот показатель был существенно ниже и не превышал 28,0%.

Соотношение подвижного гумуса к его общему содержанию в среднем по вариантам опыта относительно контроля (32,7%) в слое 0–40 см распределилось следующим образом. Наибольшее увеличение соотношения произошло на вариантах с минеральными удобрениями по органическому фону: с одинарной дозой (вар. 3) на + 8,90% (до 41,6%, что составляет 127,2% от контроля), на варианте с двойной дозой (вар. 5) на 3,46% (до 36,2% или 110,6%). Снижение показателя наблюдалось на всех вариантах с дефекатом: наиболее значительное на варианте внесения навоза по последствию дефеката (вар.13) на - 10,43% (до 22,3% или 68,1% от контроля), а также на вариантах совместного внесения минеральных и органических удобрений по последствию дефеката (вар. 12) на 4,75% (до 28,0% или 85,5%), на варианте с внесением минеральных удобрений по дефекату (вар. 15) на 0,98% (до 31,7% или 97,0%) и на фоновом варианте (вар. 2) на 4,25% (до 28,4% или 87,0%).

Высокое значение соотношения подвижного гумуса к общему гумусу (>20-25%), которое отмечается на всех вариантах опыта, указывает на активный приток свежих органических остатков (корни, пожнивные остатки, навоз) и высокую скорость биологического круговорота. Это характерно для агроценозов с сидерацией, внесением навоза, мульчированием [210, 221].

Количество извлекаемого подвижного гумуса, на наш взгляд, зависит не только от применяемых удобрений и дефеката, но и от климатических условий года.

При длительном использовании удобрений и дефеката происходит значительное изменение качественного состава гумуса (таблица 8).

Таблица 8 – Некоторые показатели гумусного состояния чернозема выщелоченного в среднем за период 2021–2024 годов

Варианты опыта	Слой, см	Гумус, %	Запас гумуса (в слое 1 м), т /га	Тип гумуса Сгк: Сфк	Степень гумификации, %	Оптическая плотность ГК Е4:Е6
1. Контроль	0-20	4,40	395	2,55	53,8	1,09
	20-40	3,86		2,43	53,1	1,14
	40-60	2,61		2,00	50,0	1,45
	60-80	2,14		1,22	41,4	1,57
	80-100	2,42		0,84	34,3	1,85
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	4,38	396	2,90	55,8	1,68
	20-40	3,91		2,60	54,2	1,50
	40-60	2,87		1,44	44,2	1,52
	60-80	2,39		1,03	38,0	2,02
	80-100	1,94		0,61	28,3	2,78
3. Фон + NPK	0-20	4,10	339	2,05	50,4	1,11
	20-40	3,92		1,99	49,8	1,75
	40-60	2,37		1,54	46,1	2,45
	60-80	1,61		1,28	42,1	2,43
	80-100	1,39		0,72	31,8	2,84
5. Фон + 2NPK	0-20	4,27	347	1,94	49,4	1,15
	20-40	3,71		1,61	46,3	1,42
	40-60	2,55		1,33	43,3	2,10
	60-80	2,13		1,15	40,0	2,42
	80-100	1,07		1,08	39,1	3,10
12. Фон + NPK + дефекат (последствие)	0-20	4,29	396	3,02	56,2	1,92
	20-40	4,23		2,50	53,7	1,71
	40-60	3,36		2,02	50,2	1,47
	60-80	1,92		1,40	43,8	2,34
	80-100	1,72		1,29	42,6	2,82
13. Фон + дефекат (последствие)	0-20	4,24	381	2,75	55,1	1,63
	20-40	4,19		2,23	51,7	1,29
	40-60	2,38		1,74	47,5	2,28
	60-80	2,23		1,07	39,0	2,32
	80-100	1,89		0,98	37,2	2,54
15. NPK + дефекат (последствие)	0-20	4,28	412	2,15	51,1	1,38
	20-40	3,77		1,68	46,9	1,64
	40-60	3,31		1,17	40,4	1,45
	60-80	2,34		0,95	36,5	2,38
	80-100	2,34		0,63	28,8	2,50

Установлено, что все варианты опыта характеризуются элювиально-иллювиальными и элювиально-аккумулятивными профилями (рис. 56). В пахотном слое запасы гумуса колеблются по вариантам опыта в достаточно узком диапазоне от 96 до 105 т/га. На вариантах 3, 12, 15 наблюдается увеличение

запасов гумуса в слое 20–40 см. Большинство вариантов опыта (вар. 1, 2, 5, 15) имеют плавное снижение запасов гумуса в слое 0–40 см, далее с глубиной изучаемый показатель резко снижается. Максимально резкое снижение отмечается на варианте с применением одинарной дозы минеральных удобрений на фоне последствий навоза (вар. 3) со 97 до 40 т/га. Обращает внимание распределение запасов гумуса на варианте с совместным применением удобрений и известкования (вар. 12). Здесь отмечается плавное увеличение в слое 0–40 см (до 105 т/га), в дальнейшем запас гумуса падает до 54 т/га.

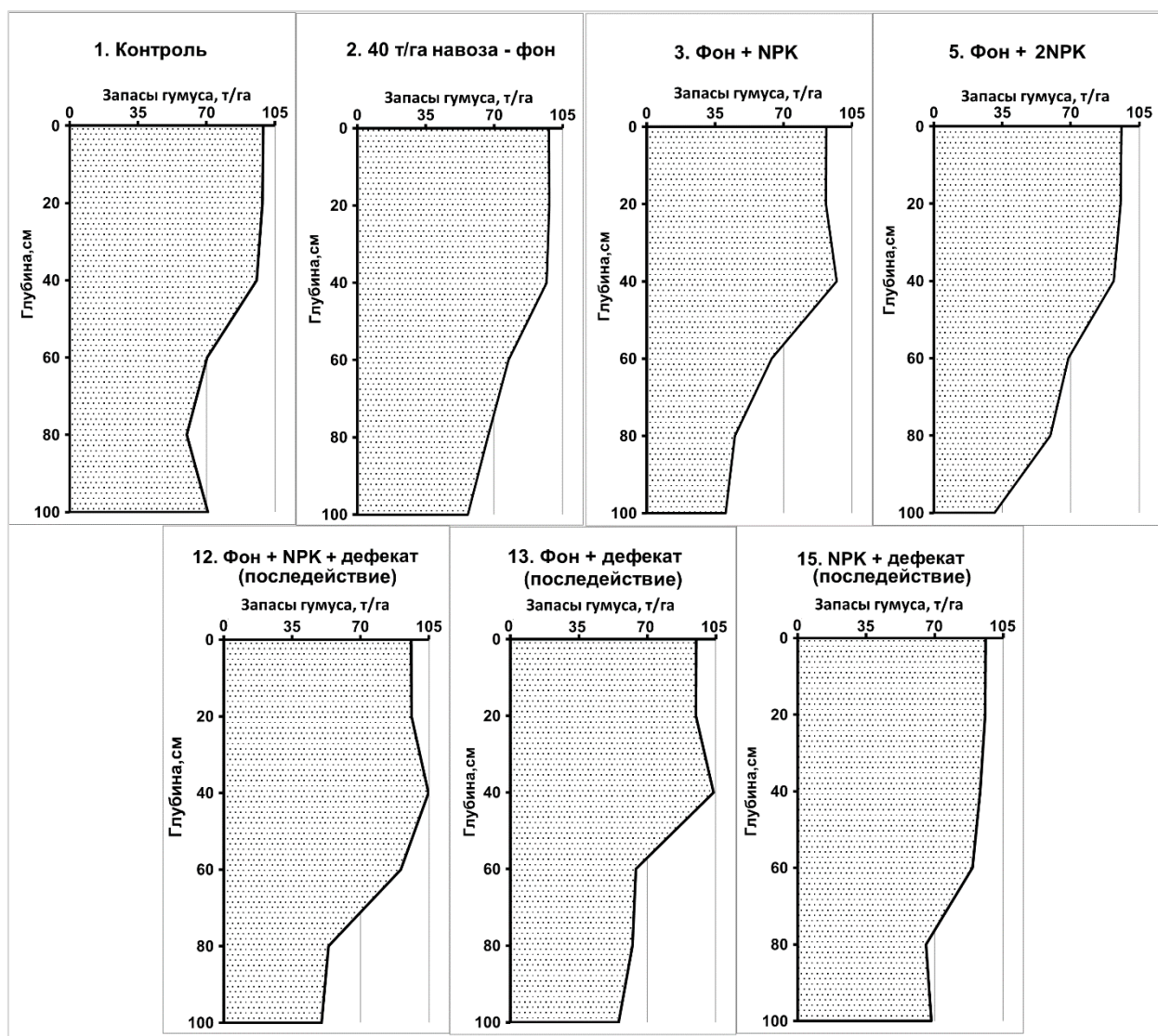


Рисунок 56 – Профильное распределение запасов гумуса в среднем за 2021–2024 гг. по вариантам опыта

Степень гумификации органического вещества оценивалась как доля гуминовых кислот от общего содержания всех органических веществ в почве и находилась в пределах 28,3–56,2%, минимальные показатели наблюдаются в слоях 80–100 см. Все варианты опыта характеризуются очень высокой степенью гумификации ($> 40\%$), в нижележащих слоях наблюдается высокая и средняя степень гумификации.

Важным показателем качества гумуса является его тип (отношение содержания углерода ГК и ФК). Это безразмерная величина, которая определяется по результатам группового состава гумуса [106,127]. По данным проведенных анализов гумус всех анализируемых вариантов в слое 0–40 см был отнесен к гуматному типу (в составе гумуса преобладали гуминовые кислоты), кроме варианта внесения двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5), гумус этого варианта был отнесен к фульватно-гуматному типу.

Отношение $E4/E6$ – это спектральный коэффициент, характеризующий степень конденсации (зрелость, степень ароматичности) гумусовых кислот. Он рассчитывается как отношение экстинкции водно-щелочного раствора гуминовых кислот при длинах волн 465 нм ($E4$) и 665 нм ($E6$). Это классический метод, не теряющий актуальности для сравнительного анализа [16,37]. Пониженная способность к ослаблению света и более широкое отношение $E4:E6$ были характерными для почв фонового варианта и вариантов внесения дефеката (вар. 2, 12, 13 и 15). В почвах вариантов внесения минеральных удобрений совместно с навозом данное соотношение сужалось, что свидетельствовало о большей степени конденсированности данных гуминовых кислот, что, возможно, имело место в результате разрушения периферической части молекул в результате кислотного гидролиза под действием минеральных удобрений [9, 10]. В целом можно отметить, что происходит накопление конденсированных, устойчивых к минерализации гумусовых веществ. Органо-минеральная система совместно с дефекатом является наиболее эффективным инструментом для достижения этого.

Данные о групповом составе гумуса, усредненные за период исследования, приведены на рисунке 57 и в приложении Ж.

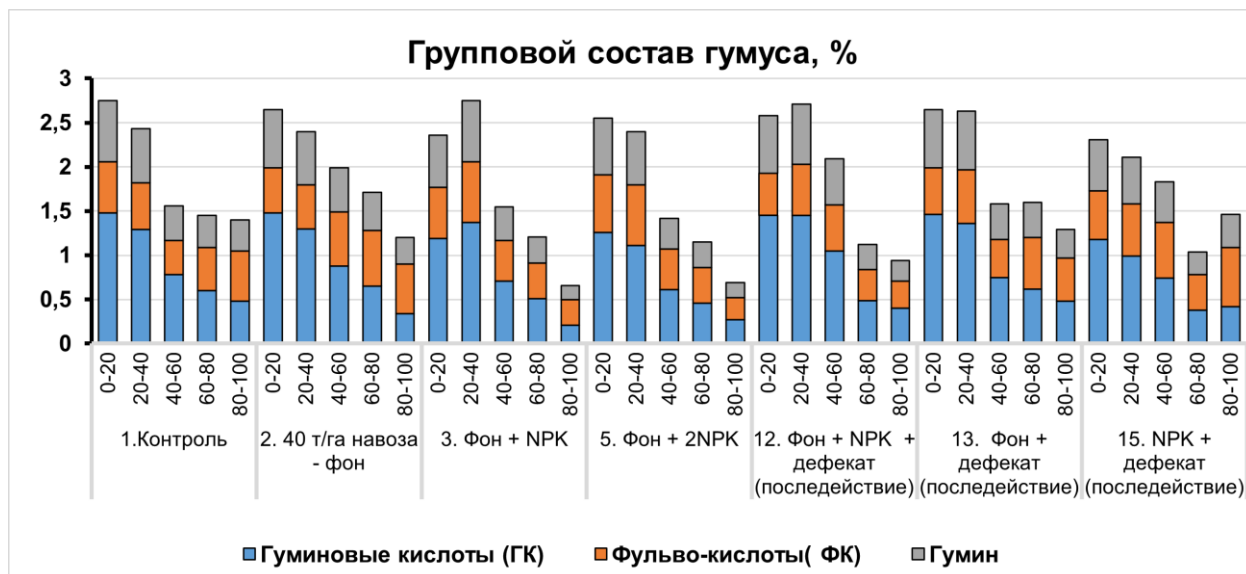


Рисунок 57 – Групповой состав гумуса вариантов исследования в среднем за период 2021–2024 гг.

Содержание органического углерода ($C_{\text{общ}}$, %) варьировало в диапазоне 0,66–2,75%, минимальное содержание отмечается в слое 80–100 см на унавоженном варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений (вар.3). Наибольшее содержание (2,75%) зафиксировано в 2 случаях: на контрольном варианте в слое 0–20 см и на варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 3) в слое 20–40 см.

Содержание ГК за анализируемый период находилось в пределах 0,21–1,48%. Наибольшее содержание ГК (1,48%) отмечается на контрольном и фоновом вариантах (вар. 1 и 2) в слое 0–20 см, что соответствует 53,8% от $C_{\text{общ}}$, наименьшее содержание (0,21%) наблюдается на варианте с внесением одинарной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар.3) и составляет 31,8% от общего содержания органического углерода.

Содержание ФК колебалось в пределах от 0,25 до 0,69%, что является более узким интервалом по сравнению с ГК. Наименьшее содержание 0,25% наблюдается на варианте внесения двойной дозы минеральных удобрений по фону навоза (вар.5) в слое 80–100 см. Наибольшее содержание 0,69% наблюдается сразу на двух вариантах в слое 20–40 см: на варианте внесения

одинарной дозы минеральных удобрений по фону навоза (вар. 3) и на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по фону навоза (вар. 5), что соответствует 25,1–28,8% от общего содержания органического вещества.

Стабильный пул органического вещества почвы представлен минерально-связанными органическими соединениями – гумином, который является основным резервуаром долгосрочной секвестрации углерода. Именно эта фракция отвечает за многовековые запасы углерода в почвах. Её время оборота – сотни и тысячи лет (против 1–10 лет для лабильного пула) [6, 8, 122]. Доля негидролизуемого остатка (гумина) находилась в пределах 0,16–0,69% и составляла $\frac{1}{4}$ от общего содержания углерода в почве всех анализируемых вариантов опыта, что свидетельствует о том, что несмотря на значительные изменения в параметрах гумусного состояния в результате длительного использования удобрений и дефеката, прочноудерживаемая на минеральной матрице часть гумуса остается неизменной.

Для объяснения выявленной вариабельности показателей органического вещества была проанализирована их зависимость от гидротермических условий периода исследований. Корреляционный анализ представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Коэффициенты корреляции гумусного состояния почв с климатическими условиями

Корреляция	Показатель		
	Гумус, %	Подвижный гумус, %	Соотношение подвижного гумуса к общему содержанию, %
ГТК	0,37	0,40	-
Температура	0,66	-	0,50

Выявлена средняя положительная связь между температурой воздуха и содержанием в почве общего и подвижного гумуса. ГТК оказывает слабое влияние. Можно предположить, что тепловой режим влияет на интенсивность трансформации органического вещества и подвижность гумуса. Эта закономерность важна, особенно в условиях глобального потепления.

Результаты расчета коэффициентов корреляции между характеристиками гумусного состояния и физико-химическими свойствами почвы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Коэффициенты корреляции физико-химических параметров почв с гумусом

Показатели	pH _{вод}	pH _{сол}	Нг	S	ЕКО	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V, %	Гумус	Под. гумус	Под. гумус/ гумус
									Мг-экв/100 почвы		
Гумус	0,52	0,58	-0,67	0,41	0,63	0,76	-	0,63	-	-0,75	-0,80
Под. гумус	-0,74	-0,70	0,73	-	-0,67	-0,48	-	-0,67	-0,75	-	0,99
Под. гумус / гумус	-0,73	-0,70	0,75	-	-0,68	-0,53	-	-0,68	-0,80	1,00	-

Выявлено, что общее содержание гумуса положительно коррелирует с кислотностью и степенью насыщенности почвы основаниями. Подвижный гумус, наоборот, накапливается в почвах с повышенной кислотностью и низким содержанием обменного кальция. Увеличение доли подвижного гумуса приводит к снижению содержания стабильного пула ПОВ.

Гумус-гранулометрические отношения

Для оценки структурной устойчивости почвы как динамической саморегулируемой системы, используются разные методы, направленные на изучение взаимосвязи между фундаментальными показателями, в частности, между гранулометрическим составом и содержанием ПОВ.

Для выявления взаимосвязей фракций гранулометрического состава и содержания гумуса использована методика В.С. Крыщенко [113]. Используются следующие формулы для расчета:

y_n – содержание физического песка в почве, %.

z – содержание физической глины в почве, %.

$K_1=100/z=1+y_n/z$ – коэффициент динамической взаимосвязи физического песка и физической глины почвы.

a_f – содержание илистой фракции, %.

b_f – содержание пылеватых фракций физической глины, %.

$k_2 = z/a_f=1+b_f/a_f$ – коэффициент динамической взаимосвязи илистой и пылевой фракции физической глины.

$adt=0,01z^2$ – базовое детерминантное расчетное содержание илистой фракции в почве как статистически наиболее вероятная величина для данного значения z , %.

$$k_1/k_2 = 0,01z^2.$$

Базовое значение ила adt равно квадрату массы физической глины, деленное на 100.

$bdt = z-adt = 0,01ynz$ – базовое расчетное содержание пылеватых фракций физической глины, %.

$Ka=aф/adt$ – константа динамического равновесия почвы при $aф$ больше $bф$.

$Kb=bф/adt$ – константа динамического равновесия почвы при $bф > aф$.

Ka и Kb могут принимать значения $>1,0$ (физическая глина насыщена илом (пылью)), $<1,0$ (физическая глина не насыщена илом (пылью)) и равные 1,0 (в квазистационарном равновесном состоянии почвы при $aф=adt$).

$Va = 100aф/z$ – степень насыщенности физической глины илом при $aф > bф$, %.

$Vb = 100bф/z$ – степень насыщенности физической глины пылью при $aф < bф$, %.

$yг$ – содержание гумуса в почве, %.

$xр = yгKa,b$ – расчетное содержание гумуса в физической глине при $Ki > 1,0$, %.

$xр = yг/Ka,b$ – расчетное содержание гумуса в физической глине при $Kj < 1,0$, %.

$W = 100xр/z$ – степень насыщенности физической глины гумусом, %.

**Таблица 11 – Взаимосвязь гранулометрического состава и гумусности почв
разной степени агрогенной трансформации**

Горизонт, глубина отбора образца, см	Фактическое содержа- ние фракций			Базовое содер- жание фракций		Насыщенность физ. глины илом, %	Насыщенность физ. глины пы- лью, %	Константы дина- мического равно- весия	Гумус, %		Насыщенность физ. глины гумусом, %
	<0,01 мм	<0,001 мм	0,001–0,01 мм	<0,001 мм	0,001–0,01 мм				в почве	в физ. глине	
	z	аф	бф	aDt	bDt	Va	Vb	Ka	ур	хг	W
Залежь											
0–20	53,99	27,06	26,93	26,08	24,84	50,12	49,88	0,93	7,32	6,80	12,59
20–40	54,06	29,02	25,04	25,39	24,84	53,68	46,32	0,99	5,14	5,10	9,44
40–60	54,36	29,33	25,03	27,61	24,81	53,96	46,04	0,99	2,86	2,84	5,22
60–80	46,2	29,23	16,97	30,79	24,86	63,27	36,73	1,37	2,59	3,55	7,68
80–100	43,38	29,47	13,91	24,61	24,56	67,93	32,07	1,57	1,59	2,49	5,74
Вариант 1											
0–20	51,06	29,76	21,30	25,04	24,99	58,29	41,71	1,14	4,40	5,03	9,84
20–40	50,40	29,99	20,40	25,77	25,00	59,52	40,48	1,18	3,86	4,55	9,04
40–60	52,55	39,48	13,07	26,79	24,94	75,13	24,87	1,43	2,61	3,72	7,09
60–80	55,49	31,69	23,80	26,18	24,70	57,10	42,90	1,03	2,14	2,20	3,97
80–100	49,61	30,49	19,12	22,36	25,00	61,46	38,54	1,24	2,42	3,00	6,04
Вариант 2											
0–20	50,04	28,47	21,57	25,04	25,00	56,90	43,10	1,14	4,38	4,98	9,96
20–40	50,76	28,67	22,09	25,77	24,99	56,48	43,52	1,11	3,91	4,35	8,56
40–60	51,76	30,06	21,70	26,79	24,97	58,07	41,93	1,12	2,87	3,21	6,21
60–80	51,16	30,85	20,31	26,18	24,99	60,30	39,70	1,18	2,39	2,81	5,49
80–100	47,28	28,58	18,70	22,36	24,93	60,45	39,55	1,28	1,94	2,48	5,24
Вариант 3											
0–20	53,21	30,44	22,77	28,31	24,90	57,21	42,79	1,08	4,10	4,40	8,28
20–40	49,00	27,81	21,19	24,01	24,99	56,75	43,25	1,16	3,92	4,54	9,27
40–60	53,88	31,57	22,31	29,03	24,85	58,60	41,40	1,09	2,37	2,58	4,79
60–80	51,62	32,69	18,93	26,65	24,97	63,34	36,66	1,23	1,61	1,98	3,83
80–100	51,74	30,09	21,65	26,77	24,97	58,15	41,85	1,12	1,39	1,56	3,01
Вариант 5											
0–20	51,58	28,97	22,60	26,60	24,98	56,17	43,83	1,09	4,27	4,65	9,01
20–40	55,64	32,08	23,56	30,95	24,68	57,65	42,35	1,04	3,71	3,84	6,91
40–60	55,65	33,03	22,62	30,97	24,68	59,35	40,65	1,07	2,55	2,72	4,89
60–80	56,84	36,15	20,69	32,31	24,53	63,59	36,41	1,12	2,13	2,38	4,18
80–100	48,58	27,57	21,01	23,60	24,98	56,75	43,25	1,17	1,07	1,24	2,56
Вариант 12											
0–20	48,30	27,12	21,18	23,32	24,97	56,14	43,86	1,16	4,29	4,99	10,33
20–40	50,53	29,10	21,43	25,53	25,00	57,60	42,40	1,14	4,23	4,82	9,53
40–60	54,81	31,40	23,41	30,04	24,77	57,30	42,70	1,05	3,36	3,51	6,40
60–80	53,51	32,75	20,76	28,63	24,88	61,21	38,79	1,14	1,92	2,20	4,10
80–100	48,14	28,27	19,86	23,17	24,97	58,73	41,27	1,22	1,72	2,10	4,36
Вариант 13											
0–20	50,10	27,47	22,63	25,10	25,00	54,83	45,17	1,09	4,24	4,64	9,26
20–40	51,85	28,72	23,13	26,88	24,97	55,40	44,60	1,07	4,19	4,48	8,64
40–60	51,82	27,26	24,56	26,85	24,97	52,61	47,39	1,02	2,38	2,42	4,66
60–80	47,68	26,73	20,95	22,73	24,95	56,06	43,94	1,18	2,23	2,62	5,51
80–100	43,35	25,12	18,24	18,79	24,56	57,94	42,06	1,34	1,89	2,53	5,83
Вариант 15											
0–20	47,95	26,80	21,16	22,99	24,96	55,88	44,12	1,17	4,28	4,98	10,39
20–40	53,22	31,20	22,02	28,32	24,90	58,63	41,37	1,10	3,77	4,15	7,79
40–60	54,06	30,37	23,69	29,23	24,83	56,18	43,82	1,04	3,31	3,44	6,36
60–80	51,88	29,97	21,91	26,92	24,96	57,77	42,23	1,11	2,34	2,61	5,02
80–100	47,59	27,75	19,85	22,65	24,94	58,30	41,70	1,22	2,34	2,87	6,02

Для определения гумус-гранулометрического соотношения все показатели условно делят на два блока [113]. Показатели первого блока характеризуют гранулометрические фракции почвенных образцов, представляя фактический гранулометрический состав образцов, базовые (эталонные) значения ила, степень насыщенности физической глины илом или пылью (по преобладающей фракции), а также константы динамического равновесия. Во второй блок включены такие два показателя, дающие представление о гумусированности почвенных образцов, как содержание гумуса в почве в целом и содержание гумуса в физической глине.

Верхний горизонт целинной залежи (0–20 см) характеризуется наиболее высоким содержанием гумуса – 7,32%. В то же время на опытных участках значения этого показателя в пахотном слое значительно ниже и находятся в интервале 4,10–4,40%. С увеличением глубины содержание гумуса падает до 1,10–2,42%.

Критерием устойчивости почв служит не только общий запас гумуса, но и его концентрация в физической глине – ключевом компоненте ППК. Существенное влияние на эту взаимосвязь оказывает баланс между илистой и пылевой фракциями в тонкодисперсной части ($<0,01$ мм) [152]. В исследуемых агрогенно-преобразованных почвах содержание гумуса, приходящееся на долю физической глины, существенно выше его общего содержания. Это прямое следствие того, что константа динамического равновесия ($K > 1,0$) указывает на пресыщение тонкодисперсной фракции илом (рис. 58). Наиболее выраженный разбавляющий эффект, обусловленный данным дисбалансом, наблюдается в верхних почвенных горизонтах.

Как видно из рисунка 58, почва залежного участка характеризуется максимальными значениями ключевых параметров гумусного состояния: содержание гумуса в почве достигает 7,32%, в физической глине – 6,80%, а степень насыщенности глины гумусом – 12,59%. Полученные данные согласуются с литературными источниками, согласно которым естественные (целинные) почвы аккумулируют значительно больше органического вещества по

сравнению с агрогенно-используемыми [115,150].



Рисунок 58 – Фактические и расчетные характеристики гумусного состояния анализируемых образцов (Хр – содержание гумуса в физической глине, W – степень насыщенности физической глины гумусом)

Во всех опытных вариантах, подверженных сельскохозяйственному воздействию, наблюдается устойчивая тенденция к снижению этих показателей. Минимальное содержание гумуса как в целом в почве, так и во фракции физической глины зарегистрировано при внесении одинарных и двойных доз минеральных удобрений на унавоженный фон (вар. 3 и 5). Схожая негативная динамика отмечена и для варианта с применением минеральных удобрений на фоне внесения дефектата (вар. 15).

Степень насыщенности физической глины гумусом имеет значительное теоретическое и практическое значение, т. к. он отражает общий принцип взаимосвязи между важными показателями – гранулометрическим составом и содержанием ПОВ с учетом содержания в почве различных гранулометрических фракций и гумусированностью физической глины. Для расчета данного показателя необходимо учитывать общий запас гумуса (уг), и его долю в составе тонкодисперсной фракции (хр) [113].

Степень насыщенности физической глины гумусом зависит от применяемых агротехнических приемов. Минимальные значения отмечаются на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 3). На варианте с комплексным применением дефеката и удобрений (вар. 12) данный показатель максимален.

На рисунке 59 представлены расчетные значения константы динамического равновесия анализируемых почв.

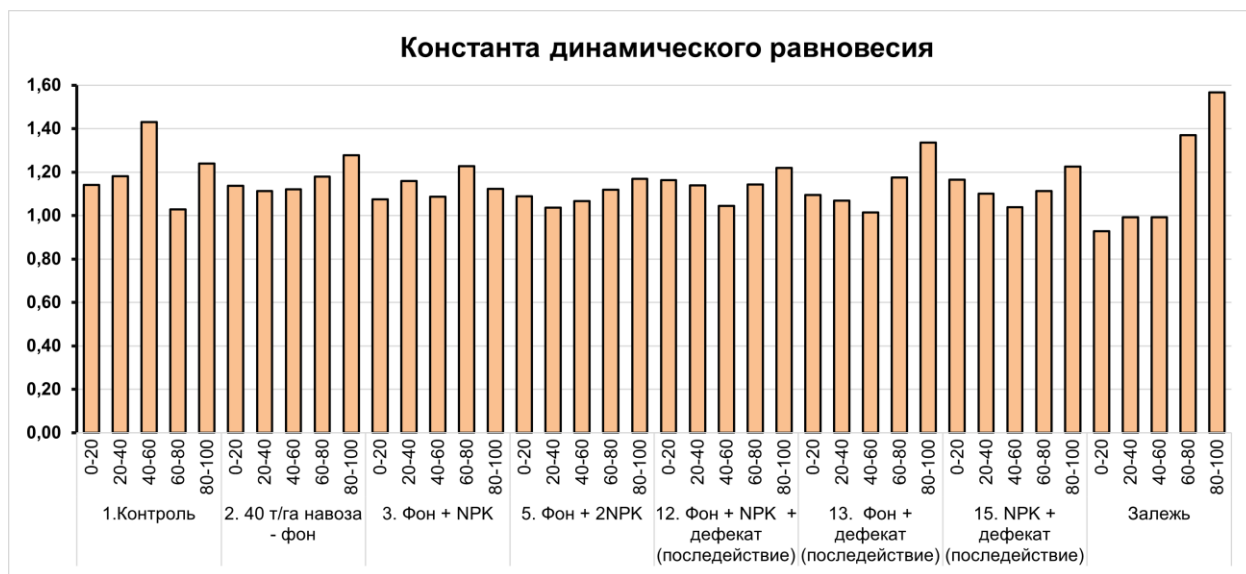


Рисунок 59 – Константы динамического равновесия

Анализ распределения констант динамического равновесия по почвенному профилю показал, что их наибольшие значения наблюдаются в средней и нижней его части. Так, абсолютный максимум зафиксирован в глубоких горизонтах (60–100 см) целинной залежи. Высокие показатели также отмечены в слое 40–60 см почвы контрольного варианта.

Более детально результаты по анализируемым вариантам показаны в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры гумусного состояния почв

	Максимальные значения					Минимальные значения				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Гумус	4,40 (1вар)	4,23 (12вар)	3,36 (12вар)	2,39 (2вар)	2,42 (1вар)	4,10 (5вар)	3,77 (15вар)	2,37 (3вар)	1,61 (3вар)	1,07 (5вар)
Хр	5,03 (1 вар)	4,82 (12вар)	3,86 (2вар)	3,72 (1вар)	3,00 (1вар)	4,40 (3вар)	3,84 (5вар)	2,42 (13вар)	1,98 (3вар)	1,24 (5вар)
W	10,39 (15вар)	9,53 (12вар)	7,09 (1вар)	5,51 (13вар)	6,04 (1вар)	8,28 (3вар)	6,91 (5вар)	4,66 (13вар)	3,83 (3вар)	2,56 (5вар)

Результаты подтверждают, что параметры гумусного состояния (уг, хр, W) закономерно снижаются по почвенному профилю как в целинных, так и в пахотных почвах.

Кумулятивные кривые гранулометрического состава верхнего слоя изучаемых почвенных вариантов представлены на рисунке 60.

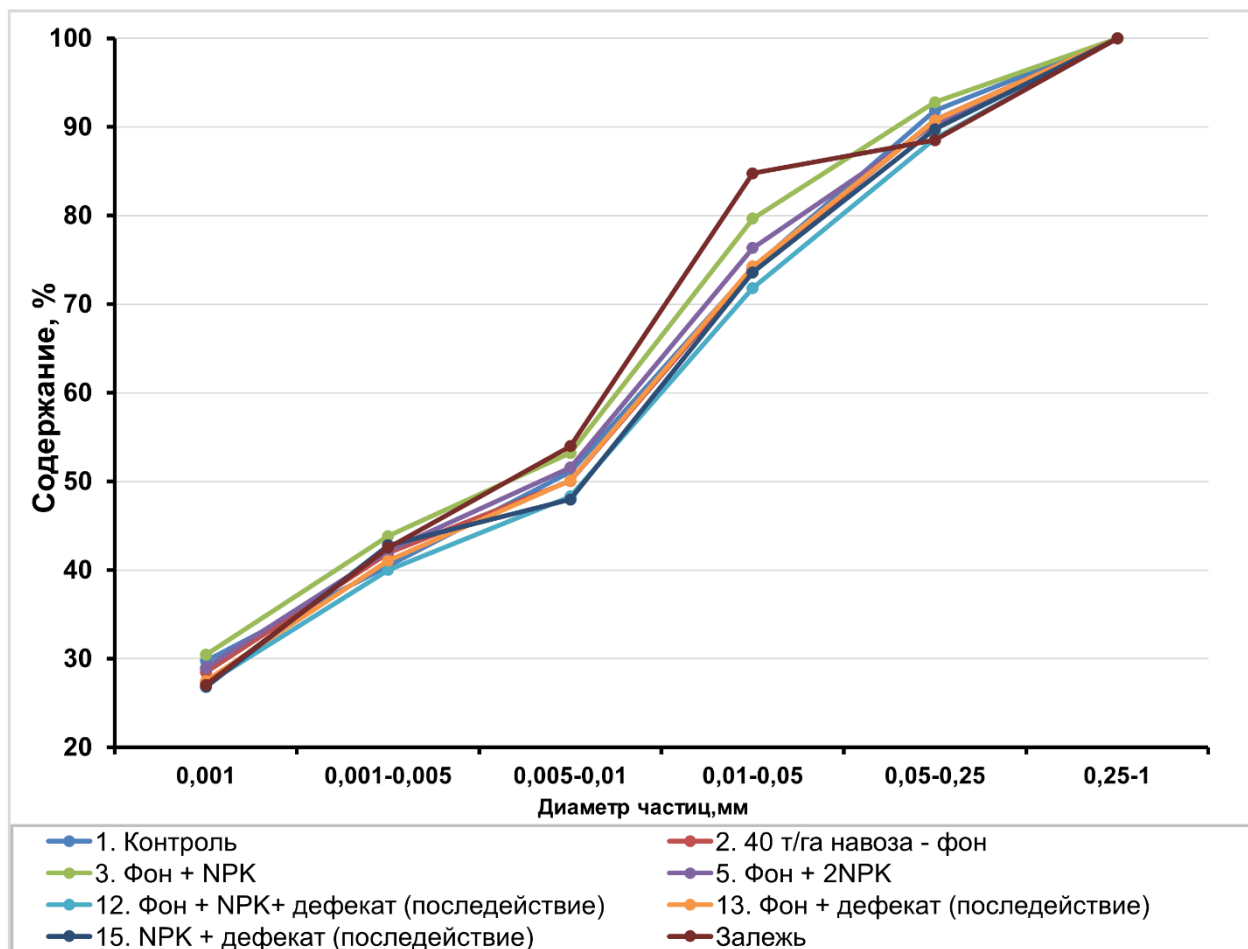


Рисунок 60 – Кумулятивные кривые гранулометрического состава

Анализ данных показал, что, несмотря на различный уровень антропогенной нагрузки, включая разную степень удобренности, кривые распределения частиц демонстрируют высокую степень сходства между всеми вариантами, включая и образец с залежного участка. Наиболее существенные различия зафиксированы для содержания фракции крупной пыли. Её максимальная доля (15,76%) характерна для целинной почвы залежи, тогда как минимальная (10,70%) отмечена в контрольном варианте.

Таким образом, наибольшее общее содержание гумуса (уг = 7,32%), его концентрация в физической глине (хр = 6,80%) и степень насыщенности глины

гумусом ($W = 12,59\%$) зафиксированы в верхнем горизонте целинной залежи. Во всех опытных вариантах наблюдается устойчивое снижение данных показателей в пахотном слое ($уг = 4,10\text{--}4,40\%$).

Минимальные значения параметров гумусного состояния характерны для вариантов, получавших только минеральные удобрения на органическом фоне (вар. 3 и 5). Напротив, комплексное применение органических и минеральных удобрений совместно с химической мелиорацией (известкование) способствует максимальному накоплению и более равномерному распределению гумуса, в том числе в составе тонкодисперсной фракции. Это подтверждается высокими значениями степени насыщенности глины гумусом (W) в соответствующих вариантах.

5. ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА НА ПОГЛОТИТЕЛЬНУЮ И БУФЕРНУЮ СПОСОБНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО

5.1. Поглолительная способность

Адсорбционные реакции в почвах – это процессы связывания компонентов почвенного раствора поверхностью твердых частиц, обусловленные силами притяжения, действующими на границе раздела фаз [171].

До середины XIX века почва считалась химически инертной. Опыты Х. С. Томпсона (1848 г.) и последующие работы Дж. Томаса Уэя (1850 г.) впервые доказали её способность к ионному обмену, заложив основы учения о поглолительной способности почв. Эти исследования, изначально агрономические, сегодня служат ключом к пониманию удержания органического вещества и миграции загрязнителей в окружающей среде.

Сорбирующиеся вещества (сорбаты) можно разделить на три основные категории: анионные сорбаты – несут отрицательный заряд из-за избытка электронов (например, ортофосфат, PO_4^{3-}); катионные сорбаты – несут положительный заряд из-за недостатка электронов (например, Ca^{2+} , Pb^{2+}); нейтральные органические сорбаты – проявляют различную степень полярности в зависимости от распределения электронной плотности в молекуле (например, неполярный бензол C_6H_6 и сильно полярная сахароза $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) [56, 149].

Эта классификация применима как к целым молекулам, так и к отдельным функциональным группам в составе более крупных соединений. Некоторые вещества в зависимости от pH среды могут проявлять свойства разных категорий [182, 223].

Основными природными сорбентами в почвах выступают следующие природные компоненты.

1. Слоистые силикатные глины, как правило, имеют постоянный отрицательный заряд, возникающий из-за изоморфного замещения в кристаллической решетке, и являются главным источником емкости катионного обмена во многих почвах [4, 213].

2. Оксиды и гидроксиды металлов (Fe, Al, Mn) обладают переменным зарядом. Их гидратированные поверхности ($\equiv\text{M}-\text{OH}$) могут протонироваться или депротонироваться в зависимости от pH, приобретая положительный ($\equiv\text{M}-\text{OH}_2^+$), нейтральный или отрицательный ($\equiv\text{M}-\text{O}^-$) заряд.

3. Почвенное органическое вещество (ПОВ) содержит разнообразные реакционноспособные группы – от анионных (карбоксильные $-\text{COOH}$, фенольные $-\text{OH}$) и катионных (амино $-\text{NH}_2$) до неполярных алифатических и ароматических фрагментов [8, 210].

Соотношение, удельная поверхность и химическая природа этих трех компонентов определяют сорбционные свойства конкретной почвы [77].

Для количественной оценки адсорбции широко используется метод построения изотермы сорбции – зависимости количества поглощенного вещества от его равновесной концентрации в растворе при постоянной температуре. Типичный эксперимент включает три этапа: 1) взаимодействие почвы с раствором известного состава в контролируемых условиях; 2) разделение твердой и жидкой фаз; 3) количественный анализ сорбата в обеих фазах [222].

Адсорбционные процессы лежат в основе трансформации минералов, формирования органо-минеральных комплексов и определяют ключевые свойства почвы: буферность, питательный и водный режимы, миграцию веществ, физико-химические характеристики [103]. Поэтому исследование сорбционных свойств почв сохраняет высокую актуальность для решения задач агрохимии, экологии и охраны окружающей среды.

Исследование сорбционной способности почвенных образцов проводили методом построения изотерм адсорбции. Интерпретация данных выполнена с использованием модели Ленгмюра [28, 222]. Данная модель описывает равновесную адсорбцию на гомогенной поверхности с фиксированным числом идентичных и эквивалентных центров, каждый из которых может связать только одну молекулу сорбата. При этом предполагается, что энергия адсорбции постоянна, а адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом.

На рисунке 61 показаны изотермы ионного обмена металл – водород в системах с исследуемыми почвами по данным 2021 года.

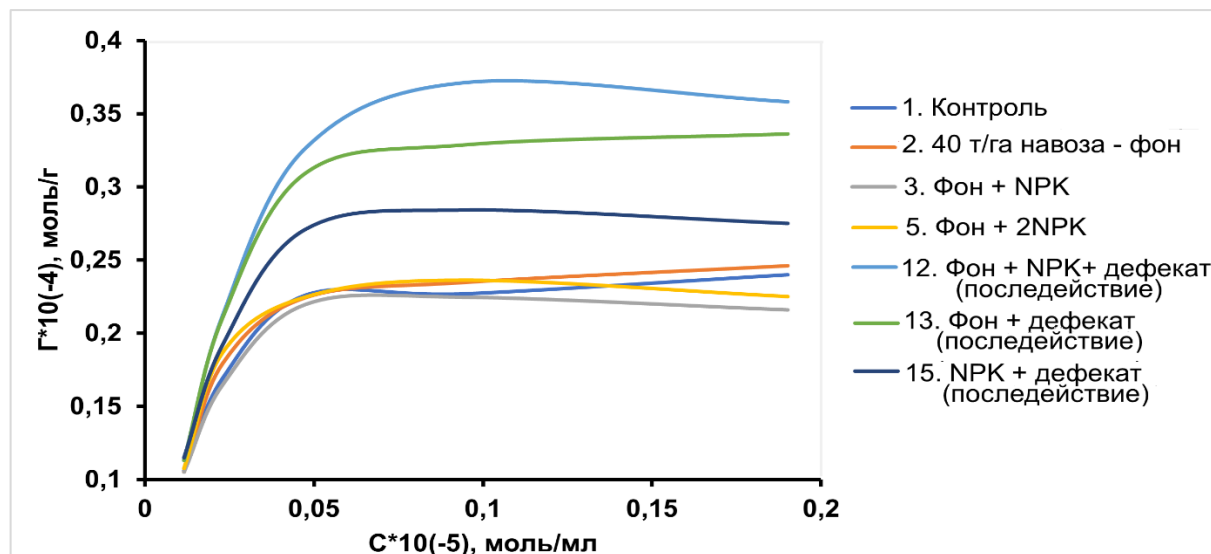


Рисунок 61 – Изотермы сорбции ионов водорода почвой

В случае катионообменного процесса, что имеет место в почвах, полученные изотермы при приведении их к линейному виду позволяют вычислить основные его характеристики – предельную сорбцию и константу ионообменного равновесия (табл. 13).

Таблица 13 – Константы сорбционного равновесия (ионного обмена) (K), предельная сорбция ионов водорода (Γ_{∞}).

Вариант	$K \times 10^4$	Γ_{∞} , моль/100г
1.Контроль	1,12	25,0
2.40 т/га навоза фон	1,09	23,5
3. Фон+ NPK	1,06	22,5
5. Фон + 2NPK	1,05	24,0
12. Фон + NPK+ дефекат (последствие)	1,11	37,0
13. Фон + дефекат (последствие)	1,10	33,0
15. NPK + дефекат (последствие)	1,07	28,3

Константа сорбционного равновесия не отличается широким диапазоном изменений (от 1,06 до 1,12), что связано с единым механизмом сорбции для всех анализируемых вариантов. Известно, что важнейшими функциональными группами, определяющими поглотительную способность почв, являются карбоксильные группы гумусовых кислот. Их набор и количество в первую очередь определяются почвообразовательным процессом [35, 130, 180]. Определено, что максимальные показатели предельной сорбции

характерны для известкованных вариантов на унавоженном фоне (вар.12 и 13).

Сравнение изменений константы сорбционного равновесия и предельной сорбции за анализируемый промежуток времени (2021–2024 гг.) не выявило достоверных отличий. Различия между 2021 и 2024 гг. отмечены в диапазоне 2,37–5,64%, что явно находится в пределах ошибки опыта. Поэтому проведем анализ изменения анализируемых показателей за более длительный период времени, используя литературные данные [34]. Проведем сравнение по максимально контрастным вариантам: контроль, вариант с применением двойной дозы минеральных удобрений по фону навоза, вариант с применением дефеката по фону навоза (рис. 62).

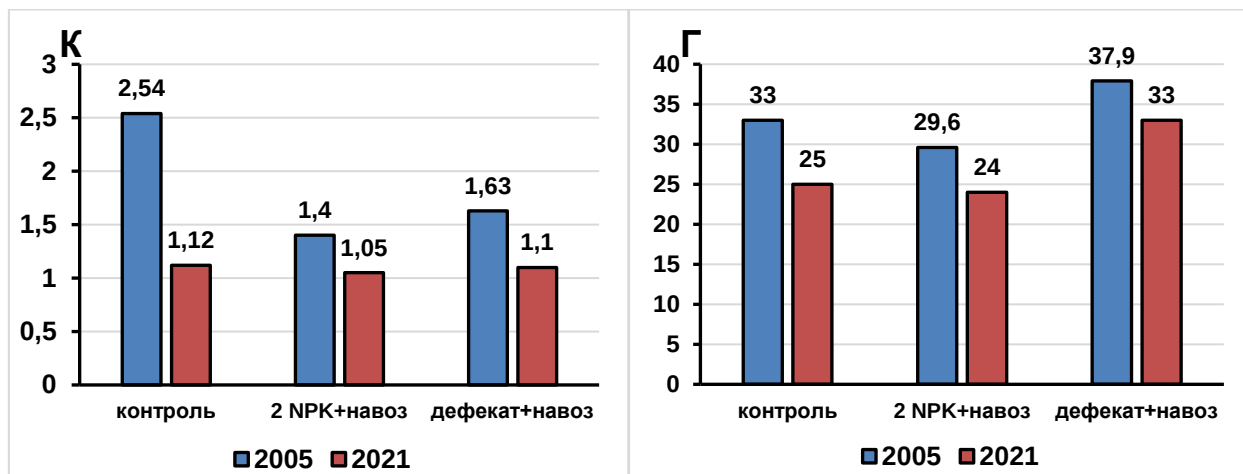


Рисунок 62 – Сравнение констант сорбционного равновесия (K) и предельной сорбции ионов водорода (Γ_{∞}) для слоя 0–20 см

На всех вариантах опыта наблюдается существенное снижение значений K, что свидетельствует о прогрессирующем снижении химической устойчивости ППК за 16-летний период. Снижение на контрольном варианте составило 56%, на варианте 5 – около 25%, на варианте 13–33%. На всех вариантах наблюдается снижение предельной сорбции, что указывает на сокращение общей буферной ёмкости почвы против кислотной нагрузки: 24%, 19%, 13% соответственно для вариантов 1,5 и 13. Вариант с внесением дефеката по органическому фону демонстрирует наилучшую сохранность буферных свойств. Даже в 2021 году он сохраняет более высокую Γ_{∞} , чем контроль в 2005 году. Применение дефеката в комплексе с навозом эффективно противодействовало

снижению ёмкости ППК. Отсутствие удобрений (контрольный вариант) приводит к наиболее значительному снижению K и Γ_{∞} .

Установлено, что за 16-летний период наблюдений выявлена отрицательная динамика сорбционных свойств почвы по изучаемым параметрам, отмечается подкисление и снижение буферной способности чернозема выщелоченного. Результаты исследований подтверждают необходимость систематического известкования и внесения навоза для снижения подкисления почв и обеспечения устойчивости плодородия чернозема выщелоченного в лесостепи ЦЧР.

5.2. Буферная способность

Буферная способность определяется как способность почвы противостоять изменению реакции среды pH при добавлении в почву кислоты или щелочи [96]. Кисотно-основные свойства почвенного раствора влияют на способность к миграции многих химических элементов по почвенному профилю и в конечном итоге определяют большой геологический круговорот [34, 147].

Буферность почв зависит от минералогического и гранулометрического составов почвы и почвообразующей породы, уровня влажности и значения pH , а также содержания ПОВ и обменных катионов [64]. Почва обладает высокой буферностью в кислой среде за счет гидролиза и осаждения соединений алюминия (буферная система, состоящая из слабого основания и сильной кислоты). В щелочной среде работает другая буферная система – карбонат кальция, состоящий из основания средней силы и слабой кислоты. В условиях близких к нейтральным буферность поддерживается за счет катионного обмена, протонирования или депротонирования обменных центров в коллоидных системах глинистых минералов и ПОВ [33, 147]. Буферная способность поддерживает pH на определенном уровне, предотвращает резкие колебания почвенной кислотности, например в результате применения минеральных удобрений. Например, высокобуферные почвы противостоят подкисляющему действию кислотных дождей, предотвращая подкисление как почвы, так и дренажных вод. Изменения реакции почвы оказывают не только прямое влияние

на растения, но и косвенное влияние на почвенную среду, вызывая изменения доступности питательных веществ. Дефицит одних питательных веществ для растений и избыток других в токсичных количествах могут серьезно нарушить питательный баланс в почве [1, 221].

Буферную способность почв оценивали по методу Аррениуса по изменению pH суспензии при добавлении увеличивающегося количества 0,1н HCl и NaOH. Показатель рассчитывали как площадь между кривыми титрования почвы и инертного стандарта (прокаленного песка) [28]. Ввиду консервативности показателя в приложении 3-И приведены данные за первый и последний годы исследований.

Для теоретического объяснения устойчивости почв к кислотному воздействию часто используют концепцию буферных систем, разработанную Б. Ульрихом [146]. Эта концепция иллюстрирует основные механизмы буферизации, доминирующие при различных уровнях pH. Анализ графика, построенного на основе кривой титрования с шагом в одну единицу pH, позволяет изучить структуру буферности и идентифицировать различные буферные компоненты. В частности, определяются процессы, связанные с участием минеральных компонентов почвы, специфических и неспецифических органических соединений, а также органо-минеральных комплексов [63, 76, 112].

В диапазоне pH почвенного раствора 6,2–8,6 действует карбонатная буферная система, в которой ведущую роль играет быстрое растворение карбонатных минералов. Диапазон pH 5–6,2 соответствует силикатной буферной области, где основной реакцией является растворение силикатов.

Интервал pH от 4,2 до 5 характеризуется катионно-обменной буферной зоной, где доминирует процесс вытеснения обменных оснований из ППК ионами водорода. Кроме того, при взаимодействии с кислотой происходят реакции протонирования гидроксильных групп на поверхности глинистых частиц. При pH ниже 4,2 происходит вытеснение алюминия в раствор ионами водорода, что соответствует алюминиевой буферной зоне. Алюминий представлен мелкодисперсными аморфными гидроксидами, комплексами Al с

органическими лигандами и гидроксидом Al в почвенных хлоритах.

При взаимодействии с основанием происходит депротонирование pH-зависимых обменных позиций. В черноземах, отличающихся высоким содержанием органического вещества, основной буферной реакцией является депротонирование функциональных групп органических кислот. В диапазоне pH до 7 титруются карбоксильные группы, при pH 7–8 – аминокгруппы, а при pH выше 9 – фенольные гидроксилы. До pH 8,6 функционирует карбонатная зона, где нейтрализация избытка гидроксид-ионов происходит посредством образования карбоната кальция [76, 147].

Так, при подкислении в 2021 году изменения pH находились в диапазоне 2,45–7,81 ед. pH, что характерно для протекания всех выше перечисленных механизмов буферизации, минимальный показатель (2,45) наблюдается на варианте с оптимальной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3) в слое 0–20 см, наибольшее значение pH (7,81) отмечается в слое 80–100 см на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5). В 2024 году изменения pH находилось в пределах 3,04–7,38 ед. pH, наименьший показатель (3,04) наблюдаются на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений (вар. 3) в слое 80–100, максимальное значение pH (7,38) зафиксировано в слое 80–100 см на варианте с внесением минеральных удобрений по последствию дефеката (вар. 15).

При подщелачивании в 2021 году значение pH находилось в диапазоне 7,10–10,62 ед. pH, в 2024 году pH колебалось от 6,48 до 11,27 ед. pH. Минимальный показатель (7,10) в 2021 году наблюдаются на контрольном варианте в слое 0–20 см, максимальное значение (10,62) отмечается в слое 80–100 см, на варианте с двойной дозой минеральных удобрений (вар. 5). В 2024 году наименьшее значение (6,48) зафиксировано в слое 20–40 см на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 5), наибольшее значение (11,27) отмечается на дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 15) в слое в 80–100 см.

При сравнении вариантов опыта за весь период исследований

минимальные показатели наблюдаются на вариантах внесения минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3 и 5), наибольшие значения в слоях 80–100 см. Повышение значения рН отмечается в нижележащих горизонтах, что вероятнее всего связано с воздействием карбонатов.

При детальном рассмотрении наиболее активной части почвенного профиля слоя 0–40 см выявили, что в кислотном интервале отмечается преобладание алюминиевой, катионно-обменной и силикатной буферной зоны. В щелочном интервале наблюдается преобладание депротонирования аминогрупп и фенольных гидроксидов.

На рисунке 63 показаны кривые буферности на примере слоя 0–40 см, аналогичные кривые по другим слоям представлены в приложении К–О.

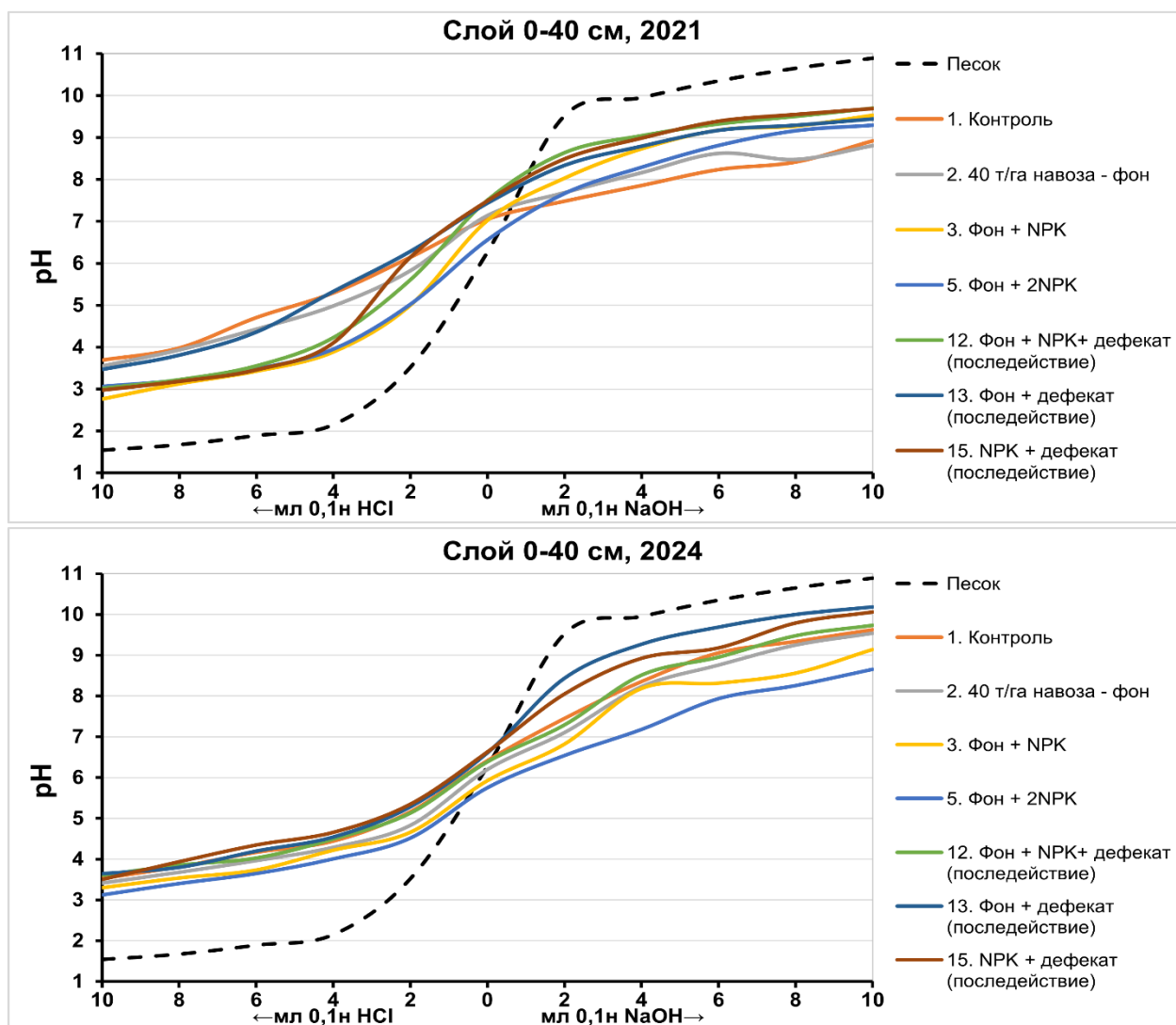


Рисунок 63 – Кривые буферности слоя 0–40 см чернозема выщелоченного вариантов опыта

На основе полученных кривых буферности рассчитывались площади буферности к подкислению (S_k) и подщелачиванию ($S_{щ}$) и индекс кислотно-основного равновесия (таблица 14).

Таблица 14 – Буферные площади и индекс кислотно-основного равновесия различных вариантов исследования за 2021 и 2024 года.

Вариант	Слой, см	2021			2024		
		$S_k, \text{см}^2$	$S_{щ}, \text{см}^2$	ИНД $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$, усл. ед.	$S_k, \text{см}^2$	$S_{щ}, \text{см}^2$	ИНД $[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$, усл. ед.
1. Контроль	0-20	59,8	50,4	1,19	47,6	36,8	1,29
	20-40	65,6	42,8	1,53	47,6	32,2	1,48
	40-60	60,0	35,8	1,68	44,6	14,4	3,10
	60-80	53,4	41,6	1,28	45,4	8,6	5,28
	80-100	60,8	37,2	1,63	105,6	7,2	14,67
2.40 т/га навоза - фон	0-20	57,8	44,0	1,31	40,4	34,2	1,18
	20-40	59,8	42,4	1,41	40,8	41,4	0,99
	40-60	63	30,2	2,09	46,2	27,8	1,66
	60-80	70,2	30,4	2,31	48,2	21,4	2,25
	80-100	48	27,6	1,74	38,6	6,8	5,68
3. Фон + NPK	0-20	35	32,4	1,08	36,0	55,0	0,65
	20-40	40,1	24,4	1,64	41,2	43,6	0,94
	40-60	43,7	19,8	2,21	41,2	24,6	1,67
	60-80	49,5	21,5	2,30	36,8	21,4	1,72
	80-100	39,8	20,6	1,93	38,4	11,2	3,43
5. Фон + 2NPK	0-20	31,8	42,4	1,33	34,6	66,8	0,52
	20-40	43,2	32,2	1,34	33,6	53,0	0,63
	40-60	45,2	23,6	1,92	42,6	40,4	1,05
	60-80	50,8	21,2	2,40	36,8	32,4	1,14
	80-100	125	9,0	13,89	59,6	22,8	2,61
12. Фон + NPK + дефека (последнее действие)	0-20	49,2	23,0	2,14	45,8	38,4	1,19
	20-40	43,3	20,8	2,08	46,4	30,4	1,53
	40-60	51,0	21,4	2,38	45,4	18,6	2,44
	60-80	58,8	21,0	2,80	43,4	12,0	3,62
	80-100	58,0	20,4	2,84	39,4	10,6	3,72
13. Фон + дефека (последнее действие)	0-20	63,4	27,8	2,28	50,0	20,4	2,45
	20-40	62,0	27,2	2,28	46,4	11,8	3,93
	40-60	54,4	24,6	2,21	46,2	17,0	2,72
	60-80	54,2	23,2	2,34	45,0	3,4	13,24
	80-100	57,6	21,0	2,74	50,8	6,6	7,70
15. NPK + дефека (последнее действие)	0-20	46,2	24,8	1,86	53,6	25,0	2,14
	20-40	28,2	20,4	1,38	49,0	22,8	2,15
	40-60	45,0	18,2	2,47	39,2	42,8	0,92
	60-80	80,4	17,8	4,52	75,4	9,6	7,85
	80-100	125,0	17,0	7,35	121,8	-	-

Полученные результаты расчетов буферных площадей в кислотном и щелочном интервале свидетельствуют о широком диапазоне изменений. Так в 2021 году площадь к подкислению (S_k , см^2) варьировала 28,2–125 см^2 , наименьшая площадь отмечается на дефекатированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 15), максимальная площадь - 125 см^2 , наблюдается на двух вариантах в слое 80–100 см, на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5) и на варианте последствий дефеката с минеральными удобрениями (вар. 15). Площадь к подщелачиванию ($S_{щ}$, см^2) демонстрирует изменения в диапазоне 9–50,4 см^2 , минимальная площадь отмечается на унавоженном варианте с двойной дозой минеральных удобрений (вар. 5) в слое 80–100 см, наибольшая площадь наблюдается на контрольном варианте в слое 0–20 см.

В 2024 году площадь к подкислению находилась в диапазоне 33,6–121,8 см^2 , наименьшая площадь отмечается на варианте 5 в слое 20–40 см, максимальная площадь зафиксирована также, как и в 2021 году на варианте 15 в слое 80–100 см. Площадь в щелочном интервале колебалась от 3,4 до 66,8 см^2 , минимальная площадь наблюдается на дефекатированном варианте с навозом (вар. 13) в слое 60–80 см, максимальная площадь на варианте с высокой дозой минеральных удобрений по фону навоза (вар. 5) в слое 0–20 см.

Проведенные расчеты показали, что устойчивость почв к подкислению возрастает вниз по почвенному профилю, что, возможно, связано с увеличением содержания карбонатов по почвенному профилю.

Индекс кислотно-основного равновесия рассчитан как простое соотношение площадей под кривыми буферности в кислотном (S_k) и щелочном ($S_{щ}$) интервалах.

Индекс кислотно-основного равновесия системы ($\text{ИНД}[\text{H}^+]/[\text{OH}^-]$, усл. ед.) исследуемых вариантов за 2021 и 2024 годы демонстрирует широкий диапазон изменений (рис. 64).

Так, в 2021 году индекс находился в пределах 1,08–13,89, где минимальный индекс отмечается на варианте с одинарной дозой минеральных

удобрений по унавоженному фону (вар. 3) в слое 0–20 см, наибольший наблюдается в слое 80–100 см на варианте с высокой дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5).

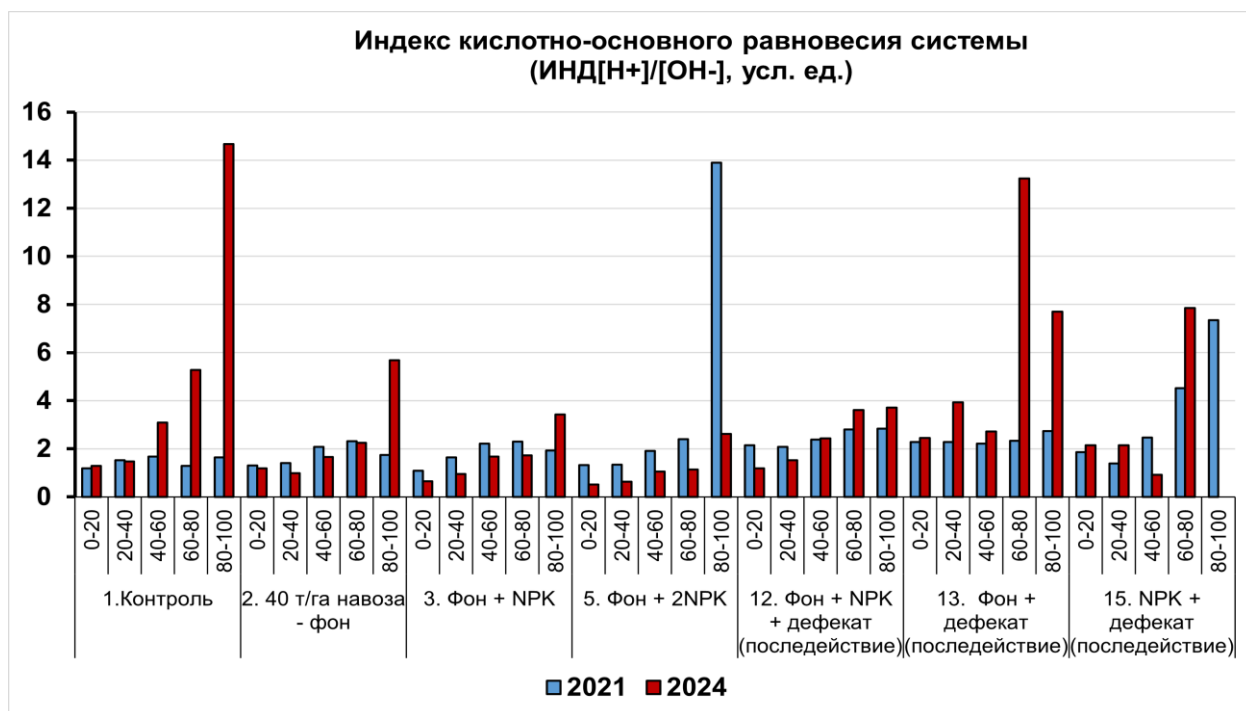


Рисунок 64 – Индекс кислотно-основного равновесия системы исследуемых почвенных образцов различных вариантов удобренности

В 2024 году индекс кислотно-основного равновесия варьировал в широком диапазоне от 0,52 до 14,67. Минимальное значение (0,52) было зафиксировано в слое 0–20 см на унавоженном варианте с двойной дозой минеральных удобрений (вар. 5). Это свидетельствует о том, что буферность данной почвы в кислотном интервале ($S_k = 34,6 \text{ см}^2$) примерно в два раза ниже, чем в щелочном ($S_{щ} = 66,8 \text{ см}^2$). Такое соотношение (ИНД < 1) указывает на преобладание буферности к кислотным воздействиям над буферностью к щелочным, что характерно для почв с кислой реакцией среды и повышенной устойчивостью к подщелачиванию. Максимальный индекс наблюдается на контрольном варианте в слое 80–100 см, это означает что почва более устойчива к изменению рН при добавлении кислоты. Также наблюдаются наибольшие значения индекса в нижележащих горизонтах 60–100 см на дефекатированных вариантах 13 и 15. Это объясняется пульсационно-миграционным карбонатно-кальциевым режимом, связанным с цикличностью увлажнения и иссушения почвенно-

грунтовой толщ [153].

Влияние удобрений и мелиоранта на буферную способность почвы в слое 0–40 см детально проанализировано в таблице 15.

Таблица 15 – Буферные площади слоя 0–40 см исследуемых образцов чернозема выщелоченного.

Вариант	2021		2024	
	Ск, см ²	Сщ, см ²	Ск, см ²	Сщ, см ²
1. Контроль	62,7	46,6	47,6	34,5
2. 40 т/га навоза – фон	58,8	43,2	40,6	37,8
3. Фон+ NPK	37,6	28,4	38,6	49,3
5. Фон + 2NPK	37,5	37,3	34,1	59,9
12. Фон + NPK+ дефекат (последствие)	46,3	21,9	46,1	34,4
13. Фон + дефекат (последствие)	62,7	27,5	48,2	16,1
15. NPK + дефекат (последствие)	37,2	22,6	51,3	23,9

Анализ полученных буферных площадей в кислотном и щелочном интервале пахотного слоя демонстрирует доминирование областей с кислой реакцией. Исключением является 2024 год, когда на вариантах 3 и 5 зафиксировано превышение щелочных площадей. В 2021 году наибольшие площади при подкислении (62,7 см²) отмечаются на контрольном варианте и варианте совместного последствия дефеката и навоза (вар. 13), минимальная площадь (37,2 см²) зафиксирована на дефекарированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 15). При подщелачивании наибольшая площадь (46,6 см²) наблюдается на контрольном варианте, наименьшая площадь (21,9 см²) отмечается на варианте совместного последствия дефеката и навоза с внесением минеральных удобрений (вар. 12). В 2024 году при подкислении минимальная площадь (34,1 см²) отмечается на варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), наибольшая площадь (51,3 см²) наблюдается на дефекарированном варианте с внесением минеральных удобрений (вар. 15). В щелочном интервале наименьшая площадь (16,1 см²) зафиксирована на варианте комплексного последствия органического фона и мелиоранта (вар. 13), наибольшая площадь (59,9 см²) отмечается на унавоженном варианте с внесением двойной дозы минеральных удобрений (вар. 5). Рисунок 65 иллюстрирует индекс кислотно-основного равновесия для

слоя 0–40 см.

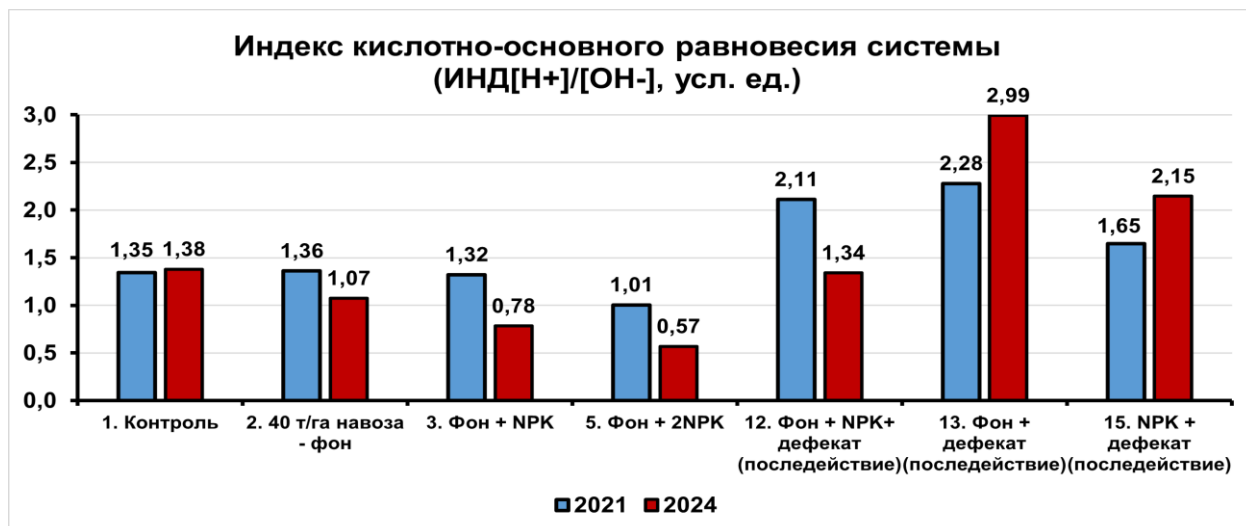


Рисунок 65 – Индекс кислотно-основного равновесия системы исследуемых почвенных образцов чернозема выщелоченного в слое 0–40 см

В слое 0–40 см индекс кислотно-основного равновесия (ИНД, усл. ед.) варьировал в 2021 году от 1,01 до 2,28, а в 2024 году – в более широких границах от 0,57 до 2,99. Минимальный индекс за исследуемый период наблюдается на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по органическому фону (вар. 5), наибольший индекс отмечается на варианте совместного последствия органического фона и дефеката (вар. 13). В 2024 году на вариантах 3 и 5 зафиксирован индекс <1 , что характерно для кислых почв, где повышается устойчивость к подщелачиванию.

Буферную способность почвенного раствора оценивают также по интенсивности буферности [133, 147].

Интенсивность буферности (β , смоль $\text{H}^+(\text{OH}^-)/\text{кг} \cdot \text{ед. pH}$) определяется как количество молей кислоты (основания), которое необходимо добавить к почвенной системе, чтобы изменить pH на 1, и рассчитана для интервала от начальной (нулевой) точки титрования.

Интенсивный показатель определяется по полученным данным, и рассчитывается по уравнению:

$$\beta = \Delta C_i / \Delta \text{pH},$$

где ΔC_i – количество добавленного в условиях опыта реагента, ΔpH – изменение pH в системе, которое произошло в результате добавления следующей

порции титранта.

В таблицах 16–17 приведены расчеты общей интенсивности буферности чернозёма выщелоченного.

Таблица 16 – Общая интенсивность буферности (вобщ) чернозема выщелоченного при подщелачивании, смоль (ОН⁻)/кг*ед. рН

Вариант	Слой, См	2021 год					2024 год				
		Количество NaOH, мл									
		2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
1.Контроль	0-20	4,29	5,33	5,17	5,71	4,81	2,00	2,30	2,29	2,74	3,10
	20-40	2,78	4,65	4,96	6,02	6,02	1,87	1,87	2,25	2,73	3,13
	40-60	3,17	4,17	5,26	6,02	5,56	1,21	1,56	1,97	2,37	2,67
	60-80	3,77	4,94	6,45	5,00	5,56	1,61	2,89	4,16	5,31	6,49
	80-100	4,35	4,21	5,77	6,84	7,04	1,18	1,34	1,97	2,42	2,82
2. 40 т/га навоза- фон	0-20	3,70	4,55	5,41	5,03	5,88	2,25	2,27	2,56	2,86	3,15
	20-40	3,64	3,77	5,17	5,84	6,13	2,17	1,74	2,16	2,42	2,85
	40-60	2,30	3,25	4,58	5,8	6,25	1,85	1,72	2,36	2,66	3,12
	60-80	3,51	4,60	5,66	6,72	6,45	1,55	1,70	2,21	2,52	2,83
	80-100	3,28	4,49	5,22	6,35	6,21	1,20	1,30	1,80	2,18	2,47
3. Фон + NPK	0-20	1,96	2,40	2,98	3,76	3,98	2,47	2,00	2,80	3,20	3,22
	20-40	2,02	2,30	2,62	3,39	4,00	2,04	1,59	2,27	2,89	3,01
	40-60	1,79	2,96	3,47	4,28	4,95	1,74	1,43	1,96	2,52	2,63
	60-80	2,35	3,42	3,68	4,26	4,63	1,55	0,80	0,72	0,83	0,75
	80-100	2,41	3,48	4,69	4,28	4,88	1,57	1,50	1,67	2,13	2,60
5. Фон + 2NPK	0-20	1,75	2,48	2,63	3,07	3,73	2,22	3,17	3,24	4,12	3,80
	20-40	1,87	2,16	2,70	3,09	3,60	2,94	2,50	2,38	2,61	3,14
	40-60	1,48	2,31	3,03	6,45	4,03	1,92	2,04	2,45	2,70	3,17
	60-80	1,90	2,45	3,43	3,60	4,05	1,56	1,93	2,25	2,48	2,91
	80-100	2,47	3,39	4,23	3,98	4,35	2,30	2,80	3,49	3,65	4,15
12. Фон + NPK+ дефекат (после- действие)	0-20	1,75	2,68	3,33	3,86	4,46	1,90	2,56	2,51	2,61	2,92
	20-40	1,79	2,53	3,28	4,17	4,67	2,63	1,49	2,19	2,57	3,06
	40-60	2,30	3,51	3,35	3,90	4,63	1,37	1,87	2,06	2,18	2,48
	60-80	2,90	3,81	4,11	4,57	4,95	1,09	1,59	1,92	2,42	2,54
	80-100	2,86	3,70	4,72	5,56	5,56	1,08	1,42	1,81	2,22	2,56
13. Фон + дефекат (после- действие)	0-20	2,15	2,84	3,30	4,23	4,83	1,24	1,57	2,05	2,39	2,94
	20-40	2,30	3,08	3,64	4,40	5,15	0,98	1,43	1,85	2,33	2,66
	40-60	2,27	2,88	3,77	4,32	5,18	1,27	1,50	2,12	2,56	3,00
	60-80	2,04	2,99	3,75	4,42	5,29	0,95	1,42	1,75	2,17	2,52
	80-100	2,41	3,45	4,23	5,06	5,24	1,38	1,73	2,08	2,54	3,13
15.NPK+ дефекат (после- действие)	0-20	1,91	2,39	2,87	3,57	4,26	1,31	2,14	2,70	2,46	2,97
	20-40	2,11	3,03	3,51	4,26	4,88	1,53	1,47	2,08	2,61	2,87
	40-60	1,54	2,29	2,70	3,48	4,10	1,45	1,30	1,86	1,72	1,88
	60-80	2,44	3,60	3,68	4,21	4,37	2,35	1,45	2,03	2,50	2,90
	80-100	2,78	4,08	5,13	5,52	5,65	0,97	1,74	2,15	2,66	3,17

Таблица 17 – Общая интенсивность буферности (вобщ) чернозема выщелоченного при подкислении смоль Н⁺/кг*ед. рН

Вариант	Слой, См	2021 год					2024 год				
		Количество HCl, мл									
		2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
1.Контроль	0-20	2,00	2,20	2,55	2,66	2,92	1,69	2,07	2,73	3,13	3,47
	20-40	2,47	2,37	2,56	2,56	3,03	1,50	1,98	2,61	3,02	3,45
	40-60	1,92	1,65	1,94	2,19	2,61	1,22	1,75	2,15	2,63	3,01
	60-80	1,83	2,94	2,26	2,31	2,62	1,16	1,60	2,14	2,48	2,89
	80-100	2,25	1,72	1,71	2,04	2,33	3,08	3,88	5,61	6,35	7,46
2. 40 т/га навоза- фон	0-20	1,68	2,02	2,23	2,56	2,80	1,46	2,06	2,64	3,14	3,53
	20-40	1,39	1,72	2,20	2,44	2,77	1,46	2,13	2,73	3,21	3,65
	40-60	1,64	1,32	1,73	2,00	2,34	1,42	1,83	2,38	2,75	3,24
	60-80	1,30	1,69	1,92	2,22	2,23	1,31	1,83	2,33	2,66	3,14
	80-100	1,42	1,02	1,37	1,58	1,88	1,05	1,47	1,90	2,35	2,82
3. Фон + NPK	0-20	1,03	1,27	1,70	2,14	2,26	1,54	2,16	2,75	3,35	3,70
	20-40	0,95	1,27	1,63	1,97	2,44	1,63	2,56	2,73	3,36	3,92
	40-60	0,74	1,10	1,43	1,72	2,08	1,37	1,72	2,41	2,78	3,23
	60-80	1,16	1,11	1,45	1,73	2,05	1,22	1,73	2,17	2,56	3,10
	80-100	0,80	0,95	1,23	1,61	1,93	1,05	1,57	2,05	2,39	2,75
5. Фон + 2NPK	0-20	1,08	1,52	2,04	2,48	3,00	1,79	2,47	2,90	3,42	3,80
	20-40	1,65	1,55	1,87	2,31	2,73	1,48	2,14	2,80	3,39	3,80
	40-60	1,27	1,25	1,67	2,05	2,42	1,49	2,11	2,70	3,03	3,34
	60-80	1,13	1,58	1,55	1,84	2,23	0,99	1,90	2,38	2,87	3,37
	80-100	3,92	4,55	5,61	7,02	7,35	1,74	1,51	1,96	2,19	2,39
12. Фон + NPK+ дефекат (послед- действие)	0-20	1,44	1,28	1,56	1,96	2,24	1,49	2,21	2,54	3,24	3,88
	20-40	0,83	1,64	1,48	1,79	2,22	1,71	2,03	2,55	3,09	3,37
	40-60	1,28	1,20	1,42	1,81	2,21	1,31	1,83	2,30	2,80	3,34
	60-80	1,37	1,29	1,47	1,79	2,14	1,16	1,68	2,15	2,47	2,87
	80-100	2,13	1,30	1,27	1,55	1,87	1,08	1,61	2,03	2,45	2,82
13. Фон + дефекат (послед- действие)	0-20	1,80	2,02	2,17	2,28	2,60	1,60	2,02	2,63	3,00	3,52
	20-40	1,68	1,79	1,95	2,14	2,44	1,43	1,86	2,36	2,71	3,24
	40-60	1,46	1,44	1,6	1,98	2,33	1,36	1,79	2,15	2,54	2,99
	60-80	1,31	1,29	1,55	1,88	1,22	1,19	1,65	2,03	2,40	2,80
	80-100	1,53	1,16	1,46	1,79	2,12	2,50	3,60	3,95	4,94	5,92
15.NPK+ дефекат (послед- действие)	0-20	1,80	1,33	1,61	1,99	2,35	1,77	1,94	2,80	2,95	3,12
	20-40	1,27	1,00	1,38	1,74	2,09	1,40	2,13	2,48	3,00	3,29
	40-60	1,20	1,23	1,51	1,87	2,28	2,99	3,64	4,00	5,16	5,21
	60-80	3,17	3,20	1,94	2,07	2,32	2,41	2,70	3,37	3,20	2,96
	80-100	3,08	4,71	5,31	6,45	5,92	2,70	3,33	3,97	5,03	5,65

При подкислении чернозема выщелоченного определены следующие диапазоны общей интенсивности (вобщ): для 2021 года 0,74–7,35 смоль Н⁺/кг*ед. рН, для 2024 года 0,99–7,46 Н⁺/кг*ед. рН. Минимальные значения общей интенсивности наблюдаются на вариантах с внесением минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3 и 5). В 2021 году наименьшее

значение зафиксировано в слое 40–60 см на варианте с одинарной дозой минеральных удобрений (вар. 3), в 2024 году в слое 60–80 см на варианте с двойной дозой минеральных удобрений по унавоженному фону (вар. 5). Наибольшие значения общей интенсивности в 2021 году ($7,35 \text{ Н}^+/\text{кг}^*\text{ед. рН}$) зафиксированы в слое 80–100 см на унавоженном варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений (вар. 5), в 2024 году ($7,46 \text{ Н}^+/\text{кг}^*\text{ед. рН}$) отмечается в слое 80–100 см на контрольном варианте. Установлено, что площади буферности при подщелачивании меньше, чем площади буферности при подкислении, что говорит о большей устойчивости этих почв к подкислению, чем к подщелачиванию. Это обусловлено факторами почвообразования. Однако, в 2024 году на вариантах с внесением минеральных удобрений по органическому фону (вар. 3 и 5) наблюдается преобладание устойчивости к подщелачиванию, что характерно для кислых почв.

Все варианты исследования при подщелачивании характеризуются однотипностью химических реакций, которые нейтрализуют добавляемую в почву щелочь за счет аминогрупп и фенольных гидроксильных молекул органического вещества. При подкислении можно идентифицировать реакции растворения карбонатов и реакции катионного обмена, а также реакции протонирования зависимых от рН обменных позиций.

Наибольшая общая интенсивность отмечается в слое 80–100 см, что вполне объяснимо более высоким содержанием карбонатов, характерным для черноземов и подстилающих пород. Минимальные значения отмечаются на вариантах с применением минеральных удобрений (вар. 3 и 5).

При сравнении показателей буферной способности чернозема выщелоченного за годы исследований установлено, что отмечается незначительное сужение диапазона при подкислении и расширение диапазона рН при подщелачивании. Также изменяются площади подкисления и подщелачивания. Отмечаются изменения индекса кислотно-основного равновесия. Появление значений ниже 1,0 (0,52–0,99) в 2024 году на вариантах 3 и 5 (NPK и 2NPK на органическом фоне) указывает на сдвиг в сторону кислых почв и повышение

устойчивости к подщелачиванию. Рост максимальных значений (до 14,67), особенно в нижних горизонтах (80–100 см) на контрольном и дефекатированных вариантах, что свидетельствует об усилении устойчивости к подкислению в глубинных слоях. В целом, отмечается снижение общей буферной ёмкости к подщелачиванию на большинстве вариантов, что может быть связано с истощением обменных катионов и функциональных групп органических соединений (карбоксильная, фенольная и др.). Это подтверждается известными литературными данными [63, 133, 163]. На вариантах опыта с внесением дефеката мы отмечаем стабилизацию и даже рост устойчивости к подкислению, что подтверждает ведущую роль гумусовых веществ и карбонатов кальция в поддержании почвенной буферности.

На рисунке 66 представлены рассчитанные коэффициенты корреляции между индексом кислотно-основного равновесия чернозема выщелоченного различных вариантов удобрённости и его физико-химическими свойствами.

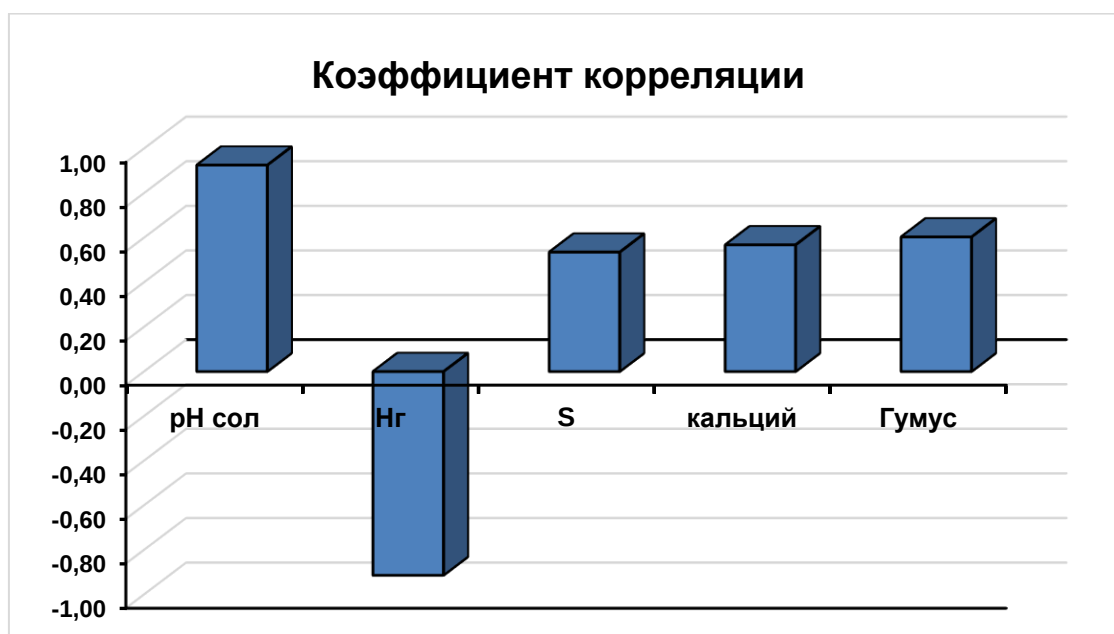


Рисунок 66 – Коэффициенты корреляции между индексом кислотно-основного равновесия (КОР) и некоторыми физико-химическими свойствами анализируемых почвенных образцов

Выявлено, что между индексом КОР и потенциальной кислотностью связь высокая, а между содержанием гумуса, суммой обменных оснований –

средняя. Можно отметить, что индекс КОР является интегральным показателем, который зависит от карбонатнокальциевой и гумусовой буферных систем.

Таким образом, выявлено, что варианты с внесением минеральных удобрений (вар. 3 и 5) на органическом фоне демонстрируют снижение буферной способности к подщелачиванию и повышение устойчивости к подкислению. Наибольшая буферная устойчивость к подкислению отмечается на вариантах с совместным применением навоза и донного осадка (вар. 12 и 13). Устойчивость к подкислению возрастает с глубиной, что связано с увеличением содержания карбонатов в нижележащих горизонтах. Анализируемые почвенные образцы чернозема выщелоченного более устойчивы к подкислению, чем к подщелачиванию, что обусловлено их генетическими особенностями, в частности карбонатным профилем.

6. ОЦЕНКА АГРОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПРИ МНОГОЛЕТНЕМ ВЛИЯНИИ УДОБРЕНИЙ И ДЕФЕКТА

Актуальность исследования энергетического состояния почв связана с глобальными экологическими проблемами, снижением продуктивности сельского хозяйства и деградацией почвенных ресурсов. Это требует разработки новых подходов для оценки энергетического потенциала почв как основы агроэкосистем в адаптивно-ландшафтном земледелии.

Управление агроландшафтами нуждается в комплексном изучении не только потоков веществ, но и сопряжённых с ними энергетических потоков. Для этого необходим системный анализ вещественно-энергетического баланса естественных и антропогенно изменённых почв, что обуславливает потребность в разработке методов диагностики их энергетического состояния.

С термодинамической точки зрения почва представляет собой открытую, гетерогенную и многофазную систему, в которой протекают необратимые процессы. Как отмечал В. А. Ковда, расчет энергетического состояния таких сложных систем является многоэтапной и методологически трудной задачей. Однако возможно выделение и абстрагирование отдельных энергетических подсистем почвы, к которым при известных условиях применимы общие термодинамические принципы [105, 119].

Анализ литературных источников подтверждает, что органическое вещество выступает центральным звеном почвенной энергетики. Именно его состав, количество и качество определяют потоки вещества и энергии в биогеоценозе, формируя плодородие, экологическую стабильность и продуктивность почвы [8, 61, 122]. Большинство исследователей сходятся во мнении, что органическое вещество выступает ключевым естественным аккумулятором и источником энергии в почвенной экосистеме. Следовательно, энергетическое состояние почвы напрямую коррелирует с содержанием и динамикой гумуса и других органических компонентов [206, 209].

Органическое вещество играет ключевую роль в поддержании устойчивого энерго-массообмена [60]. В агроэкосистемах биологический круговорот разомкнут, огромная биомасса отчуждается с урожаем. Некоторая часть растительных остатков минерализуется, и только незначительная часть гумифицируется в стабильный гумус. Поэтому для оценки качества почвенных ресурсов и энергетических потоков в агроландшафтах применяется анализ энергетического состояния почвы с помощью основных характеристик гумусного состояния. Именно энергия, накопленная в высокомолекулярных гумусовых структурах, является важнейшей энергетической составляющей всего агроценоза и используется для многочисленных биохимических процессов, таких как почвообразование, фиксация азота и многие другие [199, 204].

Согласно расчетам В. А. Ковды, запасы энергии в почвенном гумусе 1 га дерново-подзолистой почвы эквивалентны 50 т бензина, а 1 га чернозема соответствует 250 т бензина. Ученый подчеркивал, что почвы являются «универсальным аккумулятором и распределителем» жизненно важной энергии [119]. Многие современные исследователи подтверждают [151, 192, 201], что запасы органического углерода служат важным индикатором энергетического состояния и устойчивости агроэкосистемы, что особенно важно в условиях глобального изменения климата.

В трудах А.Е. Ферсмана [119] также подробно описана энергетическая интерпретация геохимических процессов «Энергетический подход к анализу динамически развивающихся процессов природы является конечной целью наших исканий... мы должны перейти на единое мерило определения хода процесса, причем таковым может быть калория или киловатт».

С помощью термодинамических расчетов можно оценивать стабильность ПОВ. Например, выявлено, что разложение гумуса подчиняется принципу минимума энергии Гиббса. Наиболее устойчивые фракции (например, ГК, прочно связанные с минеральной матрицей) имеют более низкую энергию Гиббса, что делает их энергетически невыгодными для разложения микроорганизмами [212]. Это объясняет их долговременное сохранение в почве

(сотни-тысячи лет) и подтверждает взгляд В. А. Ковды о гумусе как аккумуляторе энергии.

Для оценки суммарной энергии в агроэкосистемах применяют метод «Эмериджи» (Emergy Analysis), в котором в качестве единицы измерения используют солнечные эмджоули (sej). Например, в исследовании системы земледелия «пшеница-кукуруза» (Северо-Китайская равнина) было показано, что она в значительной степени зависит от невозобновляемых ресурсов, особенно химических удобрений [199]. Это снижает долгосрочную устойчивость таких систем, увеличивает нагрузку на окружающую среду и косвенно истощает ресурсный потенциал почвы.

В докладах Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) и Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) почвенный органический углерод и энергетический потенциал почв рассматриваются как ключевые индикаторы здоровья почв. Эти показатели напрямую связаны с продуктивностью агроэкосистем, их устойчивостью к засухе и эрозии, а также со способностью смягчать последствия изменения климата.

Концепция «Углеродного земледелия» (Carbon Farming) рассматривает почву как энергетический резервуар. Такие агроприемы, как нулевая обработка, сидерация и внесение органических удобрений, направлены на повышение энергетического потенциала почвы путём увеличения и стабилизации запасов органического вещества (ОВ) [65].

Нами для решения научно-практических задач была использована методика [119]. В таблице 18 представлены результаты расчетов основных энергетических показателей, которые были выполнены на основании средних данных за период исследования (2021–2024 гг.), для сравнения были использованы результаты расчетов по данным целины чернозема выщелоченного [128]:

Q_g – запасы энергии в гумусе, гДж/га;

Q_{lg} – запасы энергии в лабильных гумусовых веществах, гДж/га;

Q_{ig} – запасы энергии в инертном гумусе, гДж/га;

$Q_{НВ}$ – запасы энергии в негумифицированном ОВ, гДж/га;

Q – энергопотенциал ПОВ, гДж/га;

$Q_{вт}$ – количество энергии, выделяемой при трансформации ПОВ, рассчитывается на основании учета запасов энергии в гумусе и негумифицированном ОВ, гДж/га;

PA – показатель активности энергетических процессов

E_c – энергосодержание почвы – содержание энергии в прочносвязанном и «свободном» ОВ в единице объема почвы, гДж/м³

E_y – уровень энергоемкости почвы – это количество энергии в инертном гумусе и в лабильных гумусовых веществах в единице объема, гДж/м³

P_y – показатель устойчивости плодородия почвы.

Используемые для расчетов коэффициенты представлены в приложении П.

Установлено, что запасы энергии в гумусе на опытных вариантах колеблются в пределах 2289–2749 гДж/га. На целине энергозапасы составляют 3201 гДж/га. Максимальные запасы энергии содержатся в инертном гумусе – 2081–2499 гДж/га на вариантах опыта и 2897,14 гДж/га на целине. Запасы энергии в лабильном органическом веществе максимальны на целине (304,12 гДж/га), и фоновом варианте (250,25 гДж/га). В негумифицированных остатках накапливается от 57,3 до 68,8 гДж/га на опытных вариантах и 230,5 гДж/га на целине. Энергопотенциал ПОВ по всем вариантам опыта характеризуется как критический, в целинном образце – низкий. Количество энергии, выделяемой при трансформации ОВ антропогенно преобразованных почв, находится на критическом уровне.

Показатель активности энергетических процессов в ПОВ определяет, какую часть от энергопотенциала ПОВ составляет энергия, выделяемая при трансформации его лабильной части. Для всех анализируемых образцов чернозема выщелоченного опытного участка данный показатель низкий.

Таблица 18 – Результаты оценки энергетического состояния почвенного органического вещества по вариантам опыта

Вариант	Q _г	Q _{лг}	Q _{иг}	Q _{нв}	Q	оценка	Q _{вт}	оценка	ПА	оценка	Ес	Е _у	Пу	оценка
1. Контроль	2289,49	208,34	2081,14	57,24	2346,72	критич	144,56	критич	0,0616	низкий	1173,36	1144,74	2,58	средний
2. Фон - 40 т/га навоза	2749,98	250,25	2499,73	68,75	2818,73	критич	173,63	критич	0,0616	низкий	1409,37	1374,99	6,26	оптим.
3. Фон + NPK	2571,05	233,97	2337,08	64,28	2635,32	критич	162,34	критич	0,0616	низкий	1401,00	1385,00	6,52	оптим.
5. Фон + 2NPK	2514,52	228,82	2285,70	62,86	2577,38	критич	158,77	критич	0,0616	низкий	1288,69	1257,26	3,76	средний
12. Фон + NPK + дефекат (последействие)	2396,27	218,06	2178,21	59,91	2456,17	критич	151,30	критич	0,0616	низкий	1415,00	1407,00	7,33	оптим.
13. Фон + дефекат (последействие)	2379,51	216,54	2162,97	59,49	2439,00	критич	150,24	критич	0,0616	низкий	1382,00	1311,00	4,78	средний
15. NPK + дефекат (последействие)	2576,00	234,42	2341,59	64,40	2640,40	критич	162,65	критич	0,0616	низкий	1320,20	1288,00	4,23	средний
Целина	3201,26	304,12	2897,14	230,49	3431,75	низкий	355,53	средний	0,1036	оптим.	1715,87	1600,63	-	-

Энергосодержание почвы среди вариантов опыта максимально на варианте с совместным применением дефеката и удобрений (1415 гДж/м³). Уровень энергоемкости колеблется в пределах 1145–1375 гДж/м³ на опытных вариантах, 1600 гДж/м³ на целине.

Показатель устойчивости плодородия почвы, который определяется как отношение величины общей энергии ПОВ к разности между запасами энергии в гумусе целинной и изучаемой почв, максимален на варианте с комплексным внесением минеральных и органических удобрений по известкованному фону (7,33 – оптимальный уровень). Минимальная устойчивость плодородия почвы отмечается на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений (3,76). Установлено, что чем выше значения этого показателя, тем больше устойчивость плодородия почвы.

Представленные результаты расчетов носят ориентировочный характер в связи с использованием справочных и табличных данных. Для определения точного характера интенсивности энергетических процессов в почве требуется значительное количество опытных данных фракционно-группового и элементного состава органического вещества почв. Тем не менее, можно определить направленность изучаемых явлений и процессов. Можно предположить, что условия многолетнего стационарного опыта по изучению влияния действия удобрений и мелиоранта приводят к снижению энергopotенциала органического вещества почв, уровня энергоемкости почвы, запасов энергии в разных формах гумуса, а также показателя устойчивости плодородия почв. Внесение высоких доз минеральных удобрений приводит к максимальной интенсивности деградационных процессов в ПОВ. Известкование совместно с применением минеральных и органических удобрений компенсирует данный эффект.

Агрономическая эффективность

В системе комплексной оценки результативности применения удобрений и химических мелиорантов (таких как дефекат) центральное место занимает определение агрономической эффективности. В отличие от

экономической или энергетической составляющих, агрономическая эффективность базируется исключительно на натуральных показателях и отражает непосредственное влияние средств химизации на продуктивность сельскохозяйственных культур [167].

В рамках проведения расчетов по оценке продуктивности севооборота и эффективности исследуемых вариантов опыта использовался показатель зерновой единицы. Данный показатель служит инструментом эквивалентного соизмерения разнородной продукции растениеводства (зерна, силоса, корнеплодов) на основе их кормовой ценности [177]. В таблице 19 приведены результаты определения зерновых единиц усредненных данных по озимой пшенице.

Таблица 19 – Зерновые единицы озимой пшеницы, ц/га

Варианты опыта	Озимая пшеница по вико-овсу		Озимая пшеница по чистому пару,	
	З.ед. ц/га	прибавка	З.ед. ц/га	прибавка
1.Контроль	43,1	-	36,6	-
2.Фон - 40 т/га навоза	44,3	1,2	38,0	1,4
3.Фон + NPK	45,1	2,0	39,9	3,3
5.Фон + 2NPK	45,7	2,6	41,3	4,7
12. Фон + NPK + дефекат (последствие)	48,5	5,4	42,6	6,0
13. Фон + дефекат (последствие)	47,6	4,5	39,2	2,6
15. NPK + дефекат (последствие)	45,3	2,2	39,8	3,2
НСР _{0,95}	1,08	-	0,95	-

В результате проведенных исследований установлено, что наибольшая прибавка урожайности озимой пшеницы обеспечивается при комплексном применении органических, минеральных удобрений и последствия дефеката. Максимальные значения прибавки получены в варианте 12, где зерновые единицы возростали на 12,5% (+ 5,4 з.ед. ц/га) по предшественнику вико-овес и на 16,4% (+ 6 з.ед. ц/га) по чистому пару относительно контроля. При этом по чистому пару эффективность изучаемых вариантов проявлялась в большей степени: прибавки здесь варьировали от 3,8% (вар. 2) до 16,4% (вар. 12), тогда как по вико-овсу диапазон составил от 2,8% до 12,5%. Полученные данные подтверждают целесообразность совместного применения дефеката с минеральными удобрениями и навозом для повышения продуктивности озимой пшеницы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных нами в 2021–2024 гг. исследований в полевом стационарном опыте на черноземе выщелоченном можно сделать следующее заключение:

1. Изучаемые почвы относятся к пылевато-иловатым тяжелым суглинкам, доминирующей фракцией является илистая (25,12–39,48%). Под влиянием агрогенной нагрузки произошла перестройка профильного распределения физической глины ($<0,01$ мм). На залежи отмечен равномерно-регрессивный тип профиля, в то время как на вариантах опыта сформировались аккумулятивно-элювиально-иллювиальный и элювиально-иллювиальный типы. Это свидетельствует о проявлении слабовыраженного процесса лессиважа – вымывания тонкодисперсных частиц из верхних горизонтов (0–40 см) и их аккумуляции в средней части профиля (40–80 см) или внутрипочвенном оглинивании. Отмечается достоверное снижение содержания лессовой фракции под воздействием применяемых агротехнологий на 14–23% относительно залежи. Величина удельной поверхности почвы также изменялась в зависимости от системы удобрений и определялась содержанием тонкодисперсных частиц ($r = 0,70–0,78$). Выявлена умеренная, но значимая положительная корреляция с содержанием гумуса ($r = 0,60$), что свидетельствует о их взаимосвязи в формировании поглотительного комплекса.

2. Длительное внесение минеральных удобрений на фоне навоза (варианты 3 и 5) приводит к устойчивому подкислению почвы относительно контрольного варианта. Это выражается в снижении обменной кислотности (pH_{KCl}) на 0,29–0,48 ед. pH и значительном росте гидролитической кислотности (Нг) на 0,76–1,57 мг-экв/100 г. Параллельно уменьшились сумма поглощенных оснований (максимально на 2,83 мг-экв/100 г) и степень их насыщенности (на 2,35–6,07%), что свидетельствует о снижении буферной способности почвы. Применение дефеката, даже в его последствии (варианты 12, 13, 15), оказывает противоположное, мелиорирующее действие: pH_{KCl} повысился на 0,26–0,41 ед. pH, а гидролитическая кислотность уменьшилась на 0,66–1,03 мг-

экв/100 г почвы. Последствие дефеката также снижает потерю обменных оснований и повышает степень насыщенности почвы основаниями на 1,36–2,96%, стабилизируя поглощающий комплекс. В результате регрессионного анализа установили, что емкость катионного обмена чернозема выщелоченного определяется кислотностью, гранулометрическим и минералогическим составами и содержанием органического вещества почвы.

3. На основании проведенных исследований агрохимических свойств чернозема выщелоченного установлено, что применение минеральных удобрений, особенно в повышенных дозах на органическом фоне, достоверно увеличивает содержание подвижных форм фосфора и обменного калия в слое почвы 0–40 см. Максимальная эффективность отмечена при внесении двойной дозы минеральных удобрений по унавоженному фону, что обеспечивает переход в более высокий (V для подвижного фосфора и IV для обменного калия) класс обеспеченности элементами питания. Одновременно выявлено, что использование дефеката в качестве мелиоранта способствует росту содержания подвижного фосфора, но приводит к снижению доступного калия, что объясняется антагонизмом ионов калия и кальция.

4. Высокие дозы минеральных удобрений на фоне последствия навоза приводят к деградации гумусного состояния: тип гумуса смещается к фульватно-гуматному (Сгк/Сфк снижается до 1,94), возрастает доля подвижного гумуса (+ 23,5% к контролю), а степень гумификации в глубоких слоях падает (до 28,3%), что свидетельствует об интенсификации минерализации. Известкование дефекатом, даже в последствии, по органическому фону (вариант 13) способствует формированию гуматного типа гумуса с высоким Сгк/Сфк (до 2,76), снижает долю подвижного гумуса (-30,5% по отношению к контрольному варианту), повышает содержание гумуса. Расчет гумус-гранулометрических соотношений показал, что комплексное применение дефеката, навоза и минеральных удобрений способствует накоплению и равномерному распределению гумуса по почвенному профилю, в том числе в составе тонкодисперсной фракции.

5. В результате анализа изотерм сорбции Ленгмюра выявлено, что на всех вариантах опыта отмечается существенное снижение константы ионного обмена (на 25–55%) и предельной сорбции (13–25%) за 16-летний период наблюдений, что свидетельствует о снижении устойчивости ППК в результате сельскохозяйственного использования. Внесение дефеката и навоза, даже в последствии, противодействовало снижению емкости ППК. На варианте без применения агрохимикатов (контрольный вариант) отмечаются минимальные показатели константы ионного обмена и предельной сорбции.

6. Установили, что варианты с внесением минеральных удобрений (3 и 5 варианты) на органическом фоне демонстрируют снижение буферной способности к подщелачиванию и повышение устойчивости к подкислению. Наибольшая буферная устойчивость к подкислению отмечается на вариантах с совместным применением навоза и дефеката (варианты 12 и 13). Устойчивость к подкислению возрастает с глубиной, что связано с увеличением содержания карбонатов в нижележащих горизонтах. Анализируемые почвенные образцы чернозема выщелоченного более устойчивы к подкислению, чем к подщелачиванию, что обусловлено их генетическими особенностями, в частности карбонатным профилем.

7. На основе данных многолетнего стационарного опыта установлено, что применение минеральных удобрений и мелиоранта способствует снижению энергетических характеристик почвенного органического вещества. Наблюдается уменьшение энергopotенциала органического вещества (на 23–32%), общего уровня энергоёмкости почвы (14–28%), запасов энергии в различных фракциях гумуса (14–28%) относительно целины. Показатель устойчивости плодородия почв максимален на варианте с комплексным внесением минеральных и органических удобрений по известкованному фону (7,33), минимален на варианте с внесением высоких доз минеральных удобрений (3,76). Наибольшая интенсивность деградационных процессов в органическом веществе отмечается при внесении высоких доз минеральных удобрений. Компенсировать негативное влияние позволяет комплексное применение

известкования совместно с органическими и минеральными удобрениями.

8. В результате проведения агрономической оценки эффективности исследуемых вариантов опыта установлено, что максимальные значения прибавки урожая получены в варианте с совместным применением удобрений и дефеката, где зерновые единицы возрастали на 12,5% (+ 5,4 з.ед ц/га) по предшественнику вико-овес и на 16,4% (+ 6 з.ед. ц/га) по чистому пару относительно контроля. Полученные данные подтверждают целесообразность совместного применения дефеката с минеральными удобрениями и навозом для повышения продуктивности озимой пшеницы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Деградационные процессы в черноземных почвах, такие как подкисление и дегумификация, носят взаимосвязанный характер и требуют комплексных мер противодействия. Эффективная стратегия управления земельными ресурсами должна сочетать постоянную органоминеральную систему питания с периодическим известкованием. Внесение органических и минеральных удобрений должно проводиться в оптимальных, рекомендованных под культуру дозах. Известкование, как более затратный прием с длительным последствием, экономически и агрономически оправдано проводить не ежегодно, а один раз в течение 2 ротаций севооборота в полной дозе, рассчитанной по величине гидролитической кислотности, что позволяет нивелировать кислотность, вызванную естественными процессами и применением минеральных удобрений, стабилизировать состояние ППК черноземов.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Комплексные исследования в области трансформации ППК под влиянием различных агрохимикатов имеют значительный потенциал для дальнейшего развития. В дальнейшем планируется углубленное изучение влияния различных систем удобрения на отдельные компоненты и характеристики ППК, такие как почвенное органическое вещество, глинистые минералы, обменные основания с применением современных методов мониторинга и анализа, а также увеличение экспериментальной базы путем включения дополнительных вариантов опыта с учетом интенсификации растениеводства. Реализация указанных направлений позволит создать научно обоснованные рекомендации по эффективному применению агрохимикатов в условиях ЦЧР, обеспечивающие не только высокую урожайность и качество продукции, но и расширенное воспроизводство плодородия почв.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрогенное подкисление черноземов в результате применения различных систем удобрения в ЦЧР / Д.И. Бережнов, В. Б. Пименов, К.Е. Стекольников, Е. С. Гасанова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14. – № 3(70). – С. 77-92.
2. Агурова, И. В. Изменение поглотительной способности почв под влиянием деградационных процессов при выращивании сельскохозяйственных культур / И. В. Агурова, Д. В. Сыщиков, А. С. Березовский // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2024. – № 3. – С. 161-169.
3. Адерихин, П.Г. Почвы Воронежской области, их генезис, свойства и краткая агропроизводственная характеристика / П. Г. Адерихин. — Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1963. – 264 с.
4. Адсорбционные процессы на глинистых минералах с участием фульвокислот и ионов тяжелых металлов / М. Б. Никишина, Л. В. Переломов, Ю. М. Атрощенко [и др.] // Агрохимия. – 2022. – № 7. – С. 66-75.
5. Азаров, В. Б. Изменение агрофизических свойств чернозема при различных агротехнологиях / В. Б. Азаров, Н. И. Клостер // Евразийское Научное Объединение. – 2017. – Т. 2, № 4(26). – С. 180-181.
6. Алексеева, Т. В. Прочносвязанное органическое вещество почв: характеристика и судьба в диагенезе / Т. В. Алексеева // Почвы и окружающая среда. – 2021. – Т. 4, № 4.
7. Амелянчик, О. А. Соединения алюминия в вытяжках из подзолистых почв и формирование почвенной кислотности: специальность 03.00.27: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Амелянчик Ольга Анатольевна. – Москва, 1997. – 20 с.
8. Артемьева, З. С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы / З. С. Артемьева . – Москва: ГЕОС, 2010. – 237с.
9. Беленков, А. И. Взаимосвязь агрометеорологических условий, плодородия дерново-подзолистой почвы и продуктивности культур полевого

опыта / А. И. Беленков, В. Д. Полин, В. А. Николаев // Научно-агрономический журнал. – 2024. – № 1(124). – С. 48-55.

10. Беспалов, В. А. Трансформация почвенного поглощающего комплекса черноземных почв каменной степи при длительном антропогенном и постмелиоративном воздействии / В. А. Беспалов, Ю. И. Чевердин, Т. В. Титова // Агрофизика. – 2018. – № 4. – С. 9-16.

11. Биналиев, И. Ф. Изменение агрофизических показателей почвенного плодородия под действием природных и антропогенных сил / И. Ф. Биналиев, Э. А. Цвирко // Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона: Коллективная монография: в 2 томах / Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Верхневолжский аграрный научный центр». Том 1. – Иваново: Издательско-полиграфический комплекс «ПресСто», 2018. – С. 349-356.

12. Вaleyша, Е. Ф. Групповой состав органо-минеральных коллоидов агродерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при сочетании различных систем применения удобрений и способов обработки / Е. Ф. Вaleyша, В. Б. Воробьев // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 2. – С. 144-148.

13. Вальков, В. Ф. Почвоведение: учебник для вузов / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Москва: MapT, 2004. – 493 с.

14. Варьирование агрофизических показателей чернозёма типичного при возделывании озимой пшеницы в зависимости от агроприемов в условиях ЦЧР / А. Г. Ступаков, П. И. Солнцев, А. В. Акинчин, М. А. Куликова // Наука и молодёжь: актуальные вопросы и пути инновационного развития АПК : Материалы национальной научно-практической студенческой конференции «Наука и молодёжь: актуальные вопросы и пути инновационного развития АПК», посвященной 95-летию заслуженного агронома Российской Федерации Н.Р. Асыки. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 298-299.

15. Васкаева, М. Ю. Подвижное органическое вещество чернозёма выщелоченного в стационарном опыте / М. Ю. Васкаева, А. И. Иванова, К. Е. Стекольников // Молодежный вектор развития аграрной науки: Материалы 75-й национальной научно-практической конференции студентов и магистрантов. – Воронеж, 2024. – С. 59-64.

16. Взаимовлияние калийного и кальциевого режимов чернозема выщелоченного при многолетнем внесении удобрений и мелиоранта / Н. Г. Мязин, А. Н. Кожокина, П. Т. Брехов, П. И. Подрезов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2019. – № 1. – С. 53-58.

17. Влияние внесения удобрения и мелиоранта на сорбционные свойства чернозема выщелоченного / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская, А. С. Дворников, Е. С. Фокина // Аграрная наука XXI века: проблемы и перспективы развития : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедры селекции и семеноводства и 135-летию со дня рождения доктора сельскохозяйственных наук, профессора, заслуженного деятеля науки РСФСР Н.А. Успенского. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 127-135.

18. Влияние внесения удобрений и мелиоранта на состав и свойства фульвокислот чернозема выщелоченного / Е. С. Гасанова, Н. Г. Мязин, К. Е. Стекольников [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14, № 4(71). – С. 75-85.

19. Влияние водной эрозии на структуру и содержание лабильных гумусовых веществ в структурно-агрегатных фракциях черноземов выщелоченных Центрально-Черноземного региона / И. И. Васенев, Н. С. Горбунова, А. И. Громовик, Т. А. Девятова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2022. – Т. 17, № 3. – С. 315-330.

20. Влияние возрастающих доз известкового удобрения на закрепление кальция в составе гуминовых кислот / А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре // Агрохимия. – 2016. – № 4. – С. 3-9.

21. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1 / Л. К. Шевцова, В. А. Черников, В. Г. Сычев [и др.] // Агрохимия. – 2019. – № 10. – С. 3-15.

22. Влияние мелиорантов различной химической природы на Физико-химические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы и продуктивность культур / А. В. Литвинович, К. М. Нельсон, А. В. Лаврищев [и др.] // Агрохимия. – 2025. – № 11. – С. 27-36.

23. Влияние многолетнего внесения удобрений и мелиоранта на основные показатели плодородия чернозема выщелоченного / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская, К. Е. Стекольников, Н. Г. Мязин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 16, № 3(78). – С. 42-52.

24. Влияние многолетнего внесения удобрений на продуктивность звена севооборота и агрохимические свойства чернозема выщелоченного / А. Н. Кожокина, Н. Г. Мязин, Т. Сальгадо Пачеко [и др.] // Земледелие. – 2022. – № 6. – С. 11-15.

25. Влияние систем обработки почвы и удобрений на агрофизические и агрохимические параметры чернозёма выщелоченного в зернопаропропашном севообороте ЦЧР / О. К. Боронтов, П. А. Косякин, А. В. Курындин, Е. Н. Манаenkova // Экологические проблемы развития агроландшафтов и способы повышения их продуктивности: сборник статей по материалам Международной научной экологической конференции. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2018. – С. 366-368.

26. Влияние удобрений и звеньев севооборота на урожайность подсолнечника в зависимости от агрометеорологических условий на юго-Западе ЦЧР / С. И. Смуров, Д. И. Панарин, А. Г. Ступаков [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4. – С. 46-53.

27. Влияние цеолита и модифицированного цеолитного удобрения на агрофизические свойства темно-каштановой почвы в предгорной зоне Юго-

Востока Казахстана / Т. К. Василина, А. М. Балгабаев, А. М. Шибикеева [и др.]
// Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 3. – С. 62-71.

28. Воробьева Л. А. Теория и практика химического анализа почв/Л.А. Воробьева. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.

29. Воронин, А. Н. Действие агрогенных ресурсов на почвенный поглощающий комплекс чернозема типичного / А. Н. Воронин, В. В. Никитин, А. П. Карабутов // Сахарная свекла. – 2016. – № 10. – С. 24-27

30. Высоцкий Г. Н. Избранные труды / Г. Н. Высоцкий. – М: Сельхозгиз, 1960. – 435 с.

31. Гамкало, З. Г. Лабильное органическое вещество почвы как индикатор ее экологического качества в разных условиях землепользования / З. Г. Гамкало, Т. Ю. Бедерничек // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2014. – № 10(29). – С. 193-200.

32. Ганжара, Н. Ф. Практикум по почвоведению / Н. Ф. Ганжара, Б. А. Борисов, Р. Ф. Байбеков. – Москва: ООО "Агроконсалт", 2002. – 280 с.

33. Гасанова, Е. С. Буферная способность чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. Том Часть VII. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 215-220.

34. Гасанова, Е. С. Влияние удобрений и мелиоранта на качество органического вещества чернозема выщелоченного: специальность 06.01.03 "Агрофизика": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Гасанова Елена Сергеевна. – Воронеж, 2006. – 24 с.

35. Гасанова, Е. С. Зависимость поглотительной способности чернозема выщелоченного от агротехнических приемов / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская, А. Ю. Руденко // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. Том Часть VII. –

Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 209-214.

36. Гасанова, Е. С. Изменение содержания гумуса чернозема выщелоченного под влиянием удобрений и мелиоранта в условиях зернопаропропашного севооборота многолетнего стационарного опыта / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 22-25.

37. Гасанова, Е. С. ИК-спектроскопия препаратов гумусовых кислот чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции. Том Часть IV. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 61-68.

38. Гасанова, Е. С. Определение зависимости между некоторыми параметрами гумусного состояния чернозема выщелоченного и известковым и кальциевым потенциалами / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская, А. С. Дворников // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки: Материалы Международной молодежной научной школы. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 532-537.

39. Гасанова, Е. С. Трансформация гранулометрического состава чернозема выщелоченного под влиянием удобрений и мелиоранта в условиях многолетнего стационарного опыта / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 26-31.

40. Гасанова, Е. С. Химия почв. Основные методы исследования / Е. С. Гасанова, В. В. Котов, К. Е. Стекольников. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 173 с.

41. Гедройц, К. К. Избранные научные труды / К. К. Гедройц. – Москва: Наука, 1975. – 640 с.

42. Глебова, И. В. Взаимосвязь поглотительной способности и почвенного плодородия в условиях интенсивного земледелия / И. В. Глебова, О. А. Тутова // Интеграция науки и сельскохозяйственного производства: материалы Международной научно-практической конференции. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И. И. Иванова, 2017. – С. 34-38.

43. Горбунов, Н. И. Минералогия и физическая химия почв / Н. И. Горбунов. – Москва: Наука, 1978. – 294 с.

44. Горбунов, Н. И. Почвенные коллоиды и их значение для плодородия / Н. И. Горбунов. – Москва: Наука, 1967. – 160 с.

45. Горбунова, Ю. С. Динамика показателей поглотительной способности почв после пирогенного воздействия / Ю. С. Горбунова, Т. А. Девятова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2019. – Т. 19. – № 6. – С. 718-725.

46. Гранулометрический и микроагрегатный состав черноземов выщелоченных при минимизации основной обработки / В. Е. Синещеков, В. Н. Слесарев, Г. И. Ткаченко, Е. А. Дудкина // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2017. – Т. 47, № 1(254). – С. 18-24.

47. Громовик, А. И. Генетические особенности гумусового профиля черноземов разного гранулометрического состава / А. И. Громовик, Х. Махфуз // Агроэкологические проблемы почвоведения и земледелия : Сборник докладов XVI Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В.В. Докучаева», посвященной 175-летию со дня рождения В.В. Докучаева. – Курск: Федеральное государственное

бюджетное научное учреждение "Курский федеральный аграрный научный центр", 2021.

48. Громовик, А. И. Изменение основных показателей плодородия черноземов выщелоченных при длительном применении удобрений / А. И. Громовик, В. А. Королев // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015. – № 6. – С. 24-28.

49. Громовик, А. И. Сорбция гумуса и его распределение в профиле черноземов в зависимости от гранулометрического состава / А. И. Громовик, Н. С. Горбунова, Т. А. Девятова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2023. – Т. 23, № 5. – С. 958-964.

50. Громовик, А. И. Сорбция лабильных гумусовых веществ структурно-агрегатными фракциями эродированных черноземов / А. И. Громовик, Н. С. Горбунова, Т. А. Девятова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2023. – Т. 23, № 5. – С. 948-957.

51. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) / А. Г. Заварзина, Н. Н. Данченко, В. В. Демин [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1449-1480.

52. Девятова, Т. А. Влияние длительного применения удобрений на плодородие выщелоченного чернозема и продуктивность сахарной свеклы в ЦЧР / Т. А. Девятова, О. А. Минакова // Плодородие. – 2024. – № 5(140). – С. 12-16.

53. Девятова, Т. А. Изменение поглотительной способности почв по элементам рельефа балочных водосборов ЦЧР / Т. А. Девятова, С. Н. Божко, Ю. С. Горбунова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 385-392.

54. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода / Б. М. Когут, В. М. Семенов, З. С. Артемьева, Н. Н. Данченко // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3-13.

55. Дедов, А. В. Влияние приемов биологизации на плодородие черноземных почв ЦЧР / А. В. Дедов, М. А. Несмеянова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 15, № 3(74). – С. 41-50

56. Динамика показателей поглотительной способности черноземов / Ю. С. Горбунова, А. В. Белик, С. Н. Божко, Т. А. Девятова // Проблемы региональной экологии. – 2021. – № 1. – С. 5-9.

57. Динамика показателей содержания углерода органических соединений, гумуса и его запасов при различном сельскохозяйственном использовании в условиях Каменной степи / Н. С. Горбунова, Е. А. Высоцкая, С. С. Шешнищан, В. Д. Постолов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 17, № 4(83). – С. 70-79

58. Динамика содержания гумуса почвы при различном по интенсивности её сельскохозяйственном использовании / Т. И. Афанасьева, А. М. Труфанов, М. Ю. Иванова, Г. С. Цвик // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – № 3(55). – С. 5-11.

59. Динамика содержания гумуса чернозема выщелоченного в многолетнем стационарном опыте / А. В. Малявская, Е. С. Фокина, Е. С. Гасанова, Н. Г. Мязин // Современные достижения и перспективы развития агрономической науки: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 127-133.

60. Добровольский Г. В. Экология почв. Учение об экологических функциях почв / Г. В. Добровольский, Е. Д. Никитин. - М.: Изд-во. Моск. Ун-та, 2012. - 412 с.

61. Досбергенов, С. Н. Роль почвенно-поглощающего комплекса в экологической функции почв / С. Н. Досбергенов // Почвоведение и агрохимия. – 2012. – № 2. – С. 21-29.

62. Еремин, Д. И. Агрогенное изменение гранулометрического состава при распахке чернозема выщелоченного в лесостепной зоне Зауралья / Д. И. Еремин // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 8(95). – С. 34-36.

63. Ереско, М. Кислотно-основная буферность почв как индикатор устойчивости экосистемы / М. Ереско // Земля Беларуси. – 2014. – № 4. – С. 36-44.

64. Ермолаев, О. Т. Взаимодействие кальция мелиорантов с почвенным поглощающим комплексом / О. Т. Ермолаев, В. М. Красницкий // Агрохимический вестник. – 2012. – № 4. – С. 29-30.

65. Ефремова, Л. Б. Роль карбоновое земледелие в экономической стабильности России / Л. Б. Ефремова // Московский экономический журнал. – 2022. – Т. 7, № 2.

66. Земельный потенциал России: состояние, проблемы и меры по его рациональному использованию и охране: Аналитическая записка. М.: Российская академия наук, 2023. – 70 с.

67. Иванов Н. Н. Зоны увлажнения земного шара / Н. Н. Иванов // Известия АН СССР. Серия география и геофизика. – 1941. – № 3. – С. 261-288

68. Изменение компонентного состава органического вещества макро- и микроагрегатов типичного чернозема под воздействием эрозионных процессов / З. С. Артемьева, Н. Н. Данченко, Н. П. Кириллова [и др.] // Почвоведение. – 2021. – № 11. – С. 1322-1331.

69. Изменение показателей ППК и гумусного состояния чернозема выщелоченного при многолетнем внесении удобрений и известковании / Е. С. Гасанова, А. Н. Кожокина, Н. Г. Мязин, К. Е. Стекольников // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4(59). – С. 13-21.

70. Изменение содержания и строения гуминовых кислот чернозема выщелоченного под влиянием удобрений и дефеката / Е. С. Гасанова, А. Н. Кожокина, Н. Г. Мязин [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 4(63). – С. 113-122.

71. Изменение физико-химических и агрохимических свойств генетических горизонтов светло-серой лесной поверхностно-оглеенной почвы при длительном антропогенном воздействии / О. С. Гавришко, Н. А. Ткаченко, Ю. Н.

Олифир, Т. В. Партыка // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 3. – С. 81-84

72. Изменение физико-химических свойств почвенных коллоидов в зависимости от ионного состава почвенного поглощающего комплекса / Т. В. Шнее, С. Э. Старых, Т. А. Федорова [и др.] // Плодородие. – 2014. – № 3(78). – С. 33-35.

73. Изучение показателей почвенного плодородия окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы на разных стадиях формирования природных экосистем / А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре // Агрохимия. – 2022. – № 6. – С. 14-27.

74. Карабутов, А. П. Мониторинг гумусного состояния чернозёма типичного при различной интенсивности использования пашни / А. П. Карабутов, А. Г. Ступаков // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 7. – С. 28-33.

75. Кирюшин, А. В. Емкость катионного обмена подзолистой и болотно-подзолистой почв Центрального лесного заповедника / А. В. Кирюшин, Т. А. Соколова // Почвоведение. – 2005. – № 4. – С. 407-415

76. Кислотно-основная буферность почв разного гранулометрического состава в условиях загрязнения тяжелыми металлами / И. В. Замулина, Э. В. Ларина, М. В. Бурачевская [и др.] // Региональные геосистемы. – 2024. – Т. 48, № 4. – С. 616-627.

77. Кленов, Б. М. Нетрадиционный подход к определению емкости катионного обмена гумусовых кислот / Б. М. Кленов // Почвы в биосфере: Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. – Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. – С. 385-389.

78. Когут, Б. М. Антропогенная трансформация качественного состава гумуса черноземов Каменной Степи* / Б. М. Когут, Н. А. Титова, В. С. Булеева // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2009. – № 64. – С. 41-49.

79. Когут, Б. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом / Б. М. Когут, В. М. Семенов // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2020. – № 102. – С. 103-124.

80. Когут, Б. М. Эволюция доминирующих парадигм в учении о гумусе и почвенном органическом веществе / Б. М. Когут, В. М. Семенов // Агрохимия. – 2015. – № 12. – С. 3-19.

81. Козлов, А. В. Значение почвенно-поглощающего комплекса и его коллоидной системы в формировании питательного режима почв сельскохозяйственных угодий / А. В. Козлов, Ю. И. Афонина // Экологическое образование для устойчивого развития: теория и педагогическая реальность: сборник статей по материалам XIV Международной научно-практической конференции – Нижний Новгород: ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина", 2017. – С. 111-116.

82. Козлов, А. В. Функциональность соединений кремния в почвах и их участие в формировании экологической устойчивости почвенно-поглощающего и почвенно-биотического комплексов / А. В. Козлов, А. Х. Куликова, И. П. Уромова // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2020. – С. 294-298.

83. Кольцова, О. М. Изменение содержания гумуса в черноземе выщелоченном в современных агроэкологических условиях / О. М. Кольцова, И. С. Корчагин // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 30-34.

84. Компонентный состав почвенного органического вещества / А. И. Попов, Л. Ю. Коноплина, Н. А. Комолкина [и др.] // The Scientific Heritage. – 2021. – № 65-2(65). – С. 11-19.

85. Коржов, С. И. Биологическая активность черноземов / С. И. Коржов, В. В. Верзилин, Т. А. Трофимова ; Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – 307 с.

86. Котов В. В. Высокомолекулярные соединения: Ионобменные и мембранные процессы / В. В. Котов, Л. Ф. Науменко. – Воронеж, ВГАУ, 2006. – 195 с.

87. Котова, Е. В. Влияние гранулометрического состава на распределение лабильных форм гумуса в профиле / Е. В. Котова, Д. И. Щеглов // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия: Сборник докладов XV Международной научно-практической конференции Курского отделения МОО «Общество почвоведов имени В. В. Докучаева». – Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ», 2020. – С. 173-177.

88. Кузин, Е. Н. Влияние осадков городских сточных вод и их сочетаний с цеолитсодержащей агрорудой на плодородие лугово-черноземной почвы и продуктивность зернопаропропашного севооборота / Е. Н. Кузин, А. Н. Арефьев, Е. Е. Кузина // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 3(47). – С. 34-40.

89. Кулакова, К. Г. Коллоидные частицы / К. Г. Кулакова // Современные тенденции развития науки и технологий: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "СЕКВОЙЯ", 2020. – С. 201-204.

90. Курганова, И. Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах / И. Н. Курганова, В. М. Семенов, В. Н. Кудеяров // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 489, № 6. – С. 646-650.

91. Курочкина, Г. Н. Влияние адсорбции гуминовой кислоты на коагуляционную устойчивость почвенных суспензий / Г. Н. Курочкина // Почвоведение. – 2020. – № 1. – С. 69-80.

92. Кучиев, С. Э. Мониторинг агрегатного состава почвы под различными культурами в горной зоне Северной Осетии / С. Э. Кучиев, Л. Ж. Басиева, Н. И. Мамсиров // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 59-4. – С. 46-53.

93. Латышева, Л. А. Роль органического вещества илистой фракции в динамике качественного состава гумуса буроземов острова Рейнеке / Л. А. Латышева // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2015. – № 3(31). – С. 17-26.

94. Литвинович, А. В. Сравнительное изучение мелиоративных свойств и удобрительной ценности известковых материалов различной химической природы / А. В. Литвинович, К. М. Нельсон, А. В. Лаврищев // Проблемы агрохимии и экологии. – 2024. – № 3. – С. 20-25.

95. Малявская, А. В. Агрогенная трансформация гранулометрического состава чернозёма выщелоченного / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, К. Е. Стекольников // Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 186-192.

96. Малявская, А. В. Влияние агротехнических приемов на буферность чернозема выщелоченного / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, А. С. Дворников // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2022. – С. 44-46.

97. Малявская, А. В. Запасы и баланс ила в чернозёме выщелоченном под влиянием удобрений и дефеката / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, К. Е. Стекольников // Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 199-205.

98. Малявская, А. В. Изучение трансформации гуминовых кислот чернозема выщелоченного методом ИК-спектроскопии / А. В. Малявская // Студенчество России: век XXI: Материалы VIII Всероссийской молодёжной научно-практической конференции. В 3-х частях Том Часть 2. – Орёл: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2022. – С. 358-361.

99. Малявская, А. В. Исследование гумусовых кислот чернозема выщелоченного потенциометрическим методом / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова // Вестник Студенческого научного общества. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 36-38.

100. Малявская, А. В. Исследование строения гуминовых кислот методом УФ-спектроскопии / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова // Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся. Том Часть I. – Санкт-Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2020. – С. 55-57.

101. Малявская, А. В. Кислотно-основные свойства гуминовых кислот чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 136-140.

102. Малявская, А. В. Мониторинг изменения содержания органического вещества чернозема выщелоченного в течение ротации зернопаропропашного севооборота / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, Н. Г. Мязин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4. – С. 64-72.

103. Малявская, А. В. Определение поглотительной способности чернозема выщелоченного методом построения изотерм сорбции / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, Н. Д. Верзилина // Актуальные проблемы селекции, семеноводства и сохранения плодородия почв : юбилейный сборник научных трудов

Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию заслуженного работника сельского хозяйства Российской Федерации, академика международной академии аграрного образования, действительного члена международной академии информатизации, заслуженного профессора Воронежского государственного аграрного университета, профессора Владимира Ефимовича Шевченко. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 158-164.

104. Малявская, А. В. Особенности молекулярного строения гуминовых и фульвокислот чернозема, выщелоченного в условиях высокой антропогенной нагрузки / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, А. С. Максимова // Природа гуминовых веществ и их применение в различных отраслях народного хозяйства : Сборник трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, посвященная памяти д.б.н., профессора Игоря Дисановича Комиссарова в честь 95-летия со дня рождения. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2024. – С. 16-21.

105. Малявская, А. В. Оценка энергетического состояния антропогеннопреобразованных черноземных почв / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, А. С. Максимова // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 17-22.

106. Малявская, А. В. Трансформация группового состава гумуса под влиянием многолетнего применения агрохимикатов / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, Н. Г. Мязин // Докучаевское наследие: сохранение и воспроизводство плодородия черноземных почв : Сборник научных докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 140-летию классического труда В.В. Докучаева "Русский чернозем". – Воронеж: Издательство Истоки, 2023. – С. 130-135.

107. Малявская, А. В. Электронная спектроскопия гумусовых веществ чернозема выщелоченного / А. В. Малявская, М. А. Шестакова, Е. С. Гасанова // Биотехнологические приемы производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Том Часть 1. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2021. – С. 185-189.

108. Мамонтов, В. Г. Лабильные гумусовые вещества - особая группа органических соединений чернозема обыкновенного / В. Г. Мамонтов, Р. А. Афанасьев, Е. Л. Соколовская // Плодородие. – 2018. – № 5(104). – С. 15-19.

109. Мартынов, А. В. Ёмкость катионного обмена в пойменных почвах р. Амур: влияние органического вещества на содержание обменных катионов / А. В. Мартынов // Почвы и окружающая среда. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 2.

110. Маттсон С.Ж. Почвенные коллоиды.- М.: Сельхозгиз, 1934. – 123 с.

111. Минакова, О. А. Агрогенная трансформация почвенного плодородия чернозема выщелоченного при внесении удобрений в зерносвекловичном севообороте в ЦЧР / О. А. Минакова, Л. В. Александрова, В. М. Вилков // Агрохимия. – 2025. – № 6. – С. 3-13.

112. Митрофанова, Е. М. Влияние известкования почв на кислотно-основную буферность / Е. М. Митрофанова // Научное обеспечение АПК Северо-Востока России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Саранск: ОАО "Ковылкинская типография", 2010. – С. 432-435.

113. Моделирование отношений элементов полидисперсной системы почв с использованием эталона сравнения / В. С. Крыщенко, Т. В. Рыбьянец, И. В. Замулина [и др.] // Живые и биокосные системы. – 2013. – № 2. – С. 9.

114. Мустафаев, М. Г. Исследование зависимости емкости поглощения от гранулометрического состава и содержания гумуса на примере почв Мугано-Сальянского массива / М. Г. Мустафаев // Kishovar. – 2013. – № 1. – С. 33-36.

115. Муха В.Д. Агропочвоведение / В.Д. Муха, Н.И. Картамышев, Д.В. Муха. - М.: КолосС, 2004. – 528 с.

116. Мязин, Н. Г. Особенности формирования гранулометрического состава выщелоченного чернозема при длительном применении различных систем удобрения, в условиях Центрального черноземного региона Российской Федерации / Н. Г. Мязин, Машхур Ибра // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 5. – С. 39-43.

117. Мязин, Н. Г. Почвы территории стационарного опыта кафедры агрохимии Воронежского госагроуниверситета / Н. Г. Мязин, Т. М. Парахневич // Химизация и экология в земледелии ЦЧЗ. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. К. Д. Глинки, 1999. – С. 32-38.

118. Насиев, Б. Н. Зависимость агрохимических и агрофизических показателей почвы от систем удобрений / Б. Н. Насиев // Почвоведение и агрохимия. – 2012. – № 1. – С. 58-65.

119. Научные основы и методы оценки энергетического состояния почв в агроландшафтах / Н. П. Масютенко, В. В. Шеховцова, А. И. Шеховцов, Е. В. Леонтьева. – Курск: Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии Россельхозакадемии, 2004. – 60 с.

120. О государственном регулировании обеспечения плодородия земель сельскохозяйственного назначения: Федеральный закон от 16.07.1998 № 101-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102054366>

121. Органическое вещество водоустойчивых макро- и микроагрегатов чернозема типичного в контрастных вариантах землепользования / З. С. Артемьева, Е. Б. Варламов, Е. С. Засухина [и др.] // Агрохимия. – 2022. – № 10. – С. 3-13.

122. Органическое вещество и минеральная матрица почв: современные подходы, определения терминов и методы изучения (обзор) / В. А. Холодов, О. Б. Рогова, М. П. Лебедева [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2023. – № 117. – С. 52-100.

123. Орлов Д. С. Химия почв / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, Н. И. Суханова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 527 с.

124. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) / А. В. Юдина, Д. С. Фомин, А. Д. Котельникова, Е. Ю. Милановский // Почвоведение. – 2018. – № 11. – С. 1340-1362.

125. Оценка техногенного воздействия на почвы земель сельскохозяйственного назначения и предложения по их рекультивации / В. И. Титова, Е. В. Дабахова, А. А. Ветчинников [и др.] // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 56-61.

126. Пакуль, А. Л. Зависимость агрохимических и агрофизических свойств выщелоченного чернозема от системы обработки почвы / А. Л. Пакуль, Г. В. Божанова, В. Н. Пакуль // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2021. – Т. 51, № 5. – С. 5-19.

127. Параметры гумусного состояния чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта / А. В. Малявская, Е. С. Гасанова, А. С. Дворников, Е. С. Фокина // Достижения и перспективы развития АПК России : Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной памяти Р.Г. Гареева. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2023. – С. 274-277.

128. Парахневич, Т. М. Изменение почвенно-агрохимических показателей плодородия чернозема выщелоченного и пути их регулирования в парозернопропашном севообороте: специальность 06.01.04 "Агрохимия": диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Парахневич Татьяна Михайловна. – Воронеж, 1999. – 212 с.

129. Пименов, В. Б. Влияние длительного применения удобрений и дефека на карбонатно-кальциевую систему чернозёма выщелоченного / В. Б. Пименов, К. Е. Стекольников // Современные достижения и перспективы развития агрономической науки: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 14-23.

130. Пинский, Д. Л. Поглотительная способность в почвообразовании и функционировании почв / Д. Л. Пинский // Организация почвенных систем. Методология и история почвоведения: Труды II Национальной конференции с международным участием "Проблемы истории, методологии и философии почвоведения. – Пушкино: ИФХиБПП РАН, 2007. – С. 183.

131. Пинский, Д. Л. Эволюция учения о поглотительной способности почв: от работ К. К. Гедройца до наших дней / Д. Л. Пинский // Почва как компонент биосферы: эволюция, функционирование и экологические аспекты: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 50-летию ИФХиБПП РАН. – Пушкино: Товарищество научных изданий КМК, 2020. – С. 135-136.

132. Поглощение меди черноземными почвами и почвообразующими породами юга России / Д. Л. Пинский, Т. М. Минкина, Т. В. Бауэр [и др.] // Геохимия. – 2018. – № 3. – С. 280-289.

133. Покатилова, А. Н. Динамика буферности чернозема выщелоченного северной лесостепи Челябинской области при длительном орошении / А. Н. Покатилова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2017. – № 12(212). – С. 16-18.

134. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюринга и Ваксмана до наших дней / А. Л. Иванов, Б. М. Когут, В. М. Семенов [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2017. – № 90. – С. 3-38.

135. Распределение органического углерода между структурными и процессными пулами в серой лесной почве разного землепользования / Т. Н. Лебедева, Д. А. Соколов, М. В. Семенов [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2024. – № 118. – С. 79-127.

136. Рахманин, А. А. Влияние удобрений и дефекаата на содержание и характер распределения по профилю подвижного органического вещества чернозёма выщелоченного / А. А. Рахманин, К. Е. Стекольников // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-

практической конференции. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 38-46.

137. Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия / Г. В. Добровольский, И. Ю. Чернов, А. А. Бобров [и др.]. – Москва: ООО "Товарищество научных изданий КМК", 2011. – 273 с.

138. Саинчук, А. М. Влияние антропогенной эволюции на потенциальное плодородие чернозёма обыкновенного в условиях каменной степи / А. М. Саинчук, К. Е. Стекольников // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 4(67). – С. 220-227.

139. Саинчук, А. М. Эволюционная трансформация гранулометрического состава и органо профиля черноземов Каменной степи / А. М. Саинчук, К. Е. Стекольников // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 4(63). – С. 123-131.

140. Свойства гуминовых веществ как коллоидных дисперсий (ОБЗОР литературы) / А. И. Попов, Е. П. Панина, Т. А. Верлова [и др.] // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14, № 6. – С. 39-45.

141. Селищев, Д. А. Физические и биологические показатели чернозема выщелоченного при различных обработках почвы и приемах биологизации / Д. А. Селищев, Т. А. Трофимова, А. Р. Конусов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3(46). – С. 23-29.

142. Семендяева, Н. В. Влияние севооборотов на гранулометрический и микроагрегатный состав чернозема выщелоченного Новосибирского Приобья в длительных опытах / Н. В. Семендяева, Т. Н. Крупская, Л. А. Карловец // Агрохимия. – 2015. – № 1. – С. 23-34.

143. Семенов, В. М. Влияние повторяющихся циклов высушивания-увлажнения-замораживания-оттаивания на активный пул органического вещества почвы / В. М. Семенов, Б. М. Когут, С. М. Лукин // Почвоведение. – 2014. – № 4. – С. 443.

144. Семенов, В. М. Почвенное органическое вещество / В. М. Семенов, Б. М. Когут; Почвенный институт им. В. В. Докучаева. – Москва: Издательство ГЕОС, 2015. – 233 с.
145. Семенов, В. М. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем / В. М. Семенов, А. С. Тулина // Агрохимия. – 2011. – № 12. – С. 53-63.
146. Содержание и качественный состав гумуса каштановой почвы в динамике многолетних рядов систематического применения удобрений / А. К. Уланов, Л. В. Будажапов, Т. П. Лапухин, А. С. Билтуев // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2019. – № 1(50). – С. 58-67.
147. Соколова Т. А. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе: учебное пособие/ Т. А. Соколова, И.И. Толпешта, С. Я. Трофимов. – Тула: Гриф и К, 2012.–123 с.
148. Соколова Т. А. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен: учебное пособие / Т. А. Соколова, С. Я. Трофимов. Изд. «Университетская книга», 2009.– 174 с
149. Сорбционные процессы в почвах. Вопросы изучения и современное состояние проблемы / Н. С. Горбунова, А. И. Громовик, И. В. Черепухина, Ю. Ю. Терентьева // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 265-275.
150. Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области / В. Г. Мамонтов, З. С. Артемьева, В. И. Лазарев [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2020. – № 101. – С. 182-201.
151. Сравнительный анализ гумусовых веществ и органического вещества физических фракций чернозема типичного / Н. Н. Данченко, З. С. Артемьева, Ю. Г. Колягин, Б. М. Когут // Почвоведение. – 2022. – № 10. – С. 1241-1254.

152. Стекольников, К. Е. Влияние систем удобрения и дефеката на гумус-гранулометрические отношения чернозёма выщелоченного / К. Е. Стекольников // Современные достижения и перспективы развития агрономической науки: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий в Российской Федерации. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 34-40.

153. Стекольников, К. Е. Карбонатно-кальциевый режим и гумусовое состояние черноземов лесостепи ЦЧЗ: специальность 03.02.13 "Почвоведение": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Стекольников Константин Егорович. – Воронеж, 2011. – 47 с.

154. Стрекалова, Ю. Е. Состояние почвенно-поглощающего комплекса в зависимости от применения горных пород / Ю. Е. Стрекалова // Молодой исследователь: возможности и перспективы. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – Ставрополь: ООО "СЕКВОЙЯ", 2019. – С. 202-204.

155. Титова, В. И. Динамика агрохимических показателей почв свинокомплекса за 10 лет его функционирования / В. И. Титова, О. С. Мартыанова, Р. Н. Рыбин // Агрохимический вестник. – 2024. – № 1. – С. 7-11.

156. Титова, В. И. Тенденции изменения плодородия черноземных почв нечерноземной зоны России при высокоинтенсивной минеральной системе удобрения / В. И. Титова // Биологический круговорот питательных веществ при использовании удобрений и биоресурсов в системах земледелия различной интенсификации. – Суздаль-Иваново: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Верхневолжский федеральный аграрный научный центр"; ПресСто, 2021. – С. 108-112.

157. Титова, В. И. Эффективность использования свиного навоза в звене кормового севооборота / В. И. Титова, Е. Г. Белоусова // Агрохимический вестник. – 2022. – № 3. – С. 34-38.

158. Томина, Т. К. Трансформация состава почвенно-поглощающего комплекса грунтов рекультивированных участков на нефтяном месторождении / Т. К. Томина // Гидрометеорология и экология. – 2017. – № 3(86). – С. 135-145.

159. Торшин, С. П. Создатель учения о поглотительной способности почв (к 150-летию со дня рождения К. К. Гедройца) / С. П. Торшин, В. М. Лапушкин // Агрохимический вестник. – 2022. – № 2. – С. 78-80.

160. Травникова, Л. С. Органоминеральные взаимодействия: роль в процессах формирования почв, их плодородия и устойчивости к деградации / Л. С. Травникова. – Москва: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2012. – 295 с.

161. Трансформация гранулометрического состава чернозема выщелоченного в условиях многолетнего стационарного опыта / Е. С. Гасанова, А. В. Малявская, К. Е. Стекольников, Н. Г. Мязин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2024. – Т. 17, № 4(83). – С. 34-46.

162. Уварова, Д. Г. Кальций и магний в растениеводстве / Д. Г. Уварова, И. С. Полянская // Перспективы развития науки в современном мире: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Прага, Чехия, 20 марта 2020 года. – Прага, Чехия: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2020. – С. 38-41

163. Уфимцева, Л. В. Роль органического вещества в формировании кислотно-основной буферности почв / Л. В. Уфимцева, А. Н. Покатилова, С. Коновалов // Технологические проблемы производства продукции животноводства и растениеводства : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию УГАВМ: сборник научных трудов. – Троицк: Уральская государственная академия ветеринарной медицины, 2005. – С. 228-230.

164. Федотов, Г. Н. Структурная организация почвенных коллоидов / Г. Н. Федотов // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2008. – № 1. – С. 134-141.

165. Физико-химические основы возникновения фрактальной организации почвенных коллоидов / Г. Н. Федотов [и др.] // Почвоведение. – 2007. – № 7. – С. 823–830.

166. Физико-химические свойства чернозема выщелоченного при различной обработке почвы и применении удобрений в севообороте ЦЧР / О. А. Минакова, Д. С. Мерзликина, П. А. Косякин [и др.] // Агрохимия. – 2023. – № 4. – С. 11-18.

167. Химический анализ почв: вопросы и ответы / Л. А. Воробьева [и др.]. – Москва: [б. и.], 2012. – 186 с.

168. Царук, И. А. Действие различных форм известковых мелиорантов на агрохимические свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой слабокислой почвы / И. А. Царук, Т. М. Германович, Г. М. Сафроновская // Почвоведение и агрохимия. – 2010. – № 1(44). – С. 89-99

169. Цеолиты как средство очистки воды от радионуклидов [Очистка питьевой воды] // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. – 2011. – № 2. – С. 302.

170. Чинилин, А. В. Влияние сельскохозяйственного использования на содержание и минералогический состав водопептизируемого ила чернозема типичного Курской области / А. В. Чинилин, В. Г. Мамонтов, О. В. Рыжков // Доклады ТСХА: Сборник статей, Москва. Том Выпуск 293, Часть IV. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К. А. Тимирязева, 2021. – С. 224-227

171. Шеин, Е. В. Курс физики почв: Учебник / Е. В. Шеин. – Москва: Издательство Московского государственного университета, 2005. – 432 с.

172. Шеин, Е. В. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов / Е. В. Шеин, Е. Ю. Милановский // Почвоведение. – 2003. – № 1. – С. 53-61.

173. Шнее, Т. В. Влияние ионного состава ППК на состояние почвенных коллоидов различных по генезису почв / Т. В. Шнее, С. Э. Старых, Т. А.

Федорова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2013. – № 5. – С. 128-133.

174. Шнее, Т. В. Использование величины порога коагуляции почвенных коллоидов при химической мелиорации засоленных почв / Т. В. Шнее, С. Э. Старых, И. Н. Алпатова // Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона / ФГБНУ «Верхневолжский аграрный научный центр». – Иванов: Издательско-полиграфический комплекс «ПресСто», 2018. – С. 421-432.

175. Шульгина, М. Е. Деградация черноземных почв в агроландшафтах Центрального Черноземья / М. Е. Шульгина, А. Г. Ступаков // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке: Материалы XXVIII Международной научно-производственной конференции в 4 томах. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 142-143.

176. Шумова, Н. А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия / Н. А. Шумова // Аридные экосистемы. – 2021. – Т. 27, № 4(89). – С. 13-24.

177. Щеглов, Д. И. Основы химического анализа почв: учебное пособие / Д. И. Щеглов, А. И. Громо́вик, Н. С. Горбунова. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. – 332 с.

178. Эволюция, функционирование и экологическая роль почв как компонента биосферы / А. А. Абрамов, А. О. Алексеев, Т. В. Алексеева [и др.]. – Пушкино: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2020. – 290 с.

179. Эффективность мелиоративной смеси на тёмно-серой лесной почве Юго-Западной лесостепи России / В. Д. Муха, О. Н. Мирошниченко, В. Н. Недбаев, С. И. Худяков // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 1. – С. 27-28.

180. Яковлев, В. А. Влияние химических мелиорантов на поглотельную способность почвы / В. А. Яковлев, А. М. Плотников // Научные результаты - агропромышленному производству: Материалы международной научно-

практической конференции, посвященной 60-летию образования Курганской государственной сельскохозяйственной академии им. Т. С. Мальцева: в 2-х томах. Том 1. – Курган: ФГУИПП Зауралье, 2004. – С. 423-425.

181. Яковлева, Л. В. Влияние известкования и минеральных удобрений на микростроение и емкость катионного обмена дерново-подзолистой почвы / Л. В. Яковлева, Е. А. Николаева // Плодородие. – 2018. – № 5(104). – С. 31-35.

182. Яковлева, Л. В. Ионообменная способность и миграция веществ в дерново-подзолистых пахотных почвах / Л. В. Яковлева, Е. А. Николаева // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 5(69). – С. 15-20.

183. Яровой, Ф. А. Агрофизические показатели почвенного плодородия и пути их регулирования / Ф. А. Яровой, Д. Ю. Панова, Н. Е. Неженцева // Молодой исследователь: возможности и перспективы: Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Ставрополь. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "СЕКВОЙЯ", 2019. – С. 256-258.

184. A complete soil hydraulic model accounting for capillary and adsorptive water retention, capillary and film conductivity, and hysteresis / Rudiyanto, B. I. Setiawan, M. Sakai [et al.] // Water Resources Research. – 2015. – Vol. 51, No. 11. – P. 8757-8772.

185. Alemayehu B. Soil Colloids, Types and their Properties: A review/ B. Alemayehu, H. Teshome// Open Journal of Bioinformatics and Biostatistics. – 2021. – Vol. 5. – No 1. – P. 8-13.

186. Analysis of molecular aggregation in humic substances in solution / R. Baigorri, M. Fuentes, G. González-Gaitano, J. M. García-Mina // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2007. – Vol. 302, No. 1-3. – P. 301-306.

187. Arsenic absorption characteristics and relationships between arsenic absorption and nutrient accumulation in stems and leaves of two ryegrass species

under arsenic stress / J. B. Li, G. L. Song, B. H. Xue [et al.] // *Acta Prataculturae Sinica*. – 2018. – Vol. 27. – No 2. – P. 79-87.

188. Burdon, J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? / J. Burdon // *Soil Sciences*. – 2001. – Vol. 166, No. 11. – P. 752-769.

189. Christensen, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover / B. T. Christensen // *European Journal of Soil Science*. – 2001. – Vol. 52, No. 3. – P. 345-353.

190. Compost and biochar impact on immobilisation of pesticide residues in alkaline soils under canola / E. Mahmoud, H. Amine, N. Khalafallah, M. El-Sharkawy // *Crop & Pasture Science*. – 2022. – Vol. 74, No. 2. – P. 121-131.

191. Density fractionation of forest soils: methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context / S. E. Crow, Ch. W. Swanston, K. Lajtha [et al.] // *Biogeochemistry*. – 2007. – Vol. 85, No. 1. – P. 69-90.

192. Dependence of physico-chemical characteristics of leached chernozem's soil fertility on fertilizers and ameliorator used / E. S. Gasanova, K. E. Stekolnikov, A. N. Kozhokina, A. V. Malyavskaya // *AIP conference proceedings: International Scientific and Practical Conference "INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE"*. Volume 2921, Issue 1. – AIP Publishing: AIP PUBLISHING, 2023. – P. 060001.

193. Derenne, S. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments / S. Derenne, C. Largeau // *Soil Sciences*. – 2001. – Vol. 166, No. 11. – P. 833-847.

194. Differences in soluble organic carbon chemistry in pore waters sampled from different pore size domains/ V.L. Bailey, A.P. Smith, M. Tfaily[et al.] // *Soil Biol. Biochem*. – 2017. – Vol. 107. – P. 133–143.

195. Effect of ameliorant and fertilizers on soil filtration properties, plant water regime, and fertility under natural conditions / S. B. Galstyan, H. V. Tokmajyan,

N. A. Mikayelyan, H. A. Ohanyan // Известия высоких технологий. – 2022. – No. 4(23). – P. 58-66.

196. Effects of distinct manure amendments on microbial diversity and activity in Chernozem and Retisol / A. D. Zhelezova, V. M. Semenov, N. A. Ksenofontova [et al.] // Applied Soil Ecology. – 2024. – Vol. 193. – P. 105152.

197. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China/ H. Wanga, J. Xua, X. Liub [et al.] // Soil and Tillage Research. – 2019. – Vol. 195. Article 104366.

198. Emergy-based sustainability measurement and evaluation of industrial production systems / C. Zhang, C. Wang, M. Gao, C. Liu // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Vol. 30, No. 9. – P. 22375-22387.

199. Experimental validation of footprint models for eddy covariance CO₂ flux measurements above grassland by means of natural and artificial tracers / N. Arriga, D. Papale, Ü. Rannik [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. – 2017. – Vol. 242. – P. 75-84.

200. Factors controlling the chemical composition of colloidal and dissolved fractions in soil solutions and the mobility of trace elements in soils / S. Gangloff, P. Stille, A. D. Schmitt, F. Chabaux // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2016. – Vol. 189. – P. 37-57.

201. Goos R.J. Soil cation exchange capacity: A new method for soil science laboratories / R.J. Goos, T.M. DeSutter // Natural Sciences Education. — 2025. — Vol. 54, Is. 1.

202. Guggenberger, G. Humification and Mineralization in Soils / G. Guggenberger // Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions. Vol. 3. – Germany, 2005. – P. 85-106.

203. Hartley, I. P. Substrate quality and the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition / I. P. Hartley, P. Ineson // Soil Biology and Biochemistry. – 2008. – Vol. 40, No. 7. – P. 1567-1574.

204. Houghton, R. A. Balancing the global carbon budget / R. A. Houghton // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2007. – Vol. 35. – P. 313-347.

205. Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum* / D. Maji, P. Misra, S. Singh, A. Kalra // *Applied Soil Ecology*. – 2017. – Vol. 110. – P. 97-108.

206. Humus is a guarantor of the stability of agroecosystems / E. S. Gasanova, A. N. Kozhokina, N. G. Myazin, K. E. Stekolnikov // *BIO Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 36. – P. 03020.

207. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: Incomplete knowledge and exciting prospects / P. Barré, O. Fernandez-Ugalde, B. Velde [et al.] // *Geoderma*. – 2014. – Vol. 235-236. – P. 382-395.

208. Kaiser, M. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment / M. Kaiser, R. H. Ellerbrock // *Geoderma*. – 2005. – Vol. 127, No. 3-4 SPEC. – P. 196-206.

209. Lavalley, J. M. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century / J. M. Lavalley, M. F. Cotrufo, J. L. Soong // *Global Change Biology*. – 2020. – Vol. 26, No. 1. – P. 261-273.

210. Lehmann, J. The contentious nature of soil organic matter / J. Lehmann, M. Kleber // *Nature*. – 2015. – Vol. 528, No. 7580. – P. 60-68.

211. Long-term effects of cattle manure application on the soil aggregate stability of salt-affected soil on the Songnen Plain of North-Eastern China / Sh. Zhao, F. Yu, Ch. Zhai [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 344-354.

212. Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agro-ecosystems across the globe / Z. Dai, W. Su, H. Zhao [et al.] // *Global Change Biology*. – 2018. – Vol. 24, No. 8. – P. 3452-3461

213. Microaggregates in soils / K. U. Totsche, W. Amelung, E. Lehndorff [et al.] // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2018. – Vol. 181, No. 1. – P. 104-136.

214. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments / M. Kleber, K. Eusterhues, M. Keiluweit [et al.] // *Adv. Agron.* 2015. V. 130. P. 1-140.
215. Olayemi, O. P. Distribution of soil organic matter fractions are altered with soil priming / O. P. Olayemi, M. D. Wallenstein, C. M. Kallenbach // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2022. – Vol. 164. – P. 108494.
216. Orsi, M. Molecular dynamics simulation of humic substances / M. Orsi // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture.* – 2014. – Vol. 1, No. 1. – P. 10.
217. Protection of mesopore-adsorbed organic matter from enzymatic degradation / A. R. Zimmerman, S. L. Brantley, J. Chorover, K. W. Goyne // *Environmental Science and Technology.* – 2004. – Vol. 38, No. 17. – P. 4542-4548.
218. Rhizosphere microbial communities and organic acids secreted by aluminum-tolerant and aluminum-sensitive soybean in acid soil / T. Yang, G. Liu, Y. Li [et al.] // *Biology and Fertility of Soils.* – 2012. – Vol. 48, No. 1. – P. 97-108.
219. Soil aggregate size distribution mediates microbial climate change feedback / M. Nie, E. Pendall, C. Bell, M. D. Wallenstein // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2014. – Vol. 68. – P. 357-365.
220. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter / M. F. Cotrufo, M. L. Haddix, M. G. Ranalli [et al.] // *Nature Geoscience.* – 2019. – Vol. 12, No. 12. – P. 989-994.
221. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils / J. Jiang, Y. Wang, M. Yu [et al.] // *Chemical Geology.* – 2018. – Vol. 501. – P. 86-94.
222. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement / G. Limousin, J.-P. Gaudet, L. Charlet [et al.] // *Applied Geochemistry.* – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 249–275
223. Sorption of organic carbon compounds to the fine fraction of surface and subsurface soils / S. Jagadamma, M. A. Mayes, Y. L. Zinn, [et al.] // *Geoderma.* – 2014. – Vol. 213. P. 79–86.

224. Speciation and accumulation pattern of heavy metals from soil to rice at different growth stages in farmland of southwestern China / Zh. Zhang, X. Wu, Q. Wu [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27, No. 28. – P. 35675-35691.

225. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment / L. Menšík, L. Hlisnikovský, E. Kunzová, L. Pospíšilová // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18. – No 8. – P. 2813-2822.

226. Zhu J. Estimation of Cation Exchange Capacity for Low-Activity Clay Soil Fractions Using Experimental Data from South China/ J. Zhu, Z.-X. Sun // *MDPI*. — 2024. — Vol. 16, Is. 16, 7002.

227. Zolovkina, D. F. Sorption of Water-Soluble Organic Substances by Mineral Horizons of Podzol / D. F. Zolovkina, E. I. Karavanova, A. A. Stepanov // *Eurasian Soil Science*. – 2018. – Vol. 51, No. 10. – P. 1154-1163

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Метеорологические условия за 2021-2024 года по данным Воронежской метеостанции

Месяц	Температура воздуха,				
	2021	2022	2023	2024	Средне многолетние значения
Январь	-3,9	-5,3	-5,7	-8,2	-6
Февраль	-7,8	-1	-4,4	-2,7	-5,7
Март	-0,5	-1,8	3,7	1,2	-0,3
Апрель	8,9	10,2	9,9	14,6	8,7
Май	16,2	11,8	14,8	14	15,5
Июнь	21	20,5	17,5	21,5	19,1
Июль	23,9	20,9	20,5	23,8	21,1
Август	23,9	23,4	21,6	21,8	19,9
Сентябрь	12,7	11,9	16,1	18,7	14
Октябрь	6,8	8,7	7,8	10,1	7,4
Ноябрь	3,1	0,7	2,8	1,9	0,4
Декабрь	-4,2	-2,1	-2,4	-1,4	-4,3
Среднегодовая температура	8,3	8,2	8,5	9,6	7,5

Месяц	Осадки, мм				
	2021	2022	2023	2024	Средне многолетние значения
Январь	76	69	17	86	42
Февраль	58	33	34	37	39
Март	14	61	51	3	38
Апрель	67	55	78	11	41
Май	61	37	31	28	48
Июнь	98	50	109	39	61
Июль	21	122	125	67	58
Август	10	31	48	9	52
Сентябрь	99	135	1	0	51
Октябрь	6	95	113	33	51
Ноябрь	41	67	135	47	43
Декабрь	37	105	124	22	48
Годовое количество осадков	586	862	870	382	572

Приложение Б

Величина гидротермического коэффициента в период с 2021 по 2024 годы

Период		2021	2022	2023	2024	Средние за 2021-2024
Май	1 декада	1,46	0,99	0,00	1,59	1,01
	2 декада	1,81	1,05	0,00	0,48	0,84
	3 декада	0,18	0,08	1,55	0,24	0,51
	за месяц	1,07	0,31	0,76	0,75	0,72
Июнь	1 декада	1,52	0,91	1,54	0,27	1,06
	2 декада	2,29	1,50	0,52	0,94	1,31
	3 декада	0,98	0,11	4,16	0,58	1,46
	за месяц	1,55	0,82	2,08	0,60	1,26
Июль	1 декада	0,35	0,04	2,71	0,58	0,92
	2 декада	0,18	2,20	0,25	0,69	0,83
	3 декада	0,31	3,48	2,64	1,53	1,99
	за месяц	0,28	1,87	1,95	0,91	1,25
Август	1 декада	0,03	0,25	0,53	0,46	0,32
	2 декада	0,06	1,07	0,90	0	0,51
	3 декада	0,33	0,03	0,79	0	0,29
	за месяц	0,13	0,43	0,76	0,14	0,37

Приложение В

Физико-химический состав исследуемых образцов (2021 год)

Вариант	Слой, см	pH _{вод}	pH _{KCL}	Нг	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ЕКО	V, %
				мг-экв/100 г почвы					
1.Контроль	0-20	6,30	4,83	5,43	26,27	20,00	6,27	31,70	82,90
	20-40	6,24	4,81	3,98	25,87	21,40	4,47	29,85	86,70
	40-60	6,53	5,01	3,48	26,00	22,60	3,40	29,48	88,20
	60-80	6,59	5,06	2,64	25,45	22,19	3,26	28,09	90,60
	80-100	6,65	5,02	1,84	25,02	21,85	3,17	26,86	93,10
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	6,24	4,88	5,60	24,00	18,87	5,13	29,60	81,10
	20-40	6,31	4,74	5,32	25,40	19,33	6,07	30,72	82,70
	40-60	6,69	4,97	3,57	26,00	19,93	6,07	29,57	87,90
	60-80	6,72	5,09	2,72	25,31	19,32	5,99	28,04	90,30
	80-100	6,89	5,21	1,76	24,08	19,92	5,16	25,84	93,20
3.Фон + NPK	0-20	6,15	4,66	6,58	24,07	18,80	5,27	30,65	78,50
	20-40	6,36	4,79	5,04	26,07	21,00	5,07	29,11	89,60
	40-60	6,71	5,02	3,42	25,87	20,60	5,27	29,29	88,30
	60-80	6,78	5,04	2,36	25,21	20,07	5,14	27,57	91,40
	80-100	7,01	5,28	1,84	24,89	19,83	5,06	26,76	93,10
5.Фон + 2NPK	0-20	5,92	4,36	7,81	24,07	19,27	4,80	31,88	75,50
	20-40	5,34	4,93	4,70	26,33	19,93	6,40	31,03	84,90
	40-60	5,82	5,02	3,49	24,67	20,00	4,67	28,16	87,60
	60-80	5,87	5,06	2,62	24,21	19,68	4,53	26,83	90,20
	80-100	6,07	5,04	1,72	23,90	19,49	4,41	25,62	93,30
12. Фон + NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,21	5,52	3,36	27,07	24,33	2,74	28,43	88,20
	20-40	6,19	5,52	2,87	28,67	22,30	4,37	29,54	90,30
	40-60	6,20	5,53	2,46	29,33	23,93	5,40	31,79	92,30
	60-80	6,86	5,40	0,93	28,96	25,01	3,95	29,89	96,90
	80-100	7,20	5,49	0,62	28,51	24,97	3,54	29,13	97,90
13. Фон + дефекат (последствие)	0-20	6,89	5,58	3,07	26,80	22,67	4,13	29,87	89,70
	20-40	6,97	5,47	2,95	26,20	22,07	4,13	29,15	89,90
	40-60	6,92	5,32	2,72	25,27	21,02	4,25	27,99	90,30
	60-80	7,03	5,44	0,98	25,01	20,87	4,14	25,99	96,20
	80-100	7,13	5,60	0,52	24,56	20,54	4,02	25,08	97,90
15. NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,55	5,27	4,08	25,47	19,40	6,07	29,55	86,20
	20-40	6,56	5,11	4,29	25,67	19,33	5,34	28,96	85,90
	40-60	6,73	5,31	3,14	25,87	18,67	7,20	29,01	89,20
	60-80	6,84	6,03	1,63	25,21	18,19	7,02	26,84	93,90
	80-100	7,04	6,28	0,96	24,86	17,93	6,93	25,82	96,30

Приложение Г

Физико-химический состав исследуемых образцов (2022 год)

Вариант	Слой, см	pH _{вод}	pH _{KCL}	Нг	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ЕКО	V, %
				мг-экв/100 г почвы					
1.Контроль	0-20	5,68	4,98	3,57	29,07	22,03	7,03	32,64	89,10
	20-40	5,94	5,05	3,17	29,37	21,67	7,70	32,54	90,30
	40-60	6,38	5,14	1,85	30,00	21,97	8,03	31,85	94,20
	60-80	6,52	5,27	1,38	29,17	22,67	6,50	30,55	95,50
	80-100	6,56	5,48	1,05	27,73	21,00	6,73	28,78	96,40
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	5,86	4,64	1,91	25,33	18,37	6,97	27,24	93,00
	20-40	5,98	4,78	2,67	26,00	21,00	5,00	28,67	90,70
	40-60	6,25	5,11	1,85	27,00	20,03	6,97	28,85	93,60
	60-80	6,49	5,40	1,77	29,00	20,30	8,70	30,77	94,20
	80-100	6,65	5,72	1,31	25,67	20,17	5,50	26,98	95,10
3.Фон + NPK	0-20	5,75	4,70	2,54	26,00	18,50	7,50	28,54	91,10
	20-40	5,97	5,02	3,08	25,33	21,07	4,27	28,41	89,20
	40-60	6,29	5,19	2,06	25,67	22,07	3,60	27,73	92,60
	60-80	6,41	5,23	1,42	24,33	21,03	3,30	25,75	94,50
	80-100	6,52	5,41	0,73	23,33	21,70	1,63	24,06	97,00
5.Фон+ 2NPK	0-20	5,57	4,30	5,54	20,33	17,37	2,97	25,87	78,60
	20-40	5,68	4,40	4,74	23,33	19,63	3,70	28,07	83,10
	40-60	6,05	4,93	2,09	23,67	20,27	3,40	25,76	91,90
	60-80	6,40	5,19	1,33	23,33	20,60	2,73	24,66	94,60
	80-100	6,54	5,44	0,89	20,67	18,30	2,37	21,56	95,90
12. Фон + NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,24	5,13	2,54	22,33	19,07	3,27	24,87	89,80
	20-40	6,33	5,21	2,67	22,67	20,00	2,67	25,34	89,50
	40-60	6,44	5,24	1,75	24,33	21,67	2,67	26,08	93,30
	60-80	6,48	5,38	1,41	23,00	19,70	3,30	24,41	94,20
	80-100	6,54	5,41	1,23	20,33	18,73	1,60	21,56	94,30
13. Фон + дефекат (последствие)	0-20	6,63	5,31	1,75	23,67	20,93	2,73	25,42	93,10
	20-40	6,65	5,46	1,93	24,33	20,33	4,00	26,26	92,70
	40-60	6,62	5,49	1,60	24,33	20,37	3,97	25,93	93,80
	60-80	6,69	5,53	1,30	23,00	21,07	1,93	24,30	94,70
	80-100	6,71	5,61	1,05	20,33	19,73	0,60	21,38	95,10
15. NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,38	5,43	2,18	24,00	22,00	2,00	26,18	91,70
	20-40	6,59	5,49	1,58	24,33	22,03	2,30	25,91	93,90
	40-60	6,66	5,66	1,18	24,67	21,33	3,33	25,85	95,40
	60-80	6,64	5,68	1,15	23,67	21,53	2,13	24,82	95,40
	80-100	7,40	6,52	0,26	23,33	22,07	1,27	23,59	98,90

Приложение Д

Физико-химический состав исследуемых образцов (2023 год)

Вариант	Слой, см	pH _{вод}	pH _{KCL}	Нг	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ЕКО	V, %
				мг-экв/100 г почвы					
1.Контроль	0-20	5,94	4,99	2,56	22,40	18,07	4,33	24,96	89,73
	20-40	6,02	4,92	2,52	23,37	17,63	5,73	25,89	90,27
	40-60	6,28	5,16	1,65	23,67	16,67	7,00	25,32	93,47
	60-80	6,44	5,25	1,30	22,10	16,77	5,33	23,40	94,46
	80-100	6,58	5,34	1,09	20,07	13,07	7,00	21,16	94,83
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	5,84	4,80	3,18	22,27	16,47	5,80	25,44	87,52
	20-40	5,86	4,86	2,93	23,17	15,07	8,10	26,10	88,77
	40-60	6,15	4,99	1,95	23,73	16,93	6,80	25,68	92,40
	60-80	6,40	5,11	1,22	19,73	13,30	6,43	20,95	94,19
	80-100	6,62	5,29	1,03	18,93	12,37	6,57	19,97	94,83
3.Фон + NPK	0-20	5,57	4,55	3,74	20,23	15,03	5,20	23,97	84,41
	20-40	5,67	4,63	3,40	21,60	15,37	6,23	25,00	86,42
	40-60	6,10	4,94	1,86	23,37	16,83	6,53	25,22	92,65
	60-80	6,61	5,39	0,72	15,07	10,77	4,30	15,78	95,45
	80-100	6,49	5,16	1,16	21,00	14,37	6,63	22,16	94,79
5.Фон+ 2NPK	0-20	5,42	4,42	4,21	20,13	15,37	4,77	24,34	82,71
	20-40	5,93	4,80	2,51	22,50	17,33	5,17	25,01	89,96
	40-60	6,22	4,99	1,56	21,37	15,97	5,40	22,92	93,21
	60-80	6,39	5,12	1,26	20,67	16,47	4,20	21,93	94,25
	80-100	6,38	5,12	1,12	18,93	11,37	7,57	20,05	94,41
12. Фон + NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,18	5,22	2,20	22,00	16,10	5,90	24,20	90,92
	20-40	6,13	5,19	2,10	23,73	17,83	5,90	25,83	91,87
	40-60	6,37	5,28	1,53	22,67	16,33	6,33	24,20	93,67
	60-80	6,54	5,44	1,09	23,93	17,80	6,13	25,03	95,63
	80-100	6,82	5,55	0,71	18,10	12,07	6,03	18,81	96,23
13. Фон + дефекат (последствие)	0-20	6,07	5,10	2,73	22,63	12,97	9,67	25,36	89,24
	20-40	6,48	5,39	1,50	23,67	14,33	9,33	25,16	94,05
	40-60	6,59	5,48	1,22	23,60	15,13	8,47	24,82	95,10
	60-80	6,73	5,51	1,01	21,33	13,67	7,67	22,34	95,50
	80-100	7,70	6,71	0,28	21,33	14,07	7,27	21,61	98,70
15. NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,36	5,35	1,93	22,37	15,60	6,77	24,30	92,04
	20-40	6,43	5,42	1,70	24,73	14,50	10,23	26,43	93,58
	40-60	6,67	5,58	1,22	23,70	14,63	9,07	24,92	95,12
	60-80	6,87	5,65	1,06	23,67	14,07	9,60	24,73	95,72
	80-100	6,96	5,90	0,73	22,83	14,47	8,37	23,56	96,92

Приложение Е

Физико-химический состав исследуемых образцов (2024 год)

Вариант	Слой, см	pH _{вод}	pH _{KCL}	Нг	S	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ЕКО	V, %
				мг-экв/100 г почвы					
1.Контроль	0-20	6,49	5,10	1,95	24,70	20,90	3,80	26,65	92,68
	20-40	6,49	5,20	1,78	27,97	22,13	5,83	29,74	94,03
	40-60	6,88	5,23	1,23	27,80	21,83	5,97	29,03	95,75
	60-80	7,07	5,53	0,88	27,87	21,73	6,13	28,74	96,96
	80-100	7,85	6,76	0,29	23,50	17,30	6,20	23,79	98,79
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	6,27	4,74	2,58	25,97	22,80	3,17	28,55	90,96
	20-40	6,41	4,84	2,74	25,53	20,70	4,83	28,27	90,31
	40-60	6,75	5,10	1,70	29,43	24,53	4,90	31,13	94,55
	60-80	6,94	5,26	1,40	27,03	20,60	6,43	28,43	95,08
	80-100	7,13	5,28	0,95	20,80	13,70	7,10	21,75	95,62
3.Фон + NPK	0-20	5,87	4,49	3,57	24,93	20,30	4,63	28,50	87,48
	20-40	6,03	4,77	3,07	28,27	22,36	5,91	31,34	90,20
	40-60	6,63	4,88	1,93	27,83	21,40	6,43	29,77	93,50
	60-80	6,66	4,97	1,62	23,90	16,37	7,53	25,52	93,66
	80-100	6,88	5,02	1,16	23,80	14,57	9,23	24,96	95,37
5.Фон+ 2NPK	0-20	5,72	4,39	4,27	25,03	21,70	3,33	29,30	85,43
	20-40	5,84	4,47	3,72	24,70	20,00	4,70	28,42	86,91
	40-60	6,33	4,87	2,81	25,73	19,73	6,00	28,54	90,16
	60-80	6,34	4,95	2,12	25,80	18,73	7,07	27,92	92,42
	80-100	6,42	5,03	2,02	24,30	15,77	8,53	26,32	92,32
12. Фон + NPK + дефекат (последствие)	0-20	6,51	5,09	2,00	26,30	22,37	3,93	28,30	92,95
	20-40	6,51	5,13	1,98	26,47	21,67	4,80	28,44	93,05
	40-60	6,87	5,23	1,48	30,63	25,50	5,13	32,11	95,40
	60-80	6,97	5,32	0,98	25,40	17,90	7,50	26,38	96,29
	80-100	7,13	5,36	0,96	22,37	13,97	8,40	23,33	95,87
13. Фон + дефекат (последствие)	0-20	6,84	5,44	1,44	27,23	24,07	3,17	28,67	94,99
	20-40	6,90	5,45	1,33	27,13	23,00	4,13	28,46	95,33
	40-60	7,02	5,57	0,93	30,77	25,83	4,93	31,69	97,07
	60-80	7,18	5,61	0,92	30,83	25,60	5,23	31,75	97,11
	80-100	8,12	7,02	0,39	24,57	18,07	6,50	24,96	98,42
15. NPK+ дефекат (последствие)	0-20	6,82	5,41	1,34	29,23	22,27	6,97	30,57	95,62
	20-40	6,93	5,43	1,65	28,13	20,67	7,47	29,78	94,48
	40-60	7,01	5,66	1,23	27,30	19,40	7,90	28,53	95,71
	60-80	7,37	6,25	0,53	27,50	19,37	8,13	28,03	98,10
	80-100	8,25	7,22	0,34	23,43	13,90	9,53	23,77	98,56

Приложение Ж

Групповой состав гумуса чернозема выщелоченного различных вариантов в среднем 2021-2024 гг.

Варианты опыта	Слой, см	Содержание органического углерода (С общ), %	ГК	ФК	Гумин	Сгк /Сфк
1. Контроль	0-20	2,75	1,48	0,58	0,69	2,55
	20-40	2,43	1,29	0,53	0,61	2,43
	40-60	1,56	0,78	0,39	0,39	2,00
	60-80	1,45	0,6	0,49	0,36	1,22
	80-100	1,40	0,48	0,57	0,35	0,84
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	2,65	1,48	0,51	0,66	2,90
	20-40	2,40	1,3	0,5	0,60	2,60
	40-60	1,99	0,88	0,61	0,50	1,44
	60-80	1,71	0,65	0,63	0,43	1,03
	80-100	1,20	0,34	0,56	0,30	0,61
3. Фон + NPK	0-20	2,36	1,19	0,58	0,59	2,05
	20-40	2,75	1,37	0,69	0,69	1,99
	40-60	1,54	0,71	0,46	0,38	1,54
	60-80	1,21	0,51	0,4	0,30	1,28
	80-100	0,66	0,21	0,29	0,16	0,72
5. Фон + 2NPK	0-20	2,55	1,26	0,65	0,64	1,94
	20-40	2,40	1,11	0,69	0,60	1,61
	40-60	1,41	0,61	0,46	0,35	1,33
	60-80	1,15	0,46	0,4	0,29	1,15
	80-100	0,69	0,27	0,25	0,17	1,08
12. Фон + NPK + дефекат (последействие)	0-20	2,58	1,45	0,48	0,65	3,02
	20-40	2,70	1,45	0,58	0,68	2,50
	40-60	2,09	1,05	0,52	0,52	2,02
	60-80	1,12	0,49	0,35	0,28	1,40
	80-100	0,94	0,4	0,31	0,23	1,29
13. Фон + дефекат (последействие)	0-20	2,65	1,46	0,53	0,66	2,75
	20-40	2,63	1,36	0,61	0,66	2,23
	40-60	1,58	0,75	0,43	0,40	1,74
	60-80	1,59	0,62	0,58	0,40	1,07
	80-100	1,29	0,48	0,49	0,32	0,98
15. NPK + дефекат (последействие)	0-20	2,31	1,18	0,55	0,58	2,15
	20-40	2,11	0,99	0,59	0,53	1,68
	40-60	1,83	0,74	0,63	0,46	1,17
	60-80	1,04	0,38	0,4	0,26	0,95
	80-100	1,46	0,42	0,67	0,37	0,63

Приложение 3

Определение буферной способности в почвенных образцах 2021 года

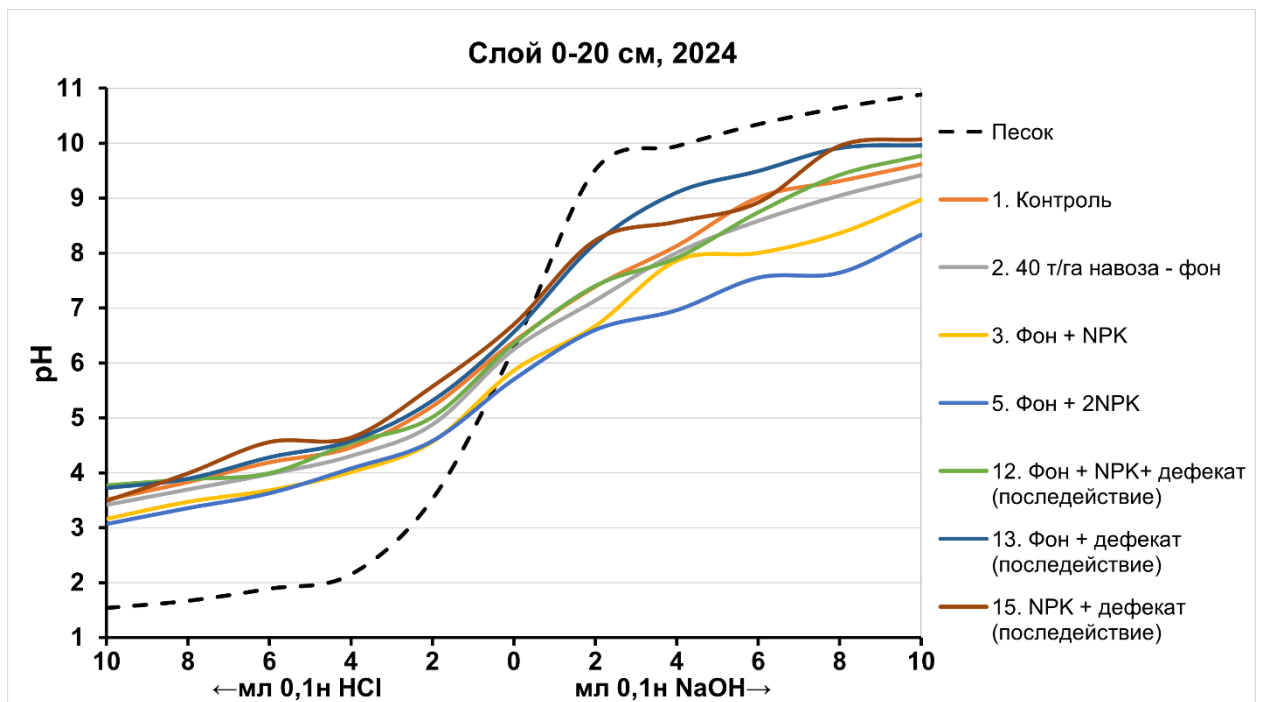
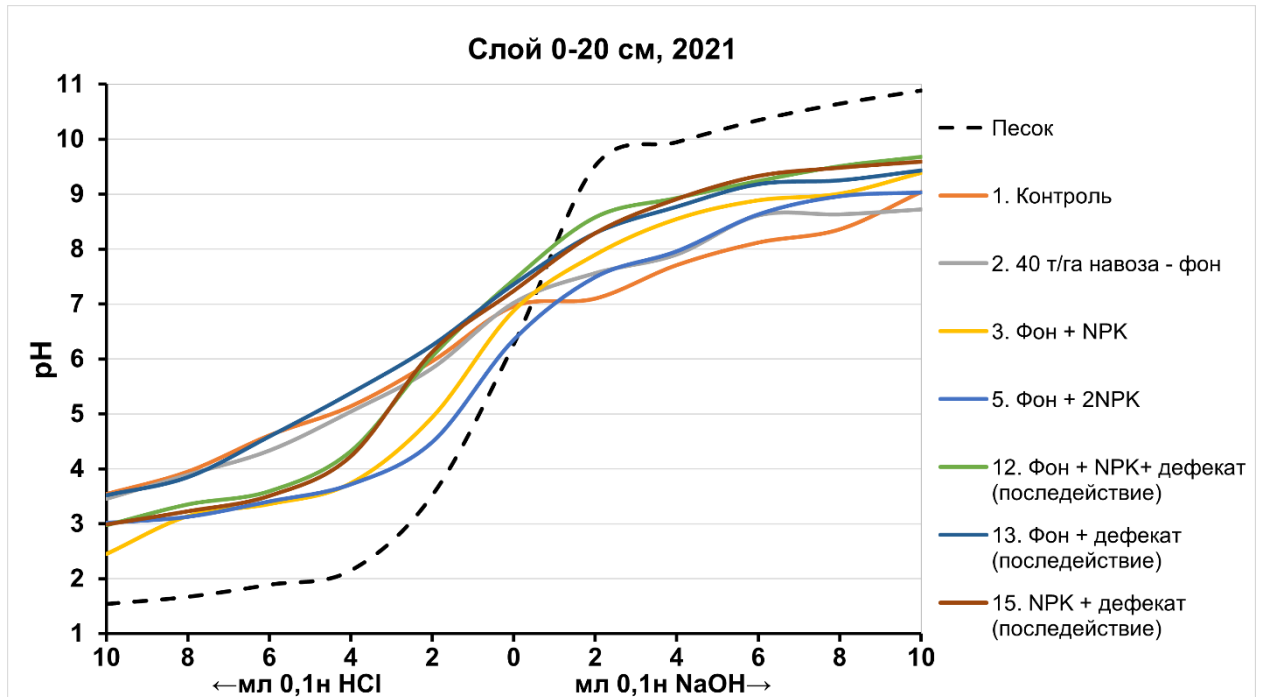
Реактивы		№ колбы										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HCl, мл		10	8	6	4	2	-	-	-	-	-	-
NaOH, мл		-	-	-	-	-	-	2	4	6	8	10
H ₂ O, мл		10	12	14	16	18	20	18	16	14	12	10
вариант	Слой, см	pH _{HCl}					pH _{H₂O}	pH _{NaOH}				
Песок		1,54	1,67	1,89	2,15	3,52	6,27	9,52	9,95	10,35	10,65	10,89
1. Контроль	0-20	3,54	3,95	4,61	5,14	5,96	6,96	7,10	7,71	8,12	8,36	9,04
	20-40	3,85	4,02	4,81	5,46	6,34	7,15	7,87	8,01	8,36	8,48	8,81
	40-60	3,6	3,77	4,33	5,01	6,39	7,43	8,06	8,39	8,57	8,76	9,23
	60-80	3,41	3,76	4,57	5,87	6,14	7,23	7,76	8,04	8,16	8,83	9,03
	80-100	3,32	3,38	4,1	5,29	6,72	7,61	8,07	8,56	8,65	8,78	9,03
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	3,45	3,89	4,33	5,04	5,83	7,02	7,56	7,90	8,61	8,63	8,72
	20-40	3,65	3,98	4,53	4,93	5,82	7,26	7,81	8,42	8,63	8,32	8,89
	40-60	3,32	3,6	4,12	4,56	6,37	7,59	8,46	8,82	8,97	9,19	8,90
	60-80	3,36	4,25	4,72	5,49	6,31	7,85	8,42	8,72	8,91	9,04	9,40
	80-100	2,57	2,84	3,52	3,98	6,49	7,9	8,51	8,79	9,05	9,16	9,51
3. Фон + НРК	0-20	2,45	3,14	3,36	3,74	4,94	6,88	7,90	8,55	8,89	9,01	9,39
	20-40	3,07	3,11	3,49	4,03	5,06	7,17	8,16	8,91	9,46	9,53	9,67
	40-60	2,93	3,08	3,55	4,09	5,03	7,74	8,86	9,09	9,47	9,61	9,76
	60-80	2,88	3,13	3,62	4,15	6,04	7,76	8,61	8,93	9,39	9,64	9,92
	80-100	2,72	2,93	3,05	3,71	5,42	7,91	8,74	9,06	9,16	9,96	9,78
5. Фон + 2НРК	0-20	3,02	3,13	3,41	3,72	4,49	6,35	7,49	7,96	8,63	8,96	9,03
	20-40	3,11	3,3	3,56	4,19	5,56	6,77	7,84	8,62	8,99	9,36	9,55
	40-60	3,09	3,31	3,63	4,03	5,64	7,22	8,57	8,95	9,20	9,54	9,70
	60-80	3,01	3,16	3,64	4,97	5,73	7,50	8,55	9,13	9,25	9,97	9,72
	80-100	6,96	7,12	7,25	7,44	7,81	8,32	9,13	9,5	9,74	10,33	10,62
12. Фон + НРК+ дефекат (после- действие)	0-20	2,97	3,35	3,59	4,32	6,05	7,44	8,58	8,93	9,24	9,51	9,68
	20-40	3,07	3,1	3,52	4,14	5,17	7,58	8,70	9,16	9,41	9,50	9,72
	40-60	3,17	3,26	3,47	4,35	6,13	7,69	8,56	8,83	9,48	9,74	9,85
	60-80	3,24	3,45	3,84	4,81	6,46	7,92	8,61	8,97	9,38	9,67	9,94
	80-100	2,75	2,94	3,35	5,01	7,15	8,09	8,79	9,17	9,36	9,53	9,89
13. Фон + дефекат (после- действие)	0-20	3,52	3,85	4,59	5,38	6,25	7,36	8,29	8,77	9,18	9,25	9,43
	20-40	3,42	3,77	4,13	5,28	6,32	7,51	8,38	8,81	9,16	9,33	9,45
	40-60	3,29	3,53	3,84	4,81	6,21	7,58	8,46	8,97	9,17	9,43	9,51
	60-80	3,17	3,42	3,79	4,58	6,14	7,67	8,65	9,01	9,27	9,48	9,56
	80-100	3,21	3,45	3,82	4,47	6,61	7,92	8,75	9,08	9,34	9,50	9,83
15. НРК + дефекат (после- действие)	0-20	2,99	3,23	3,51	4,23	6,13	7,24	8,29	8,91	9,33	9,48	9,59
	20-40	2,96	3,14	3,41	3,98	6,17	7,75	8,7	9,07	9,46	9,63	9,80
	40-60	3,02	3,14	3,43	4,15	5,74	7,41	8,71	9,16	9,63	9,71	9,87
	60-80	3,61	4,05	4,83	6,67	7,29	7,92	8,74	9,03	9,55	9,82	10,21
	80-100	6,67	7,12	7,23	7,51	7,71	8,36	9,08	9,34	9,53	9,81	10,13

Приложение И

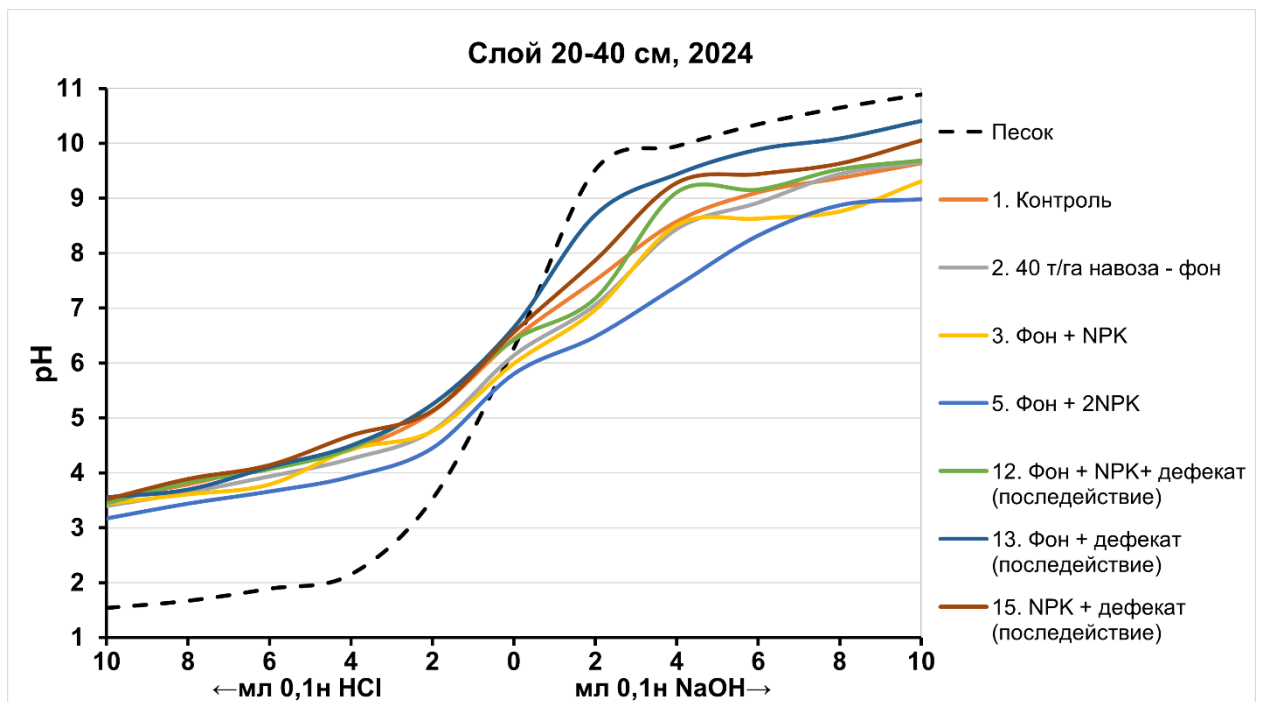
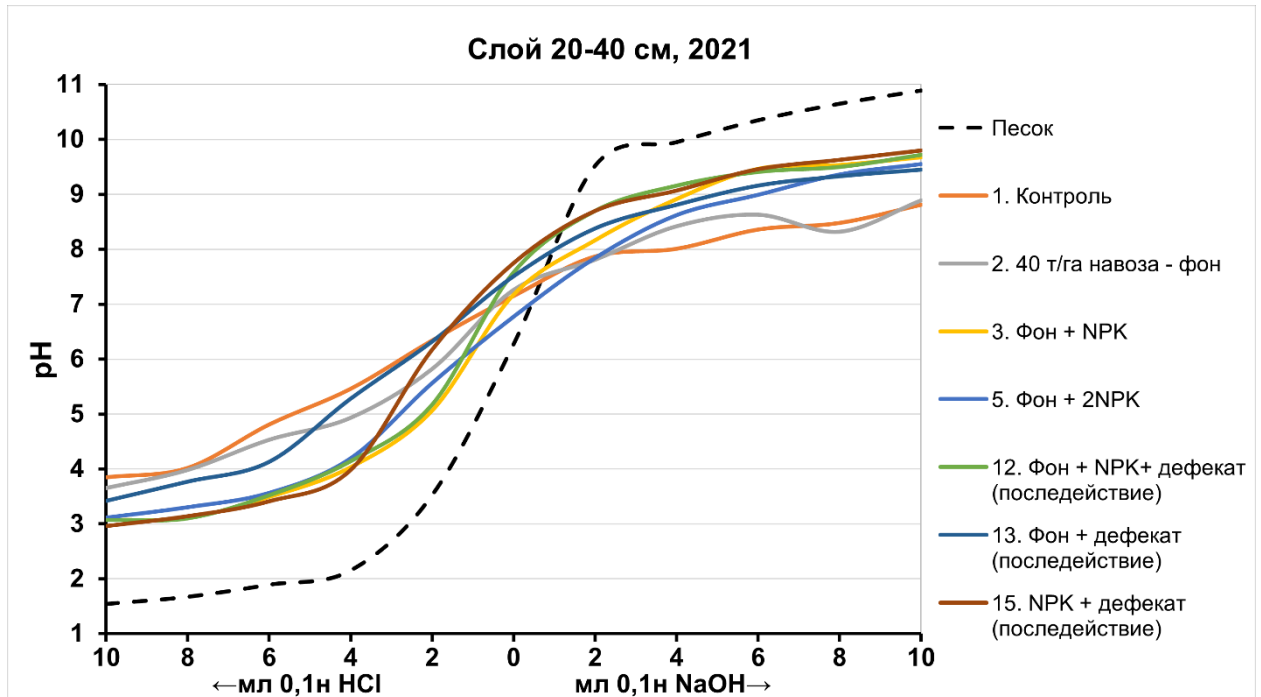
Определение буферной способности в почвенных образцах 2024 года

Реактивы		№ колбы										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
HCl, мл		10	8	6	4	2	-	-	-	-	-	-
NaOH, мл		-	-	-	-	-	-	2	4	6	8	10
H ₂ O, мл		10	12	14	16	18	20	18	16	14	12	10
вариант	Слой, см	pH _{HCl}					pH _{H₂O}	pH _{NaOH}				
Песок		1,54	1,67	1,89	2,15	3,52	6,27	9,52	9,95	10,35	10,65	10,89
1. Контроль	0-20	3,51	3,83	4,19	4,46	5,21	6,39	7,39	8,13	9,01	9,31	9,62
	20-40	3,54	3,79	4,14	4,42	5,11	6,44	7,51	8,58	9,11	9,37	9,64
	40-60	3,39	3,67	3,92	4,42	5,07	6,71	8,36	9,27	9,76	10,08	10,46
	60-80	3,39	3,63	4,04	4,35	5,12	6,85	8,51	9,48	9,88	10,32	10,55
	80-100	6,35	6,43	6,62	6,66	7,04	7,69	9,39	10,67	10,73	10,99	11,24
2. 40 т/га навоза - фон	0-20	3,42	3,70	3,98	4,31	4,88	6,25	7,14	8,01	8,59	9,05	9,42
	20-40	3,40	3,65	3,94	4,26	4,77	6,14	7,06	8,44	8,92	9,44	9,65
	40-60	3,51	3,69	4,08	4,41	5,19	6,60	7,68	8,93	9,14	9,61	9,81
	60-80	3,54	3,71	4,15	4,53	5,19	6,72	8,01	9,07	9,43	9,89	10,25
	80-100	3,24	3,37	3,63	4,06	4,88	6,78	8,45	9,86	10,12	10,45	10,83
3. Фон + НРК	0-20	3,16	3,47	3,68	4,01	4,56	5,86	6,67	7,86	8,00	8,36	8,97
	20-40	3,44	3,61	3,79	4,43	4,76	5,99	6,97	8,51	8,63	8,76	9,31
	40-60	3,32	3,54	3,93	4,10	4,96	6,42	7,57	9,21	9,48	9,59	10,22
	60-80	3,19	3,29	3,65	4,11	4,78	6,42	7,71	9,31	9,61	9,72	10,56
	80-100	3,04	3,33	3,75	4,13	4,78	6,68	7,95	9,34	10,28	10,44	10,52
5. Фон + 2НРК	0-20	3,07	3,36	3,63	4,08	4,58	5,70	6,60	6,96	7,55	7,64	8,33
	20-40	3,17	3,44	3,66	3,93	4,45	5,80	6,48	7,40	8,32	8,87	8,98
	40-60	3,20	3,55	3,97	4,29	4,85	6,19	7,23	8,15	8,64	9,15	9,34
	60-80	3,34	3,52	3,79	4,21	4,29	6,31	7,59	8,38	8,98	9,54	9,75
	80-100	3,30	3,82	4,42	4,83	6,33	7,48	8,35	8,91	9,20	9,67	9,89
12. Фон + НРК + дефекат (послед- действие)	0-20	3,77	3,88	3,99	4,54	5,01	6,35	7,40	7,91	8,74	9,42	9,77
	20-40	3,45	3,83	4,07	4,45	5,25	6,42	7,18	9,11	9,16	9,53	9,69
	40-60	3,63	3,76	4,01	4,43	5,09	6,62	8,08	8,76	9,53	10,29	10,66
	60-80	3,33	3,57	4,02	4,43	5,08	6,81	8,65	9,32	9,94	10,12	10,74
	80-100	3,15	3,42	3,74	4,20	4,84	6,69	8,54	9,51	10,01	10,29	10,60
13. Фон + дефекат (послед- действие)	0-20	3,72	3,89	4,28	4,58	5,31	6,56	8,17	9,10	9,49	9,91	9,96
	20-40	3,56	3,70	4,11	4,50	5,25	6,65	8,70	9,44	9,89	10,09	10,41
	40-60	3,41	3,61	3,97	4,52	5,29	6,76	8,33	9,43	9,59	9,88	10,09
	60-80	3,31	3,55	3,92	4,45	5,20	6,88	8,99	9,70	10,31	10,56	10,85
	80-100	6,27	6,34	6,44	6,85	7,16	7,96	9,41	10,27	10,84	11,11	11,15
15. НРК + дефекат (послед- действие)	0-20	3,49	3,99	4,56	4,64	5,57	6,70	8,23	8,57	8,92	9,95	10,07
	20-40	3,52	3,89	4,14	4,68	5,13	6,56	7,87	9,28	9,44	9,63	10,05
	40-60	3,37	3,74	3,79	4,19	4,62	5,29	6,67	8,36	8,51	9,93	10,62
	60-80	3,88	4,76	5,48	5,78	6,43	7,26	8,11	10,01	10,22	10,46	10,71
	80-100	6,35	6,53	6,61	6,92	7,38	8,12	10,19	10,42	10,91	11,13	11,27

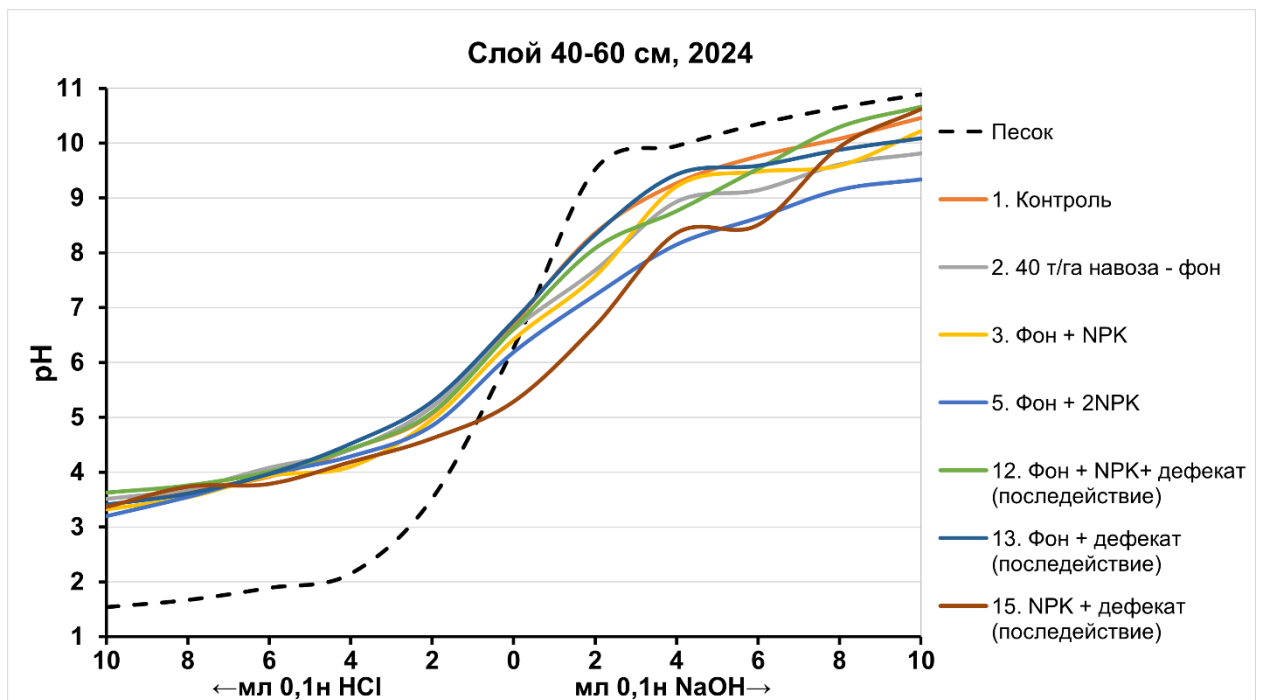
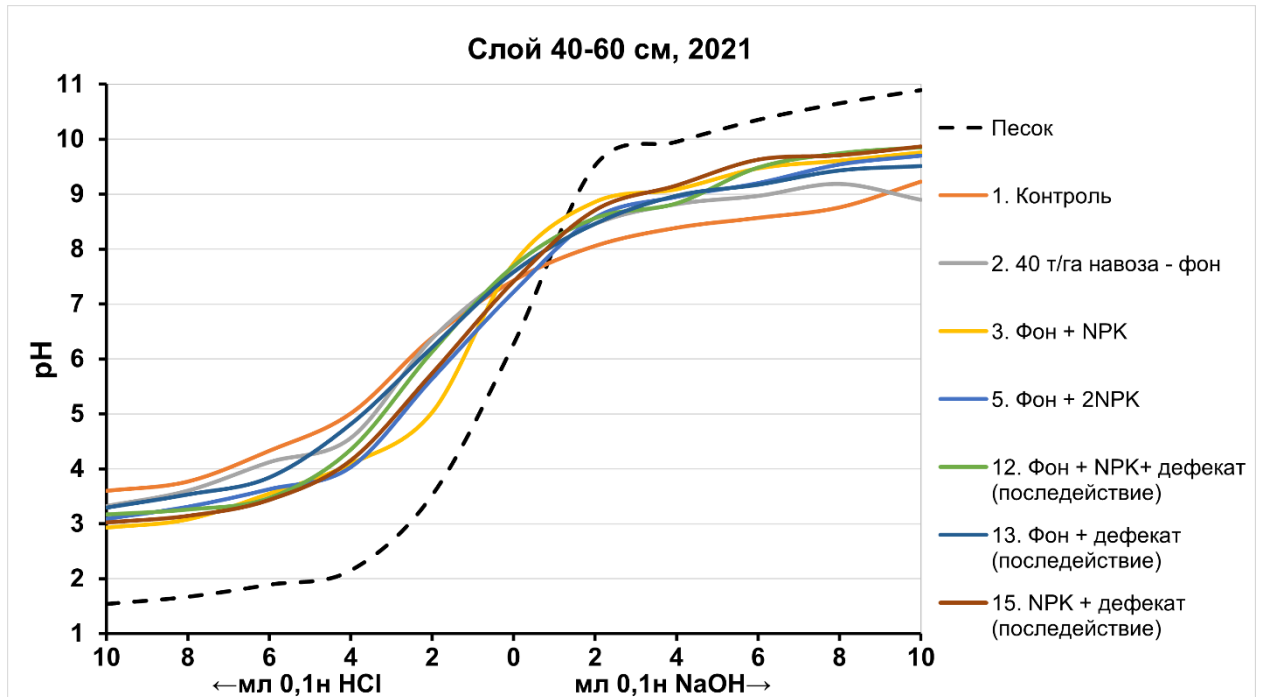
Приложение К



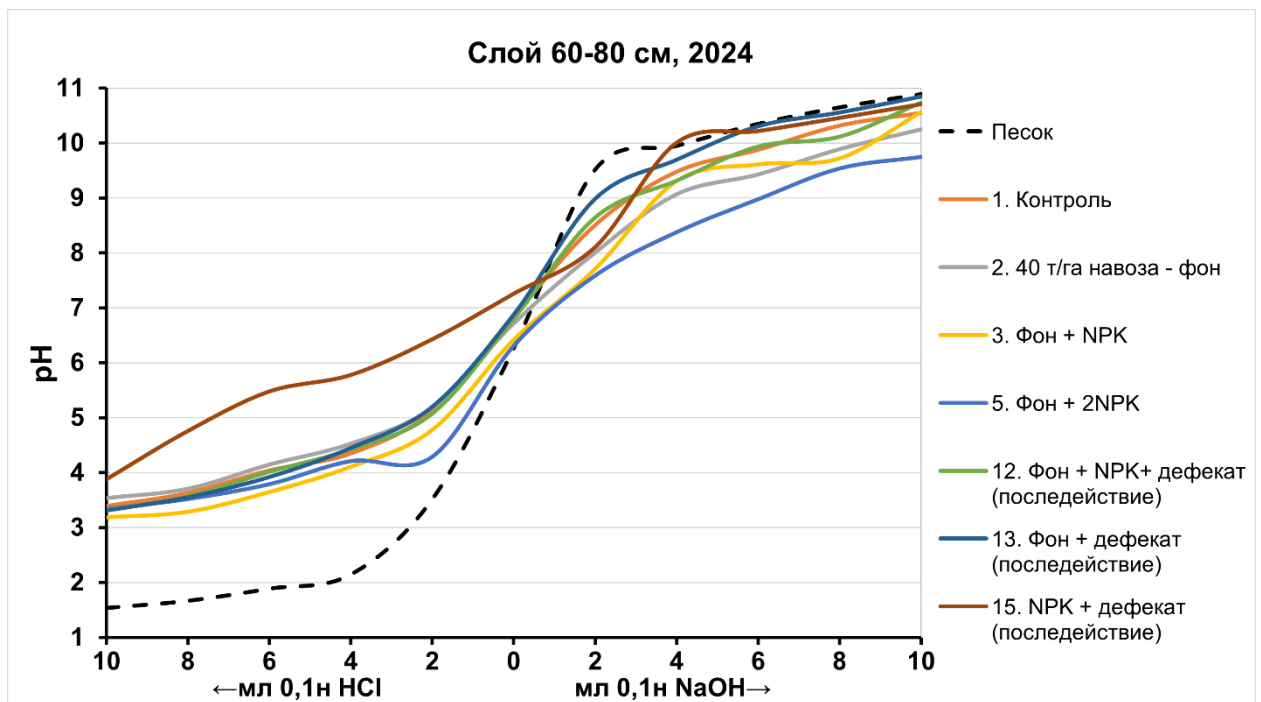
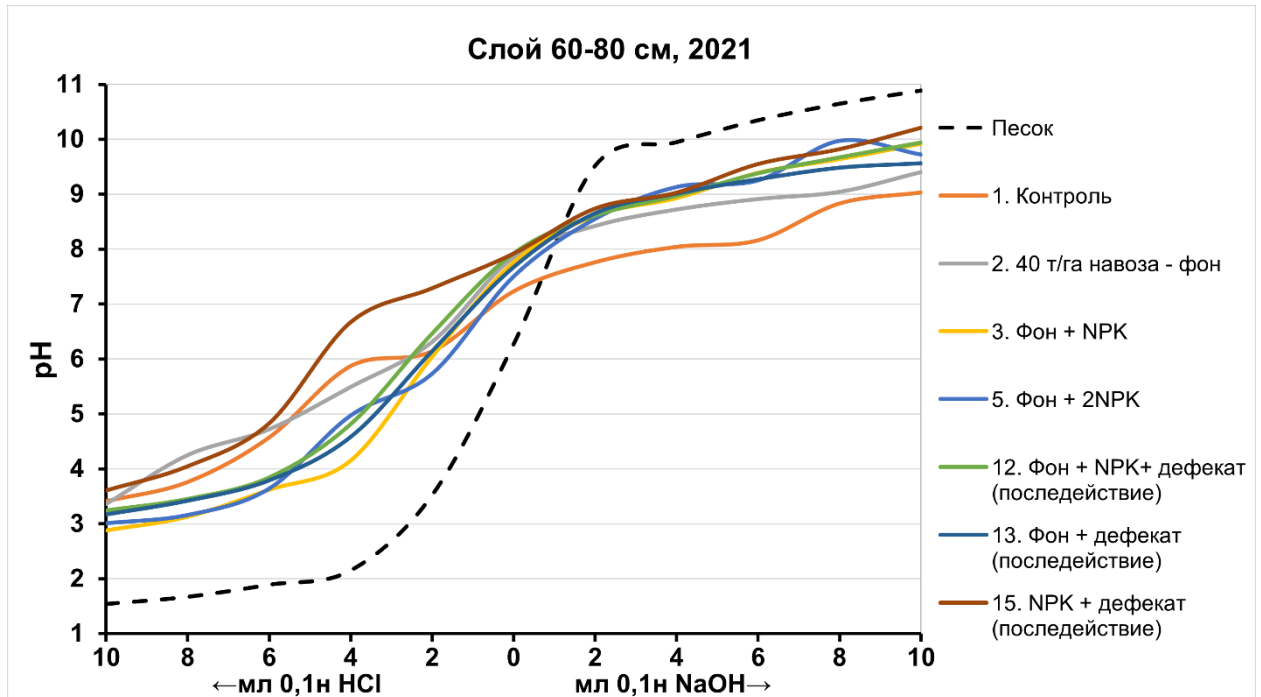
Приложение Л



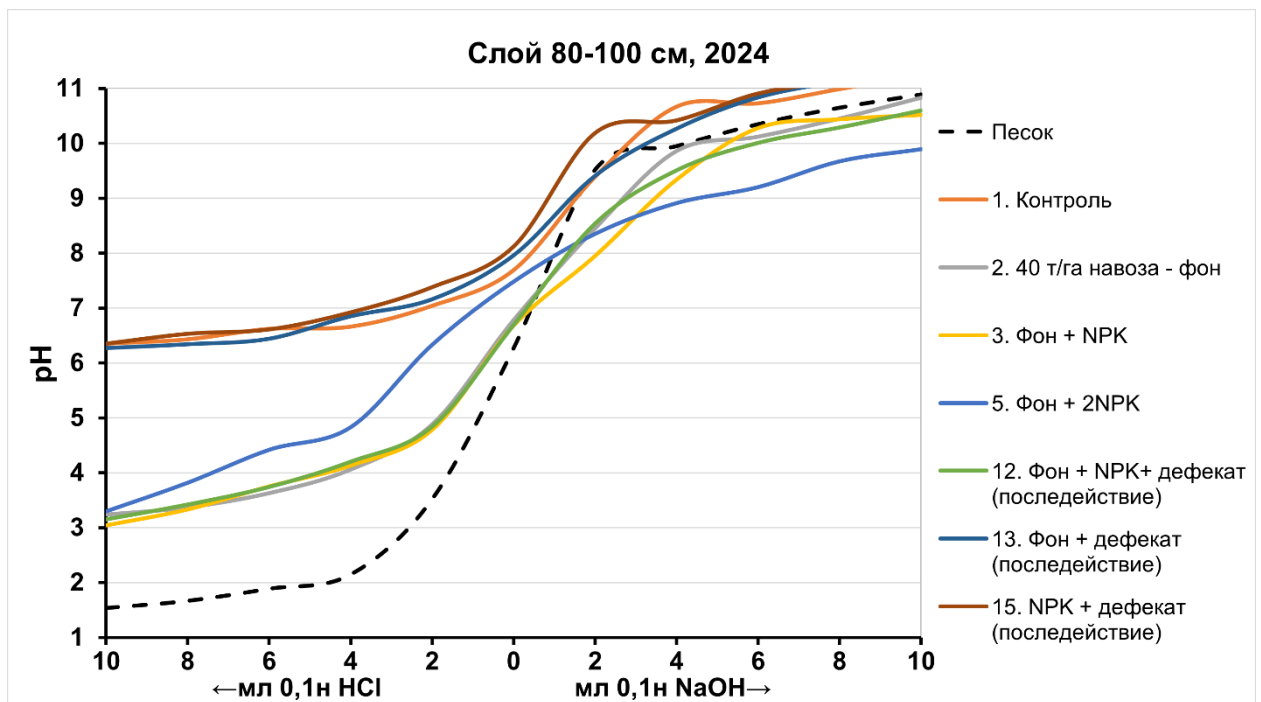
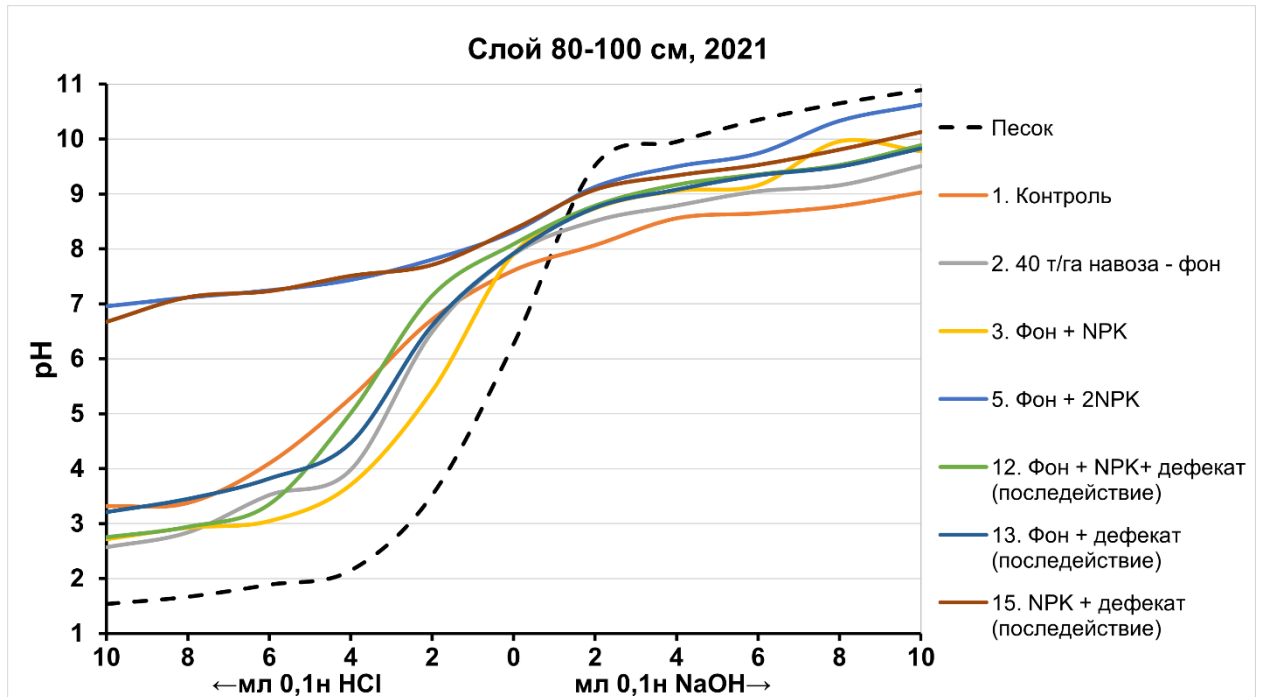
Приложение М



Приложение Н



Приложение О



Приложение II

Коэффициенты перерасчета

Коэффициент	Залежь	Зернопаропропашной севооборот
Лабильности гумуса	0,096	0,091
пересчета для определения запасов энергии в негумифицированном органическом веществе	0,072	0,025
пересчета для определения выделения энергии при трансформации органического вещества	0,1036	0,0616

Шкала оценки энергетических характеристик почв

Шкала оценки	Значение	Оценка уровня значения
Энергопотенциала органического вещества (гДж/га) в черноземе выщелоченном	Менее 2990	Критический
	2990-3530	Низкий
	3531-4000	Средний
	4001-4470	Оптимальный
	4471 и более	Высокий
Количества энергии (Qвт), выделяемой при трансформации органического вещества черноземных почв (гДж/га)	Менее 200	Критический
	200-299	Низкий
	300-399	Средний
	400-499	Оптимальный
	Свыше 499	Высокий
Показателя активности энергетических процессов (ПА) в органическом веществе черноземных почв	Менее 0,05	Критический
	0,05-0,07	Низкий
	0,071-0,090	Средний
	0,091-0,110	Оптимальный
	Свыше 0,110	Высокий
Показателя устойчивости плодородия почв, (Пу)	Менее 1	Критический
	1,0-1,5	Очень низкий
	1,5-5,0	Низкий
	2,1-5,0	Средний
	5,1-8,0	Оптимальный
	Свыше 8	Высокий

Приложение Р

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования Дворниковой А.В., выполненного на тему «Научно-практическое обоснование трансформации почвенно-поглощающего комплекса чернозема выщелоченного при агрохимическом воздействии в лесостепи ЦЧР»

1. Наименование внедренного мероприятия:

Комплексное применение минеральных удобрений в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$ под озимую пшеницу, 40 т/га навоза и дефеката в дозе, рассчитанной по величине гидролитической кислотности.

2. Каким научным учреждением мероприятие предложено к внедрению

Кафедрой агрохимии, почвоведения и агроэкологии ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ

3. Наименование хозяйства (организации), его адрес Эртильский филиал ООО «АК Воронеж», 397008, Воронежская область, Эртильский район, п. Первомайский, пер. Больничный, д. 6

4. Календарные сроки внедрения (начало-окончание)

10 апреля 2024 – 20 сентября 2025 г.

5. Объем внедрения мероприятий (по плану и фактически) – 123,80 га

6. Экономический эффект от внедрения на единицу (га) и на весь объем внедрения в рублях:

Производственные затраты на 1 га: 43,74 тыс. руб.

Стоимость продукции с 1 га: 46,00 тыс. руб.

Чистый доход с 1 га: 2,26 тыс. руб.

Чистый доход с площади внедрения: 279,79 тыс. руб.

EBITDA с 1 га (чистая прибыль+налоги+% по кредитам +амортизация) 2,26 тыс. руб.

EBITDA с площади внедрения 279,79 тыс. руб.

7. Долевое участие университета в полученном экономическом эффекте составляет: не определялось

8. Фамилия, имя, отчество и должность работников, ответственных за внедрение научной разработки от университета и хозяйства

Кандидат с.-х. наук, зав. кафедрой агрохимии, почвоведения и агроэкологии Гасанова Е.С.

Операционный директор ООО «АК Воронеж» Кузнецова Е.А.

Аспирант Дворникова А.В.

Председатель комиссии:

Операционный директор
ООО «АК Воронеж»

Ответственные за внедрение



Кузнецова Е.А.

Гасанова Е.С.

Дворникова А.В.

Акт составлен 20 сентября 2025 года.