

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.П. ОГАРЁВА»

На правах рукописи

Логаева Ольга Александровна

**ДИНАМИКА СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ  
СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ В ЗВЕНЕ СЕВООБОРОТА  
(НА ПРИМЕР ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОГО ОПЫТА)**

4.1.3 Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель: доктор с.-х. наук, профессор  
Смолин Николай Васильевич

Саранск 2026

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МНОГОЛЕТНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОЦЕНОЗОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	10
1.1 Мировой и отечественный опыт лизиметрического метода исследований в агрохимии	10
1.2 Динамика агрохимических свойств почвы в условиях длительного систематического применения средств химизации	19
1.3 Влияние длительного внесения средств химизации на урожайность и качество продукции растениеводства	28
2 УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	36
2.1 Схема и методика проведения исследований	36
2.2 Агрометеорологические условия в годы исследований	43
2.3 Агрохимическая характеристика почвы лизиметров перед закладкой опыта	46
3 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВНЕСЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА ДИНАМИКУ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ	48
3.1 Изменение содержания гумуса в условиях длительного применения средств химизации	48
3.2 Динамика кислотности почвы в зависимости от длительного применения минеральных удобрений и средств защиты растений	53
3.3 Состояние ППК в зависимости от длительного применения средств химизации	60
3.4 Содержание NPK в почве в зависимости от длительного применения минеральных удобрений и пестицидов в лизиметрическом опыте	66
4 УРОЖАЙНОСТЬ ЗВЕНА СЕВООБОРОТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ	77

4.1 Урожайность однолетних трав при длительном применении средств химизации	78
4.2 Урожайность озимой пшеницы при длительном применении минеральных удобрений и средств защиты растений	83
4.3 Совокупная продуктивность звена севооборота	92
5 КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА БАЛАНСА ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОГО ОПЫТА	93
5.1 Динамика баланса NPK при длительном применении средств химизации в лизиметрическом опыте (на примере озимой пшеницы)	94
6 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА ФИТОСАНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ	100
7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ПЕСТИЦИДОВ	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ	124
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ	156

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** Сохранение и повышение плодородия почв является одной из ключевых задач современного земледелия и основой продовольственной безопасности страны. По данным Сычева В.Г. и соавт. (2017, 2022, 2024, 2025), снижение применения минеральных удобрений в России после 1990-х годов привело к существенному нарушению воспроизводства почвенного плодородия. Если в 1980-е годы уровень внесения достигал 200–210 кг д.в./га, то в последующие десятилетия средние дозы сократились более чем в четыре раза, составляя лишь 40–50 кг д.в./га, что не компенсирует вынос питательных элементов урожаем. Для поддержания баланса макроэлементов и стабилизации гумусового состояния необходимо вносить 60–80 кг д.в./га, однако фактическое внесение в большинстве регионов остаётся существенно ниже этих значений. Аналогичные выводы о дегумификации и подкислении почв сделаны в исследованиях Смолина Н.В. (1998), Деминой Т.Н. (2019), Zhang X. et al. (2020), Когута Б.М. и соавт. (2021), Савоськиной И.В. (2021), Ивойлова А.В. (2022), Liu C. et al. (2024).

Серьёзной проблемой остаётся подкисление почв. В России насчитывается более 60 млн га почв, требующих известкования (Шильников И.А. и Лебедева Л.А., 2019). В Центральном регионе отмечается рост доли кислых и сильнокислых почв (Корнейко Н.И., 2013). Длительное применение минеральных удобрений усиливает процесс подкисления почв. На чернозёмах выщелоченных при внесении повышенных доз NPK установлено снижение pH и уменьшение буферной способности почв (Шеуджен А.Х. и др., 2013; Романенко А.А. и др., 2014).

Фитосанитарное состояние посевов остаётся фактором риска: по данным ФАО, ежегодные мировые потери урожая от болезней, вредителей и сорняков составляют до 40 %, а в России сорняки снижают урожайность зерновых на 20–25 % (Бочкарев Д.В., 2015). Установлено, что избыточные дозы азотных удобрений способствуют развитию мучнистой росы и тлей, тогда как фосфорно-калийное

питание повышает устойчивость к ржавчинным грибам и ускоряет созревание (Дёмина Т.Н., 2020).

Таким образом, устойчивое развитие агроэкосистем требует комплексной оценки последствий длительного применения минеральных удобрений и средств защиты растений на свойства почвы, что определяет актуальность настоящего исследования.

**Степень разработанности темы исследований.** Влияние минеральных удобрений на агрохимические свойства почв рассматривалось в многочисленных работах, в которых показано изменение содержания гумуса и элементов питания (Дёмин А.П., 2012; Савоськина И.В., 2018; Сычев В.Г., 2019; Дёмина Т.Н., 2020; Ивойлов А.В., 2022; Лукин С.В., 2023; Чеботарев Н.Т. и Броварова О.В., 2023; Васбиева М.Т. и др., 2024; Зинякова Н.Б. и др., 2024; Кузнецова Т.В., Удальцов С.Н., 2024; Налиухин А.Н. и соавт., 2024; Козлова Н.В. и Керимзаде В.В., 2025; Guasconi D. et al., 2025). Установлены процессы дегумификации при недостаточном возврате органического вещества (Лысенко Н.Н., 2014; Лебедев В.В., 2016; Chen Q. et al., 2024; Napoletano M. et al., 2025). Работы по кислотности чернозёмов выявили снижение буферности почв при длительном внесении азотных удобрений (Шеуджен А.Х., Абрамова Е.В., 2015, Минакова О.А. и др., 2023; Гальцова А.Д. и др., 2024; Zhang L. et al., 2024). Вопросы баланса питательных веществ отражены в трудах Лукина С.В. (2012, 2023), Сычева В.Г. и Шафрана С.А. (2017), Налиухина А.Н. и соавт. (2024), Силаев А.Л. и соавт. (2024).

Исследования фитосанитарного состояния посевов показывают роль уровня минерального питания в развитии болезней и засорённости (Санин С.С., 2005; Бочкарев Д.В., 2015). Отмечается, что повышенные дозы азота усиливают поражаемость мучнистой росой, а фосфор и калий снижают распространённость грибных заболеваний. Сбалансированное применение минеральных удобрений со средствами защиты растений позволяет управлять формированием агробиоценозов и реализацией продуктивного потенциала сельскохозяйственных культур (Захаренко В.А., 2023; Павлюшин В.А. и Постовалов А.А., 2023; Золотаева Р.И. и Максимов В.А., 2025; Ерёмин Д.И. и др., 2025). Оптимизация минерального пита-

ния повышает антагонистическую активность почвенной микробиоты против возбудителей корневых гнилей и фузариоза. Это снижает поражаемость растений корневыми и листостебельными инфекциями, включая фузариоз и альтернариоз. Комплексный подход, объединяющий рациональное питание и фитосанитарный контроль, обеспечивает рост урожайности и повышение экономической рентабельности производства.

Однако большинство исследований носит фрагментарный характер. Недостаточно работ, где комплексно анализируется динамика гумуса, кислотности, подвижных форм NPK, урожайности, фитосанитарного состояния и экономической эффективности в условиях длительных стационарных опытов. Особенно мало сведений о совместном воздействии минеральных удобрений и средств защиты растений на свойства чернозема выщелоченного в условиях юга Нечерноземной зоны РФ.

**Цель работы** – определить степень влияния длительного применения минеральных удобрений и пестицидов на показатели плодородия и урожайность культур в лизиметрическом опыте.

**Задачи исследования:**

- оценить изменения содержания гумуса, кислотности и подвижных форм NPK при длительном внесении удобрений и пестицидов;
- определить урожайность викоовсяной травосмеси и озимой пшеницы и качество получаемой продукции в зависимости от комплексного применения удобрений и пестицидов;
- рассчитать баланс NPK в условиях лизиметрического опыта при длительном применении средств химизации;
- оценить влияние удобрений и средств защиты на фитосанитарное состояние посевов в условиях лизиметрического стационара;
- провести экономическую и биоэнергетическую оценку предложенного комплекса агротехнических приемов.

**Научная новизна.** Впервые в условиях длительного лизиметрического опыта на юге Нечерноземной зоны РФ дана комплексная оценка влияния различ-

ных доз минеральных удобрений и средств защиты растений на агрохимические и биологические свойства выщелоченного чернозёма, урожайность и качество продукции однолетних трав и озимой пшеницы.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о закономерностях трансформации свойств выщелоченного чернозёма при длительном применении средств химизации в лизиметрическом стационарном опыте. Практическая значимость работы состоит в обосновании оптимальных регламентов применения удобрений и комплекса средств защиты растений, направленных на повышение урожайности, сохранение плодородия и обеспечение экологической и экономической устойчивости агропроизводства. Установлено, что систематическое применение повышенных доз удобрений способствует приросту содержания гумуса в пахотном слое до +0,2 % в год, тогда как на неудобренном контроле за 37 лет наблюдений зафиксировано его снижение на 22 %. Одновременно применение высокой дозы удобрений без СЗР привело к прогрессирующему подкислению почвы (снижение pH до 5,2) и ухудшению поглотительной способности – сумма поглощённых оснований уменьшилась до 21,38 ммоль(экв.)/100 г, а степень насыщенности основаниями снизилась до 70 %. В отличие от этого, умеренные дозы удобрений не только стабилизируют содержание легкогидролизуемого азота на оптимальном уровне 78,5–82,3 мг/кг и обеспечивают сбалансированный фосфатный и калийный режим, но и способствуют значительному росту урожайности: викоовсяной смеси – с 14,0 до 20,6 т/га, озимой пшеницы – с 2,74 до 4,18 т/га. На основании полученных данных оптимальной признана система применения удобрений в дозах  $N_{60-90}P_{60-120}K_{40-80}$  в сочетании с СЗР, которая обеспечивает повышение продуктивности культур на 52–83 %, способствует сохранению гумусового состояния почвы и достигает рентабельности 93–108 %, что подтверждает эффективность интегрированного подхода к управлению плодородием в агроценозах.

**Методология и методы исследования.** Исследования проведены в условиях стационарного лизиметрического опыта, заложенного в 1987 г. В стационаре выполнена факторная схема с варьированием доз удобрений и применением

средств защиты растений. Использовались полевые, лабораторные, аналитические методы, учёт урожая, расчёты водного и питательного баланса, статистическая обработка данных.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- особенности изменения агрохимических свойств выщелоченного чернозёма при длительном применении средств химизации;
- характер влияния комплексного применения средств химизации на урожайность и качество однолетних трав и озимой пшеницы;
- показатели баланса основных макроэлементов при регулярном применении пестицидов и удобрений в лизиметрическом опыте;
- особенности фитосанитарного состояния посевов при многолетнем применении пестицидов и удобрений в лизиметрическом стационаре;
- экономическая и биоэнергетическая эффективность применения удобрений и средств защиты растений.

**Степень достоверности результатов исследований.** Достоверность обеспечивается длительным характером проведения стационарного опыта, убедительной статистической обработкой многолетних данных, достаточными повторностями наблюдений и анализов, использованием стандартных методов и согласованностью результатов с литературными источниками.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты исследования были доложены на следующих научных конференциях: Международные научно-практические конференции, посвященные памяти профессора С.А. Лапшина «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Саранск, 2023, 2024, 2025), Всероссийская с международным участием научная конференция «Огаревские чтения» (Саранск, 2024), XIX Международная научно-практическая конференция «Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы» (Пенза, 2024), XII Международная научно-практическая конференция «Защита растений от вредных организмов» (Краснодар, 2025), Научно-практические конференции молодых уче-

ных, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, 2022, 2024, 2025).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 работ: 3 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК, 6 тезисов докладов на российских и международных научных конференциях.

**Личный вклад соискателя.** Личный вклад соискателя заключался в разработке программы исследований для этапа многолетнего опыта, заложенного и проводившегося ранее под руководством профессора Смолина Н.В. Соискателем лично выполнены полевые и лабораторные исследования в период 2021–2024 гг., проведена статистическая обработка как собственных, так и архивных данных многолетнего опыта, их обобщение и формулирование выводов.

# 1 МНОГОЛЕТНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОЦЕНОЗОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

## 1.1 Мировой и отечественный опыт лизиметрического метода исследований в агрохимии

Лизиметрический метод исследований в агрономии является точным способом изучения динамики водного режима почв и процесса миграции биогенных элементов из почвы с помощью специальных приборов, называемых лизиметрами. Термин «лизиметр» происходит от греческих слов «*lysis*» – растворение, разложение и «*metreo*» – измерение. Этот метод позволяет получать точные данные о динамике влаги и питательных веществ в почве и их миграционных процессах, что особенно важно для разработки эффективных агротехнических приемов и управления плодородием почв (Балкизов А.Б. и Сасиков А.С., 2021).

Данная методика получила широкое практическое применение в гидрологии, почвоведении и мелиорации благодаря способности анализировать почвы в естественных условиях, максимально приближенных к полевым. Ключевым ограничением метода является возможность отбора почвенных растворов исключительно при промывном водном режиме и влажности, превышающей предельную полевую влагоемкость (Кузнецова Е.И. и Ларионов М.В., 2016).

Анализ состава и концентрации растворенных компонентов в почвенных флюидах является основополагающим для изучения почвенных режимов, прогнозирования их функционирования и траекторий развития. Данные растворы представляют собой динамичную и реакционноспособную фазу почвы, отражающую сложные взаимодействия между ее составными частями: жидкой, твердой, газообразной и биологической. Состав почвенных флюидов характеризуется цикличностью и обусловлен гидротермическими условиями, биологической активностью, аэрацией и другими почвенными процессами, протекающими в конкретной

среде. В рамках глобального гидрологического цикла определенная доля атмосферных осадков проходит фазу почвенных вод, аккумулируя разнообразные соединения перед их поступлением в грунтовые и подземные водоносные горизонты (Умарова А.Б. и др., 2021).

Почвенный раствор, находящийся в жидком состоянии, и почвенный воздух, представляющий собой газообразную фазу, характеризуются высокой изменчивостью и динамичностью среди компонентов почвы. Эти фазы играют определяющую роль в процессах формирования почвы, а также в обеспечении условий для существования и функционирования растений и почвенных микроорганизмов. В 1936 г. академик В.И. Вернадский охарактеризовал жидкую фазу почвы как «основной элемент механизма биосферы и ее суши» (Кузнецова Е.И. и др., 2010).

Е.И. Шилова (1964, 1972), А.А. Роде (1965), Н.И. Белоусова (1974), И.Н. Скрынникова (1977), И.С. Кауричев и соавт. (1996) и др. исследователи подчеркивают первостепенную роль лизиметрического метода в почвоведении и гидрологии для анализа воздействия водорастворимых органических соединений почвы на процессы мобилизации и трансформации элементов питания растений. Общеизвестно, что водорастворимые вещества присутствуют в корневых выделениях растений и могут высвободиться из гумусовых веществ при переувлажнении почвы (Попов В.В., 2020).

Несмотря на относительную нераспространенность, лизиметрический подход обладает рядом исключительных достоинств. Данная методика позволяет осуществлять мониторинг характеристик почвенного покрова, состава почвенного раствора и физиологических процессов растений в условиях, максимально приближенных к природным, а также прогнозировать влияние антропогенных факторов. Важным преимуществом является возможность получения эмпирических данных в аутентичной почвенно-геохимической среде. Указанный метод представляется особенно ценным для решения двух актуальных задач в сфере современного почвоведения:

1. Детальное изучение механизмов, определяющих протекание почвенных процессов на различных уровнях организации, и анализ динамических изменений

свойств почвы.

2. Исследование процессов трансформации почв под воздействием техногенных факторов.

Вместе с тем, лизиметрический метод характеризуется определенными ограничениями, в частности, отсутствием учета горизонтального движения грунтовых вод, что создает трудности при оценке компонентов водного баланса экосистем (Смирнов А.П., 2005).

В 1967 г. Б.А. Голубев подчеркивал, что лизиметр – это специализированное устройство, предназначенное для исследования процесса фильтрации воды и растворенных в ней веществ сквозь заданный почвенный горизонт, породу или грунт. Исследование проводится в условиях естественного увлажнения атмосферными осадками и при наличии специализированных технических средств. Данное устройство применяется для прецизионного анализа компонентов водного баланса почвы. Данные, полученные с использованием лизиметров, представляют собой уникальный источник информации для характеристики водного режима почв и имеют первостепенное значение для калибровки и валидации математических моделей, имитирующих гидрологические процессы в почве (Гречишников Н.Н. и др., 2023).

Исследования в области лизиметрии значительно развились в 1870 г., когда Лоус, Гилберт и Уоррингтон установили три лизиметра в Ротамстеде (Англия). Они поняли, что для получения точных данных о дренажных водах необходимо использовать естественные почвы, оставив их нетронутыми. Эти лизиметры, в пять раз превышающие предыдущие по площади, позволили изучить скорость просачивания дождевой воды и вымывание питательных веществ.

Первый лизиметр в США был построен Стёртевантом в 1875 г. в виде почвенных блоков. В 1882 г. он установил еще три лизиметра в Женеве, штат Нью-Йорк. Позже Бэбкок и Гофф добавили установки с поддерживаемым уровнем грунтовых вод, чтобы предотвратить быстрое высыхание.

Лоус также отмечал, что структура почвы влияет на движение дренажной воды, что способствует лучшему пониманию взаимосвязи между почвой, геологией и качеством водных ресурсов. С течением времени исследования углуби-

лись, учитывая влияние ландшафта на эти процессы (Goss M.J. et al., 2010).

Первые лизиметрические комплексы в России были созданы П.А. Костычевым в 1893 г. Эти устройства были размещены на Шатиловской сельскохозяйственной опытной станции, представлявшей собой многопрофильный научно-исследовательский центр. Станция в Шатилово располагала разветвленной сетью пунктов для измерения атмосферных осадков, что обеспечивало высокую точность учета поступающей влаги. В состав станции также входил сельскохозяйственный ботанический сад, который служил для проведения различных агрономических и ботанических исследований (Зотиков В.И. и др., 2016).

П.А. Костычев, будучи выдающимся российским почвоведом, использовал лизиметры для изучения водного и питательного режимов почв, что способствовало развитию почвоведения и агрономии в России. Его работы заложили основу для дальнейших исследований в области почвенной гидрологии и экологии, а также для разработки методов рационального использования и охраны почвенных ресурсов (Левин В.И. и Крючков М.М., 2010).

Но популярным в почвоведении и агрохимии лизиметрический метод стал только в двадцатые годы XX века.

В зависимости от конструктивных особенностей, лизиметры подразделяются на бетонные и кирпичные типы. Данные устройства, предназначенные для долгосрочных исследовательских проектов, характеризуются площадью поверхности, варьирующейся в пределах от 1 до 4 квадратных метров. В 1900 г., под руководством В.Р. Вильямса, в Московской сельскохозяйственной академии были установлены бетонные лизиметры. Эти конструкции обеспечивали сбор данных вплоть до 1930-х гг. В 1903 г., согласно проекту П.Ф. Баракова, аналогичные бетонные лизиметры были возведены в Ново-Александрийском институте сельского хозяйства и лесоводства (современные Пулавы, Польша). Лизиметры, разработанные В.Р. Вильямсом, обладали объемом в 4 кубических метра (геометрические размеры  $2 \times 2 \times 1$  м), в то время как лизиметры конструкции П.Ф. Баракова имели объем 1 кубический метр ( $1 \times 1 \times 1$  м). (Смирнов П.М. и Муравин Э.А., 1977).

В конце XIX века были разработаны и появились гравиметрические лизи-

метры, получившие впоследствии наименование «испарители», которые, помимо возможности сбора фильтрата и количественного определения химического состава последнего, позволяли осуществлять мониторинг содержания влаги и проводить исследования водного баланса. К числу пионеров в создании таких устройств относятся М.П. Рыкачев, А.П. Ключев, В.П. Попов и другие исследователи, разработавшие специализированные конструкции лизиметров-испарителей (Лизиметрические исследования в..., 1999).

Помимо этого, с завершения прошлого века интенсификация использования минеральных удобрений обусловила потребность в изучении механизмов абсорбции элементов питания растениями и оценке масштабов потерь удобрений посредством фильтрационных вод. В 1927 г. на конференции американских специалистов в области агрохимии президент М. Интайр акцентировал внимание на значимости лизиметрических исследований в агрохимической практике, подчеркнув распространенное мнение среди американских агрохимиков о том, что наличие лизиметрического оборудования является необходимым условием для полноценного функционирования исследовательской станции (Осипов А.И. и др., 2020).

В.Р. Вильямсом на территории опытного полигона Тимирязевской сельскохозяйственной академии была организована лизиметрическая станция. Главной целью создания данной станции являлось проведение продолжительных исследований, направленных на установление взаимосвязи между уровнем инфильтрации и гранулометрическим составом различных почвенных разновидностей. В задачи станции также входило изучение количественных показателей и химического строения вод, просачивающихся сквозь почвенный профиль (Наумов В.Д., 2014).

В 1908 г., с целью проведения научных исследований на опытном участке сельскохозяйственного института, располагавшегося в Новой Александрии (современные Пулавы, Польша), П.Ф. Бараков применял лизиметрическое оборудование агрохимического профиля (Яшин И.М., 2014). В 1922 г. В.В. Геммерлинг сосредоточил свои научные интересы на исследовании динамики проникновения влаги в лизиметрические устройства для сбора, расположенные на разных уровнях почвенного профиля (Соколова Т.А., 2020).

В области лизиметрических исследований накоплен значительный объем данных. В частности, следует отметить работы, посвященные различным аспектам переноса веществ в почве. Так, Людекс (1907) изучал влияние трещин и пустот на миграцию элементов. Е.И. Шилова (1951) провела анализ качественного состава лизиметрических вод, полученных из целинных и окультуренных почв, выявив различия в их химическом составе. И.С. Кауричев (1960) исследовал процессы миграции веществ по почвенному профилю, установив закономерности их распределения. М.А. Бобрицкая (1963) сосредоточилась на изучении баланса азота в лизиметрических почвах, оценивая поступление, трансформацию и потери этого элемента (Кузнецова Е.И. и др., 2010).

В 1965 г. на факультете почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова были созданы ячеистые (секционные) лизиметры, применяемые в исследовательских целях и сегодня. Данные установки позволяют изучать вариативность гравитационного переноса влаги в почвенном профиле, потенциал миграции поллютантов и биогенов в подземные воды, оценивать интенсивность массопереноса, а также измерять гидрохимические параметры, характеризующие динамику веществ в почвах. По своим функциональным особенностям они наиболее сопоставимы с агрохимическими лизиметрами, но обладают принципиальным отличием: эксперименты с секционными лизиметрами имитируют внесение загрязняющих или питательных элементов на поверхность почвы (Винник М.А. и Большев Н.Н., 1972).

Разнообразие лизиметрических установок обусловлено вариативностью их конструктивных особенностей. Классификация лизиметров осуществляется на основе таких критериев, как глубина почвенного профиля, методика внесения почвенного материала, тип используемого материала при изготовлении, а также специфика конструкции системы сбора фильтрата и ряда других параметров (Ковалева Е.И. и др., 2014).

В лизиметрических установках глубина почвенного профиля, подвергающегося фильтрации воды, может колебаться в широком диапазоне – от 20–25 сантиметров до нескольких метров. Однако, наиболее часто используемые конструкции

лизиметров оптимизированы для работы с почвенным слоем, достигающим одного метра (Елешев Р.Е. и др., 2016).

Актуальной областью применения лизиметрического метода в настоящее время выступает исследование процессов перемещения и аккумуляции агрохимикатов в вертикальном почвенном разрезе (Ralph M. et al., 2020). В связи с этим, начиная с 1990 г., лизиметрические эксперименты были включены в обязательный перечень документов для регистрации мобильных пестицидов в Германии, где применяются почвы с ненарушенной структурой и легким типом гранулометрического состава. В настоящий момент лизиметрические исследования являются неотъемлемой частью экологических оценок воздействия пестицидов на окружающую среду во всех странах Европейского союза и в Российской Федерации (Bergström L., 1990).

В середине двадцатого столетия отечественными исследователями И.С. Кауричевым и Е.М. Ноздруновой были разработаны лизиметрические установки, функционирующие на основе сорбции ионообменными смолами компонентов, присутствующих в почвенных водах. В современных условиях, характеризующихся ростом антропогенной нагрузки и загрязнением почвенного покрова и подземных вод, применение лизиметров в исследованиях миграции химических соединений приобретает особую актуальность (Кузнецова Е.И. и др., 2010).

Этот метод является незаменимым инструментом для изучения сложных взаимодействий между различными компонентами экосистем, что особенно важно в контексте оценки и прогнозирования последствий антропогенной деятельности. Благодаря лизиметрам исследователи могут получить данные, которые трудно или невозможно получить другими методами, что способствует более точному пониманию экологических процессов и разработке эффективных мер по защите окружающей среды (Храмцов И.Ф. и Безвиконный Е.В., 1998).

В последние десятилетия многие страны разработали свои лизиметрические сети, направленные на получение данных о почвенной влаге, потере питательных веществ и процессах испарения. Например, в Словакии созданы несколько лизиметрических станций, которые служат основой для анализа водного баланса и

почвенных процессов в разных условиях землепользования. Исследуются три лизиметрические станции, каждая из которых сосредоточена на специфических аспектах изучения водного баланса и воздействия различных технологий обработки почвы. Станция в Боровце фокусируется на влиянии различных технологий обработки почвы на ее свойства и производительность сельского хозяйства. Исследования показывают потенциальные различия в потере нитратного азота между традиционными, минимизированными и безотвальными системами обработки почвы. Станция в Петровце направлена на изучение гидрологических процессов с упором на динамику испарения воды с поверхности. В Татранской Яворине исследуются изменения водного баланса при восстановлении леса после катастроф, акцент расставлен на быстрорастущие древесные виды (Matusek I. et al., 2017).

Лизиметрические лаборатории в Германии играют важную роль в изучении водного баланса лесных экосистем. В районе Бриц берлинского административного округа Нойкёльн, характерные для региона низкие уровни осадков, выраженные летние засухи и песчаные почвы с низкой водоудерживающей способностью. Использование лизиметров позволяет количественно оценивать влияние различных древесных пород и структуры леса на компоненты водного баланса, такие как испарение и фильтрация, что является важным для разработки эффективных стратегий лесопользования в условиях изменяющегося климата (Muller, J., Volte A., 2009).

Многолетние исследования проводятся на крупномасштабной лизиметрической площадке «Санкт-Арнольд» в Германии с ноября 1965 г. Они направлены на изучение водного баланса на почвах с различным типом растительности: травяным покровом, лиственным (дуб/бук) и хвойным (сосна) лесом. Это ценные сведения о долгосрочных изменениях водного баланса в экосистемах с различными типами растительности, что важно для понимания влияния климатических изменений на гидрологические процессы (Harsch N. et al., 2009).

В США также проводятся продвинутое исследования в области лизиметрии, направленные на создание специализированных лизиметрических установок, которые обеспечивают точное моделирование влияния различных климатических

факторов на водный баланс в экосистемах. Эти системы оснащены усовершенствованными технологиями управления микроклиматом, включая регулируемые температуры, уровни влажности и световые условия, что позволяет имитировать разнообразные климатические сценарии. Такой подход предоставляет уникальную возможность для анализа ключевых процессов, таких как испарение, фильтрация и перераспределение воды в почве под воздействием различных климатических изменений. Благодаря этим исследованиям ученые могут лучше понять, как растения и почвы реагируют на особенности нестабильного климата, что является критически важным для разработки адаптивных стратегий в сельском хозяйстве и охране окружающей среды (Abhiram G. et al., 2023).

Существует совместный немецко-русский исследовательский проект «Кулунда». Проект фокусируется на изучении водного баланса и устойчивости экосистем в сельскохозяйственных районах Кулунды, расположенной в степной зоне Южной Сибири. Инновационные лизиметры служат инструментом мониторинга водного баланса в контексте локальных климатических условий и агротехнологий. Регистрируя динамику осадков, эвапотранспирации и инфильтрации, они предоставляют данные для анализа эффективности мелиоративных стратегий и устойчивости агроландшафтов к климатическим стрессам. Проект «Кулунда» направлен на улучшение практик сельского хозяйства, минимизацию водных потерь и повышение урожайности, что особенно важно для стран с засушливыми регионами (Balykin D. et al., 2016).

В России наиболее значимые многолетние лизиметрические исследования проводятся в Московском государственном университете (МГУ), где с 1961 г. изучаются физические свойства почв с использованием крупных лизиметров. Эти исследования сосредоточены на анализе изменений в плотности, пористости и водоудерживающей способности почвы под различными условиями увлажнения и температуры. Исследовательские группы уделяют внимание изучению воздействия климатических изменений на динамику физических характеристик почв, включая анализ отклика почвенной структуры на температурные колебания и изменение режима осадков. В рамках исследований также рассматривается влияние

различных агротехнических приемов, таких как методы обработки почвы и внесение удобрений, на физико-химические свойства почвы. Особое внимание уделяется изучению экологических последствий модификации свойств почвы для поддержания биоразнообразия и сохранения плодородия. Проводится оценка влияния антропогенных факторов на почвенные процессы и их долгосрочные последствия для экосистем (Шишкин К.В. и др., 2019).

В Российской Федерации, к сожалению, лизиметрические исследования не масштабированы из-за отсутствия унифицированных протоколов и экономических барьеров: необходимость разработки уникальных конструкций и изготовления специализированного оборудования под конкретные задачи (Балкизов А.Б., 2021).

## **1.2 Динамика агрохимических свойств почвы в условиях длительного систематического применения средств химизации**

Физико-химические характеристики почвы оказывают прямое влияние на её агрохимические показатели и биологическую активность, определяя характер преобразования и эффективность применения удобрений. Вносимые удобрения, в свою очередь, инициируют изменения в ряде физико-химических процессов, протекающих в жидкой и твердой фазах почвы. Данные изменения могут проявляться как положительно, так и отрицательно. В частности, внесение минеральных удобрений может приводить к подкислению почвы, уменьшению ёмкости катионного обмена и снижению концентрации обменных катионов кальция и магния. Это обусловлено, с одной стороны, поглощением почвой катионов, входящих в состав удобрений, и подкислением почвенного раствора в результате вытеснения ионов водорода и алюминия из почвенного поглощающего комплекса. С другой стороны, причиной может являться использование физиологически кислых удобрений. Однако негативные последствия применения минеральных удобрений зачастую преувеличиваются. Характер воздействия минеральных удобрений на физико-

химические свойства почвы определяется природно-территориальными особенностями, формой и дозой вносимых удобрений, а также длительностью их использования (Шеуджен А.Х. и др., 2013).

Продолжительное внесение минеральных удобрений в неоптимальных пропорциях или интенсивное земледелие способно вызвать дисбаланс питательных веществ в почвенном растворе и негативно отразиться на агрохимическом состоянии почвы (Кузнецов В.К. и др., 2017). В противоположность этому, многолетнее, последовательное использование удобрений в дозировках, отвечающих потребностям растений, способствует повышению плодородия почвы посредством увеличения содержания гумуса, регулирования кислотности (обменной и гидролитической), формирования положительного баланса питательных элементов и обогащения почвы доступными формами азота, фосфора и калия. Длительное применение удобрений инициирует перестройку калийного фонда почвы, направление которой детерминируется генетическими характеристиками почвы, а масштабы изменений определяются количеством и продолжительностью внесения удобрений. Этот процесс может приводить как к улучшению, так и к ухудшению плодородия в зависимости от соблюдения научно обоснованных норм и соотношений питательных веществ (Парамонов А.В. и Пасько С.В., 2016).

В период с 1926 по 1930 гг, под руководством Д.Н. Прянишникова, А.Н. Лебедянцева и А.П. Левицкого, было выполнено 3808 краткосрочных полевых экспериментов в 317 различных учреждениях. Исследования проводились по унифицированным протоколам и методологиям, с шестикратной повторностью каждого опыта. Данные эксперименты предоставили обширный эмпирический базис для дифференциации территории страны на регионы, характеризующиеся различной отзывчивостью сельскохозяйственных культур на внесение удобрений. В ходе исследований была определена результативность средних и повышенных дозровок удобрений применительно к основным почвенным типам, распространенным на территории СССР. Полученные результаты послужили основанием для разработки стратегического плана развития крупномасштабной химической индустрии, ориентированного на удовлетворение потребностей сельскохозяй-

ственного сектора в минеральных удобрениях (Сычев В.Г. и др., 2016).

Почвам необходимо постоянное пополнение микроэлементами. Из-за эрозии и других факторов их запас ежегодно сокращается, приводя к истощению плодородного слоя. Удобрения восстанавливают эти жизненно важные элементы для роста растений. Основным условием является соблюдение научно рассчитанных норм внесения, так как превышение доз превращает удобрения в источник загрязнения (Илюшина Л.Н., 2018).

Стратегическими приоритетами аграрного сектора являются: сохранение и наращивание почвенного плодородия и получение запланированных урожаев с высокими качественными характеристиками. Достижение этих задач обеспечивается оптимизацией круговорота элементов питания в агросистемах, регулированием потока биогенных веществ в рамках севооборотов и учетом региональных особенностей почв и климата. Долгосрочные полевые эксперименты представляют собой уникальные инструменты для исследования баланса и эффективности усвоения питательных элементов в земледелии, а также для разработки научно обоснованных программ внесения удобрений с целью их рационального использования в сельскохозяйственной практике (Сычев В.Г., 2005).

В период 2013–2020 гг. проводились полевые исследования А.М. Алиевым и соавт. (2022) на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах Центрального Нечерноземья ЦОС ВНИИА. Цель исследований – определение баланса элементов питания при использовании минеральных удобрений. В эксперименте был освоен полевой зернотравяной севооборот с органоминеральной и минеральной системами удобрения, эквивалентными по содержанию NPK. Результаты показали, что комплексное применение средств химизации увеличивает отрицательный баланс азота фосфора и калия из-за повышения выноса из почвы, особенно при использовании минеральных удобрений и средств защиты растений. Наименее отрицательный баланс наблюдался при внесении только одних удобрений. Полученные данные подчеркивают необходимость контроля за плодородием почвы и корректировки доз удобрений.

Проводились многолетние исследования М.М. Саидовым и соавт. (2016) в

области агрохимического мониторинга почв земель сельскохозяйственного назначения за 1966–2015 гг. Основные типы почв в регионе – дерново-подзолистые, серые лесные и черноземы. Ежегодные агрохимические исследования почв в сельскохозяйственных предприятиях Тульской области охватывали от 180 до 200 тыс. га. Ретроспективный анализ данных мониторинга плодородия почв Тульской области за полувековой период выявил пиковые значения средневзвешенных концентраций доступных форм фосфора и калия, а также минимальные показатели кислотности в период с 1991 по 1999 гг. Исторический пик плодородия достигнут благодаря системному внесению удобрений и мелиорации. Современное сокращение агрохимических мероприятий инициировало негативную динамику почвенных показателей. Персистенция дисбаланса между внесением и выносом элементов питания создает предпосылки для устойчивой деградации почв.

Аналогично проводился мониторинг плодородия почв Республики Марий Эл за 1965–2016 гг. учеными В.Р. Габдуллиным и Л.А. Гараевой (2019). В аграрных зонах преобладающим типом являлись дерново-подзолистые почвы. Ежегодно обследовалось 100–120 тыс. га сельхозугодий. Анализируя обеспеченность химическими элементами почв пашни, авторы отметили, что в период с 1966 по 1995 гг. анализ баланса питательных веществ выявил прямую зависимость его интенсивности от объемов внесения удобрений и фактической урожайности сельскохозяйственных культур. Баланс по фосфору, кальцию и магнию стал отрицательным с 1996 г., в связи с тем, что, начиная с 1994 г., объемы фосфоритования почв и внесение удобрений резко сократились. Исходные данные первого цикла агрохимического мониторинга пахотных угодий Республики Марий Эл констатировали преобладание низких уровней почвенного плодородия. Последовательная реализация крупномасштабных агромелиоративных мероприятий (известкование, фосфоритование), сопряженная с применением высоких доз органических и минеральных удобрений, обусловила к периоду 1990–1995 гг. значительное улучшение большинства агрохимических показателей. Наблюдался сдвиг средневзвешенной реакции почвенного раствора в сторону нейтральных значений.

Период резкого сокращения внесения органических и минеральных удобрений, а также прекращения мелиоративных работ в последующие десятилетия инициировал устойчивую деградацию почвенного плодородия. Современное состояние почвенного покрова характеризуется дефицитом гумуса (ниже оптимальных значений), кислотно-основным балансом в диапазоне слабокислых – нейтральных значений (рН 5,5–7,0), повышенной концентрацией подвижных фосфатов, средним содержанием обменного калия (Федоров А.А., 1981).

Сформировавшийся остродефицитный баланс основных элементов питания в агроценозах региона представляет существенную угрозу стабильности и перспективам развития сельскохозяйственного производства. Устранение данного негативного тренда возможно исключительно через реализацию комплексной стратегии, направленной на восстановление и устойчивое повышение плодородия почвенного покрова (Швыркин С.Н., 2006).

Результаты многолетнего мониторинга агрохимических показателей выщелоченного чернозема в условиях восьмипольного зернопропашного севооборота (50 % озимой пшеницы), проводимого на экспериментальных полях Опытной станции Ставропольского ГАУ в течение 45-летнего периода, демонстрируют следующую динамику. Систематическая аппликация минеральных и органических удобрений позволила проследить эволюцию ключевых параметров почвенного плодородия. Установлена устойчивая тенденция к снижению содержания гумуса: от исходных 6,37 % до 5,31 % в контрольном (неудобряемом) варианте. На фоне регулярного внесения минеральных удобрений (115–160 кг/га д.в. NP) в сочетании с органическими (5–8 т/га) дегумификация была менее выраженной, составив 5,64 %. Кислотно-основные свойства почвы за 37 лет наблюдений претерпели несущественные изменения, сместившись в сторону слабого подкисления, оставаясь в пределах 6,0–6,1 ед. рН, аналогично контролю.

Примечательным результатом является динамика содержания подвижных фосфатов. Реализация расчетной системы удобрения на протяжении четырех полных ротаций севооборота обеспечила стратегическое накопление фосфора: от исходных 24,0 мг/кг до 31,9 мг/кг. В отличие от удобряемых участков, в контрольном

варианте наблюдалось снижение доступного фосфора до уровня 17,5 мг/кг к завершению четвертой ротации.

Концентрация подвижного калия в варианте с применением удобрений демонстрировала стабильность (в среднем 265 мг/кг) с кратковременными повышениями до 280 мг/кг. Параллельно в контроле зафиксировано существенное снижение калийного фонда – с 260 до 221 мг/кг (Сычев В.Г., 2021).

Динамику элементов питания растений и гумуса при минеральной системе удобрений  $(NP)_{30...90}K_{20...30}$  на трех подтипах черноземов Республики Башкортостан: выщелоченном (южная лесостепь), типичном (предуральская степь) и обыкновенном (зауральская степная зона) исследовали Н.А. Серeda с соавт. (2009). Они пришли к выводу, что действие минеральных удобрений на гумус зависело от условий и доз. При минеральной системе дегумификация черноземов снижалась, отрицательное влияние больших доз удобрений на минерализацию компенсировалось новообразованным гумусом при увеличении урожайности. Анализ трансформации питательных элементов в различных подтипах чернозема выявил устойчивую отрицательную динамику запасов минеральных форм азота, подвижных фосфатов и обменного калия в условиях абсолютного отсутствия удобрений (контроль). Величина снижения минерального азота за вегетационный период при естественном плодородии существенно варьировала в зависимости от подтипа почвы: 2,4 мг/кг (выщелоченный), 4,5 мг/кг (типичный), 1,2 мг/кг (обыкновенный). Напротив, применение азотных удобрений продемонстрировало высокую эффективность в поддержании азотного фонда. Наибольший положительный отклик наблюдался в типичном черноземе, где концентрация доступного азота достигала 209 кг/га, существенно превышая уровень неудобряемого фона. Внесение 60 кг/га  $P_2O_5$  увеличило подвижный фосфор на 34 мг/кг (выщелоченный), 27 мг/кг (типичный), 14 мг/кг (обыкновенный). Содержание обменного калия без удобрений снижалось (4,2 мг/кг в год – выщелоченный, 4,5 мг/кг – типичный, 2,8 мг/кг – обыкновенный). Поддерживающие дозы калийных удобрений улучшали калийное состояние, но баланс оставался отрицательным. Повышенные дозы калийных удобрений (45 кг/га) увеличивали содержание калия на 34 мг/кг. Влияние дли-

тельного внесения средств химизации на урожайность полевых культур. Расширенное воспроизводство элементов питания наблюдалось при средних и повышенных дозах удобрений.

П.А. Чекмарев с соавт. (2016) изучили состояние и изменение агрохимических характеристик, определяющих плодородие сельскохозяйственных почв Брянской области. Агрохимическая оценка почв сельхозугодий, выполненная в 2015 г., показала, что средний уровень органического вещества (гумуса) в пахотных почвах области равен 2,06 %. Отмечается стабильное сокращение содержания гумуса в почвах региона, начиная с периода 1991–1995 гг., когда был зафиксирован пиковый показатель в 2,16 % (достигнутый благодаря активному внесению мелиорантов, минеральных и органических удобрений). Затем наблюдалось снижение. Данный процесс происходит при дефиците основных минеральных элементов питания в земледелии области. В 2015 г. дефицит фосфора составил 13,3 кг/га, калия – 46,7 кг/га. В подобных условиях возрастает необходимость применения минеральных удобрений в научно обоснованных количествах. П.В. Прудников (2007) отмечал, что существенный резерв для рационального использования минеральных удобрений без ущерба для их эффективности – это их раздельное внесение, основанное на анализе почвы и растений, а также прикорневое (локальное) внесение, позволяющее увеличить коэффициент усвоения питательных элементов из азотных и калийных удобрений на 10–15 %, а из фосфорных – на 5–10 %.

А.С. Карашаева и соавт. (2023) исследовали влияние комплексного применения удобрений и химических защитных средств на продуктивность культурных растений на дерново-подзолистой почве Центрального Нечерноземья. Опыт начался с 1959–1961 гг. на Центральной опытной станции в Московской области. По результатам девяти ротаций полевого севооборота, содержание гумуса возросло (1960 г. – 1,58 %): на контроле (без удобрений) – до 1,66 %, а при минеральной системе с защитными средствами – до 1,73 %. Вынос азота различался: на контроле – 406 кг/га, при применении минерального удобрения и защитных средств – 752 кг/га. Несмотря на снижение выноса сорными растениями (83 кг/га на кон-

троле и 58 кг/га с удобрениями), интенсивность баланса азота уменьшилась с 90 % до 78 %. С фосфором ситуация аналогична, но его вынос был меньше. Варианты с фосфорными удобрениями показали увеличение выноса до 284 кг/га при использовании защитных средств (контроль 181 кг/га). Вынос калия был значительным: с удобрениями – 106 кг/га, с химзащитой – 136–146 кг/га, то есть на 28–38 % больше. Сорные растения потребляли меньше азота, но больше фосфора и калия, и при использовании защитных средств вынос сорняками питательных веществ уменьшился в 4 раза.

Влияние пролонгированного применения минеральных удобрений на трансформацию почвенных свойств является значимым направлением в международной агрохимии. Классическим примером служат результаты векового мониторинга в рамках стационарного опыта Rothamsted Research (Великобритания), где систематическая аппликация азотных удобрений (преимущественно в аммонийной и нитратной формах) на протяжении 150 лет привело к снижению рН почвы на 1–1,5 единицы и увеличению содержания подвижного алюминия на 30–40 % (Johnston A.E., Poulton P.R., 2009).

Аналогичные исследования в США, в Morrow Plots (Университет Иллинойса), продемонстрировали, что внесение NPK удобрений в течение более 100 лет увеличило содержание общего фосфора в пахотном слое на 50–70 %, но при этом уменьшило содержание органического углерода на 10–20 % (Khan S.A. et al., 2007).

Французские ученые С.З. Саттари и соавт. (2012) установили, что длительное внесение фосфорных удобрений может привести к насыщению почвы фосфором, увеличивая риск его потерь с поверхностным стоком на 20–30 %. Эти изменения, в свою очередь, влияют на структуру почвы, биологическую активность и, в конечном итоге, на урожайность сельскохозяйственных культур.

Исследования, проведенные в Австралии, подчеркивают, что систематическое использование суперфосфата на пастбищах в течение нескольких десятилетий может привести к накоплению кадмия в почве, что представляет потенциальную опасность для здоровья животных и человека (McLaughlin M.J. et al., 1999).

Более того, долгосрочные эксперименты в Германии выявили, что чрезмер-

ное внесение азотных удобрений способствует денитрификации, приводящей к выбросам  $N_2O$ , мощного парникового газа в атмосферу (Butterbach-Bahl K., Dannenmann M., 2011). Данные изменения в химическом составе почвы могут нарушить баланс микроорганизмов, снижая биоразнообразие и устойчивость почвы к патогенам.

Влияние долгосрочного применения различных минеральных удобрений на химические свойства почвы, включая качество гумуса, доступность питательных веществ и реакцию почвы проводилось на основе данных долгосрочного полевого эксперимента в Праге-Рузине (Чешская Республика), который длится уже более 60 лет. Долгосрочное применение минеральных удобрений привело к снижению содержания органического углерода и гуминовых веществ в почве, что связано с ускоренной минерализацией гумуса, также привело к снижению рН почвы, что способствовало её закислению. Был сделан вывод, что долгосрочное применение минеральных удобрений без органического вклада может ускорить минерализацию гумуса и деградацию почвы, что приведет к снижению её качества и урожайности (Menšík L. et al., 2018).

Эксперимент по изучению влияния различных методов удобрения на качество почвы в долгосрочном (около 50 лет) полевым опыте проводился с 1966 г. на опытной станции Университета Болоньи в долине реки По (Италия). По результатам С. ГиакOMETTI и др. (2021), минеральное удобрение повысило содержание питательных веществ, но в меньшей степени, чем органическое. Обработка удобрениями значительно повлияла на специфическую ферментативную активность почвы. Было показано, что долгосрочное применение азотных удобрений может стимулировать минерализацию углерода, что приводит к истощению органического вещества. По мнению Р.П. Дик (1992): «использование неорганических удобрений может увеличить производство растительной биомассы, что, в свою очередь, может повысить количество остатков, возвращаемых в почву, с положительным влиянием на биологическую активность почвы».

### **1.3 Влияние длительного внесения средств химизации на урожайность и качество продукции растениеводства**

Термин «химизация», введенный в 1924 г., обозначает одно из главных направлений научно-технического прогресса. Химизация представляет собой внедрение методов химической технологии и продукции химической промышленности в производство для интенсификации и повышения его эффективности. Ведущим компонентом интенсификации сельскохозяйственного производства выступает системное применение агрохимикатов, включающее минеральные удобрения, пестициды и почвенные мелиоранты. Данная стратегия позволяет обеспечить существенное повышение производственной эффективности, оптимизацию материально-энергетических затрат, улучшение качественных характеристик и продление сроков сохранности сельскохозяйственной продукции (Жерештиев А.А., Ордашева З.В., 2018).

Интегрированное использование систем удобрения совместно с другими агротехнологическими факторами в рамках севооборота оказывает комплексное модифицирующее воздействие на ключевые аспекты агроэкосистемы: фитосанитарный статус агроценозов; продукционный потенциал возделываемых культур; динамику потребления элементов минерального питания доминирующими культурными растениями и сорно-полевыми компонентами фитоценоза. Следствием указанных процессов является существенная реконфигурация баланса биогенных элементов в почве. Подчеркнем, что закономерности данных взаимовлияний в специфических почвенно-климатических условиях Центрального региона Нечерноземной зоны остаются недостаточно исследованными, что обуславливает их высокую актуальность, как в теоретическом, так и прикладном аспектах (Алиев А.М. и др., 2022).

Рациональное применение минеральных удобрений открывает новые перспективы для российского земледелия. Для их эффективного использования необходимо регулярно анализировать почву и проводить опыты для определения оптимальных доз. Избыточное внесение удобрений может привести к ухудшению качества продукции, загрязнению окружающей среды и подкислению почвы. По

данным агрометеорологии России, потепление климата может сначала повысить урожайность зерновых, но в дальнейшем приведет к засухам и увеличению численности вредителей. Даже для средней полосы, при определенных климатических условиях возможно размножение некоторых насекомых несколько поколений за сезон.

При защите сельскохозяйственных культур от насекомых-вредителей используют комплекс мероприятий, включая применение органических и минеральных удобрений. Удобрения способствуют развитию более мощных и выносливых растений, что помогает снизить вредоносность насекомых за счет несовпадения фаз их развития с фенологией растений. Если удобрения не решают проблему, применяют инсектициды, однако это может снизить качество продукции и увеличить ее стоимость. Избыток удобрений также нарушает трансформацию органического вещества, приводя к увеличению микроскопических грибов и риску образования микотоксинов в почве, что может негативно сказаться на продуктах питания (Голованова Т.Н., 2016).

Фундаментальные основы теории минерального питания растений были заложены трудами К.А. Тимирязева в 1870–1890-е гг., а позднее развиты Д.А. Сабининым в 1930-е г. Проведенные ими комплексные лабораторно-полевые исследования в разнообразных почвенно-климатических зонах на широком спектре сельскохозяйственных культур позволили сформулировать концепцию минерального питания как значимого фактора регуляции физиологических процессов у растений. В фокусе научного поиска находились закономерности ионного поглощения корневой системой, дальнего транспорта ассимилятов в ассимиляционные органы и взаимосвязи этих процессов с фотосинтетической активностью, дыхательным метаболизмом, транспирационной эффективностью и биохимией клеточного обмена, детерминированными онтогенетической динамикой растительного организма (Сабинин Д.А., 1971).

Кардинальная трансформация экономических условий функционирования аграрного сектора после распада СССР привела к радикальному сокращению государственного финансирования программ внесения научно обоснованных доз ми-

неральных удобрений. Следствием данной политики стало значительное снижение продуктивности пахотных угодий и формирование выраженного дефицита важнейших микроэлементов в почвенном профиле (снижение на порядок). Динамика применения минеральных удобрений характеризуется глубоким регрессом: с 112 кг д.в./га в 1990 г., до 25 кг д.в./га в последующие годы. Несмотря на незначительный рост до 38 кг д.в./га за последующие тринадцать лет, данный уровень остается критически недостаточным, существенно ниже величины биологического выноса элементов питания формируемым урожаем. Парадоксальным аспектом является наблюдаемый тренд повышения урожайности зерновых и зернобобовых культур (с 1,32 до 2,39–2,62 т/га) на фоне сокращения объемов применяемых минеральных и органических удобрений. Основным объяснением данного феномена служит процесс рационализации землепользования, заключающийся в выводе из интенсивного оборота низкопродуктивных слабокультуренных почв, экономическая эффективность возделывания на которых являлась отрицательной. Концентрация производства на высокопродуктивных землях позволила компенсировать негативное влияние снижения химизации (Осипов А.И., 2012, 2020).

Результаты полевых исследований Ш.И. Ахметова и соавт. (2006), проведенные в Республике Мордовия, выявили существенное влияние агрохимикатов на продуктивность однолетних трав на выщелоченном черноземе. По результатам, повышенные дозы минеральных удобрений снизили техногенное воздействие на урожайность трав на 25 %. Максимальное действие средств защиты достигалось при умеренном питании ( $NPK_{60}$ ), обеспечивая прибавку 9–14 %. Интенсификация минерального питания частично нивелировала негативные эффекты почвенного уплотнения.

Эмпирические данные трехлетнего полевого стационара (2006–2008 гг.) на экспериментальных площадях Вологодской ГМХА им. Н.В. Верещагина (Чухина О.В. и др., 2011) демонстрируют существенную интенсификацию продуктивности викоовсяной смеси под влиянием минеральных удобрений. Установлено, что агрохимическая мелиорация обеспечила прибавку урожая зеленой массы в диапазоне 3,3–11,9 т/га относительно неудобренного варианта. Максимальная

урожайность (33,2 т/га) достигнута при реализации расчетной системы удобрений с эквивалентом  $N_{110}P_{35}K_{85}$ , что подтверждает критическую роль сбалансированной азотно-фосфорно-калийной аппликации в раскрытии фитопотенциала агроценоза.

Исследованиями А.М. Алиева и соавт. (2009) показано, что в условиях многолетнего опыта на дерново-подзолистой почве тяжелосуглинистого состава ЦОС ВНИИА в 2009 г. урожайность сена викоовсяной смеси значительно увеличилась. Так, авторами был установлен прирост урожая сена викоовсяной смеси на фоне применения минеральных удобрений ( $N_{120}P_{60}K_{180}$ ) и химических средств защиты растений (ХСЗР) в 44 %. Он составил 13,9 т/га по сравнению с контролем (без применения удобрений и ХСЗР) – 7,8 т/га. Авторы отметили, что использование удобрений и ХСЗР позволили снизить негативное воздействие на плодородие почвы, положительно повлиять на развитие растений викоовсяной смеси и добиться таких результатов урожайности при проведении исследования.

В 2007–2010 гг. О.В. Чухиной и Ю.П. Жуковым (2013) проводились полевые исследования на опытном поле ВГМХА им Н. В. Верещагина с целью изучения продуктивности культур севооборота, в том числе викоовсяной смеси при применении минеральных удобрений. Почвой опытного участка являлась дерново-подзолистая среднесуглинистого состава. В опыте исследовали 5 вариантов – первый (контроль), второй (припосевное удобрение), третий и четвертый (минеральные удобрения, отличающиеся балансовым коэффициентом использования азота), пятый (органоминеральная система удобрений). Эмпирически обоснованная эффективность расчетных систем удобрения проявилась в достижении урожайности викоовсяного агроценоза на уровне 28,9 т/га зеленой массы, что соответствует 115 % прогнозного производственного норматива.

Многолетние исследования А.Н. Воронина (2017) в области действия различных агроприемов на урожайность викоовсяной смеси и засоренность дерново-подзолистой почвы показали, что использование соломы с комплексом минеральных удобрений обеспечило прирост урожая викоовсяной смеси. Анализ результатов исследования показывает, что при использовании соломы + NPK + ХСЗР урожайность зеленой массы викоовсяной смеси составляет 35,387 т/га по сравне-

нию с контролем (без удобрений и ХСЗР) – 32,848 т/га. Разница в урожайности составляет 7,2 %. Таким образом, комплексная защита растений викоовсяной смеси и применение минеральных удобрений способствует значительному повышению урожайности зеленой массы, а также снижает численность сорных растений в посевах викоовсяной смеси.

Исследованиями Ю.П. Жукова и соавт. (2015) в 2010–2012 гг. в условиях Волгоградской области в продолжительном полевом опыте, заложенном в 1990 г., установлено, что при использовании разных доз удобрений урожайность зеленой массы викоовсяной смеси имела значительную тенденцию к увеличению. Метаанализ экспериментальных данных выявил дозозависимую корреляцию между уровнем минерального питания и продуктивностью викоовсяного агроценоза. Установлено, что субоптимальные дозы удобрений индуцировали статистически значимый прирост биомассы (1,19–3,89 т/га), составлявший в среднем за трехлетний цикл 18 % относительно контрольных показателей. Среднесезонная прибавка урожайности варьировала в диапазоне 36–46 % в зависимости от интенсивности агрохимического воздействия.

Исследования, проведенные в Республике Мордовия А.А. Артемьевым (2012), показали, что посевы озимой пшеницы без удобрений демонстрировали урожайность от 1,8 до 4,1 т/га, с азотом в качестве критически важного элемента. В 2006 г. на участках с дифференцированным удобрением суданская трава дала на 4 % больше урожая по сравнению с традиционной технологией и на 31 % по сравнению с контролем. В 2009 г. озимая пшеница сорта Московская 39 показала максимальную продуктивность (3,47 т/га) при дифференцированном применении удобрений, с прибавкой 0,83 т/га по сравнению с контролем.

В 2018–2020 гг. Артемьевым А.А. и соавт. (2021) на опытном поле Мордовского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока было изучено действие удобрений и срока сева на урожайность однолетних травосмесей. По удобрениям наилучший эффект по всем изучаемым смесям и срокам сева наблюдался при внесении под предпосевную обработку почвы  $N_{16}P_{16}K_{16}$  и подкормки в дозе  $N_{60}$ , наименьшие показатели отмечены в контроле. Использование минеральных удоб-

рений стимулирует статистически значимое увеличение выхода зеленой массы при культивировании кормовых смесей. Однако, с точки зрения экономики, дополнительный урожай не компенсирует финансовые издержки, связанные с покупкой и применением этих удобрений.

А.М. Безрукова и О.В. Рахимова (2021) при изучении продуктивности викоовсяной смеси при внесении различных доз азотных удобрений доказали, что внесение максимальной дозы азотных удобрений (90 кг д.в./га) значительно увеличивало урожай: надземная биомасса злаков (овёс) достигала 9,41 т/га, а урожайность зерна викоовсяной смеси составляет 2,69 т/га. В этом варианте овес демонстрирует наивысший результат – 1,72 т/га, хотя урожайность зерна яровой вики остаётся наименьшей – 0,97 т/га.

Исследования А.М. Алиева с соавт. (2020) подтвердили эффективность интегрированной химизации, как инструмента синхронизации высокой продуктивности зерновых культур и улучшения качественных параметров зерна. Применение исключительно химических средств защиты (контроль) обеспечило урожайность стандартного зерна: озимой пшеницы – 3,7 т/га, ячменя – 3 т/га, яровой пшеницы – 1,6 т/га. Интегрированная система (удобрения + СЗР) индуцировала значимый прирост: 2,16, 2,42 и 1,27 т/га, соответственно, что эквивалентно повышению продуктивности на 58,4–80,7 %.

Многолетний мониторинг агротехнологических решений проведен А.К. Личко с соавт. (2011) на базе Центральной опытной станции ВНИИА (Барыбино, Московская обл.) в 2001–2010 гг. Результаты учета показали, что внесение азота (90 и 135 кг д.в./га) увеличивало пораженность болезнями озимой пшеницы. Обработка пестицидами значительно улучшила фитосанитарное состояние: пораженность септориозом снизилась на 74–78 %, фузариозом – на 71–100 %, корневыми гнилями – на 67–100 %. При комплексном применении азотных удобрений и ХСЗР на фоне  $P_{60}K_{120}$  урожайность может достигать 5,0–6,0 т/га в экстремальных условиях и 7,5–8,5 т/га в благоприятные годы. Химические средства защиты повысили эффективность азотного удобрения в 1,5–2,1 раза, особенно в интегрированной системе защиты.

С.М. Васильев и соавт. (2020) установили, что прибавка урожайности озимой пшеницы от внесения минеральных удобрений составила 6,2 и 6,7 т/га, что на 1,2 и 1,5 т/га превысило значения в сравнении с рекомендованным зональными системами земледелия.

Исследователи В.И. Мазалов и соавт. (2019) доказали, что критическая роль азотного питания в онтогенезе озимой пшеницы подтверждена физиолого-агрохимическими закономерностями: оптимальная обеспеченность нитратами интенсифицирует биосинтез фитомассы, стимулирует осеннее кущение и формирование продуктивного стеблестоя. Научно обоснованная дозировка азотных удобрений выступает определяющим условием синхронного достижения максимальной продуктивности и высоких технологических параметров зерна.

Анализ полувековой динамики продуктивности озимой пшеницы Е. Кунцова и М. Хеджман (2009) верифицирован в условиях систематической агрохимической мелиорации на черноземных почвах Чешской Республики. В первые 10 лет эксперимента урожайность варьировалась от 3,4 до 3,8 т/га для всех обработок. В последние 10 лет урожайность значительно выросла с контроля (без удобрений) 4,2 т/га, до 6,6 т/га на варианте с максимальным внесением удобрений ( $N_{121}P_{68}K_{102}$ ).

Согласно данным С. Hitaj, Е. Smith, R. Code и др. (2020), применение комбинированных схем защиты, включающих обработку семян и вегетационные опрыскивания, увеличивает урожайность озимой пшеницы на 15–25 % по сравнению с контрольными участками. Также отмечается, что оптимальный выбор и дозировка СЗР, основанные на мониторинге фитосанитарной обстановки, являются основными факторами достижения максимальной урожайности (Giraud F. et al., 2011).

Синтез многолетних агрохимических исследований подтверждает критическую зависимость продуктивности современных агроценозов от сбалансированности минерального питания.

Анализ литературных научных источников показал на неоднозначный характер поднятой проблемы в изучении динамики питательных веществ и их ми-

грации с инфильтрационными водами за активный корнеобитаемый слой выщелоченного чернозема тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Исследования, проведенные на базе лизиметрического долгосрочного стационара, позволят понять механизмы трансформации внесенных с минеральными удобрениями питательных веществ с гравитационным потоком, установить его периодичность и интенсивность и разработать рекомендации по рациональному применению средств химизации под культуры зернотравяного звена севооборота.

## 2 УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе исследуются изменения химических свойств почвы в результате длительного применения минеральных удобрений и средств защиты растений. За основу берется лизиметрический опыт, который позволяет точно оценить влияние агрохимических факторов на почвенные характеристики. Методика исследования включает отбор образцов почвы на разных глубинах, анализ содержания питательных элементов, кислотности, органического вещества. Расчет выноса питательных элементов растениями, интенсивность миграционных процессов питательных веществ за корнеобитаемый слой почвы позволили выявить закономерности изменения свойств почвы и установить интенсивность инфильтрационных потоков, что имеет особое значение для оптимизации агрономических практик и повышения устойчивости экосистем к внешним воздействиям.

### 2.1 Схема и методика проведения исследований

Исследование проводилось на действующей с 1987 г. лизиметрической лаборатории Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва. Лаборатория состоит из 18 лизиметров, выполненных из железобетона. Гидроизоляция лизиметров осуществляется с внешней стороны с помощью битума, а с внутренней – с применением эпоксидной смолы. Полезная площадь каждого лизиметра составляет 4 м<sup>2</sup> (размеры 2×2 м), а глубина – 1 м.

Объем лизиметра, равный 4 м<sup>3</sup>, обеспечивает близость закладываемой в него почвы к естественному состоянию. В конусообразном дне лизиметров установлены воронки из нержавеющей стали, которые соединены с резервуарами для сбора лизиметрической воды. Лизиметры имеют насыпной тип.

В опыте освоен зернопропашной севооборот.

**Объект научного исследования:** полевые культуры (однолетние травы и

озимая пшеница), а также выщелоченный чернозем, засыпанный обратным сложением в полевой лизиметрической лаборатории.

**Предмет научного исследования:** отдельные агротехнические приемы (дозы внесения минеральных удобрений и комплексное применение средств защиты) выращивания однолетних трав и озимой пшеницы и степень влияния на их качественные показатели.

**Схема опыта** включала два фактора: систематическое внесение минеральных удобрений и применение средств защиты растений в зернопропашном севообороте, где фактор А – уровень минерального питания: 1) без удобрений (контроль), 2) умеренный ( $N_{59}P_{64}K_{55}^*$ ), 3) высокий ( $N_{118}P_{128}K_{110}^*$ ); фактор В – средства защиты растений: 1) вариант без средств защиты (далее – контроль), 2) комплекс химических средств защиты (далее – СЗР).

\*Указана средняя многолетняя доза удобрений за 37 лет.

На время закладки опыта были использованы рекомендованные дозы минеральных удобрений агрохимической службой Республики Мордовия (Клочков А.М., 1978; Егорашева Н.С. и др., 1981; Бычков К.С. и Шукаев Н.Г., 1987).

В исследованиях применялись минеральные удобрения: азофоска, аммиачная селитра, двойной суперфосфат. В условиях лизиметрического опыта все удобрения вносились вручную: под озимую пшеницу – в фазу кущения, под однолетние травы – в фазу начала ветвления. Выбор простых удобрений обусловлен возможностью точного дозирования и комбинирования элементов питания в соответствии со схемой опыта.

Каждый вариант в трехкратной повторности. Всего 18 лизиметров.

Для изучения первого фактора минерального питания в рамках исследования были собраны данные о дозах удобрений, применяемых за 37 лет в период с 1987 по 2024 гг. Эти данные позволяют оценить динамику использования удобрений и их влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур. В Приложении 1 представлены дозы удобрений, вносимые в почву лизиметрической лаборатории.

Вторым фактором, подвергнутым исследованию, стало комплексное ис-

пользование химических средств защиты растений (Таблица 1). Данный комплекс включал в себя применение гербицидов, фунгицидов и инсектицидов, что зависело от конкретной культуры и ее фитосанитарного состояния, с целью получения максимального агрономического эффекта при использовании соответствующих препаратов.

Доза применяемого вещества корректировалась с учетом почвенных условий и фазы развития растений. В составе комплекса защитных мероприятий применялись гербициды, инсектициды, фунгициды и ретарданты, в зависимости от целесообразности с учетом порогов вредоносности и биологии культур. Обработка производилась ранцевым опрыскивателем.

Таблица 1 – Схема пестицидных обработок в лизиметрическом опыте по годам

Год опыта	Культура	Препарат, доза				
		Гербицид	Инсектицид	Фунгицид	Ретардант	Регулятор роста
1992	Озимая пшеница	Диален Супер 0,6 л/га	Метафос 10 мл/10 л	Байлетон 0,5 кг/га + Тилт 0,5 л/га	–	–
1999	Озимая пшеница	Диален Супер 0,6 л/га	Метафос 10 мл/10 л	Тилт 0,5 л/га	Антивылегалч 1,8 л/га	–
2006	Озимая пшеница	Диален Супер 0,6 л/га	БИ-58 новый 1,0 л/га	Тилт 0,5 л/га	Антивылегалч 1,8 л/га	Альбит 30 г/га
2008	Однолетние травы	–	Децис Эксперт 0,075 л/га	–	–	–
2009	Озимая пшеница	Диален Супер 0,6 л/га	БИ-58 новый 1,0 л/га	Фалькон 0,6 л/га	Це-Це-Це 460 1,5 л/га	–
2016	Однолетние травы	–	Борей 0,08 л/га	–	–	–
2023	Однолетние травы	–	Борей Нео 0,15 л/га	Колосаль Про 0,4 л/га	–	Силк 0,05 л/га
2024	Озимая пшеница	Балерина 0,6 л/га + Мортира 0,15 л/га	Борей Нео 0,15 л/га	Балий 0,8 л/га + Ракурс 0,2 л/га	–	–

Применяемые пестициды обеспечивали широкую и интенсивную защиту сельскохозяйственных культур, целенаправленно воздействуя на преобладающие

виды вредных организмов, характерные для данной местности. Гербицидная обработка проводилась в соответствии с общепринятыми стандартами для борьбы с однолетними и многолетними двудольными сорняками. Фунгициды обеспечивали защиту растений от распространенных грибковых заболеваний, таких как мучнистая роса (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. tritici Marchal.), септориоз (*Septoria tritici Mycosphaerella graminicola* (Fuckel) J. Schroet.) и бурая ржавчина (*Puccinia graminis Puccinia recondita* Rob. ex Desm f. sp. tritici). Инсектицидное воздействие отличалось пролонгированным защитным эффектом и было направлено против ключевых вредителей зерновых культур, включая пшеничного трипса (*Haplothrips tritici* Kurd.), злаковых тлей (*Sitobion avenae* F.) и клопов-черепашек (*Eurygaster integriceps* Put.).

Основным методом исследования выступал лизиметрический метод. В дополнение к нему использовались количественно-весовые, лабораторные и статистические методы.

Отбор почвенных проб для учета изменений агрохимических показателей почвы под воздействием длительного применения средств отбиралась из слоев почвы 0–20, 21–40, 41–60, 61–80, 81–100 см.

Все анализы выполнялись в межкафедральной лаборатории Аграрного института в соответствии с действующими ГОСТами и методическими рекомендациями. Пробы почвы отбирались послойно методом конверта на каждом варианте опыта с последующим объединением в общую пробу. Почву высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и просеивали через сито диаметром 1 мм.

Определение гумуса проводилось по методу Тюрина в модификации ЦИНАО с пересчетом на коэффициент 1,724 (ГОСТ 26213–91).

Обменная кислотность (pH KCl) определялась по ГОСТ 26483–85. Гидролитическая кислотность (Hr) определялась по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212–91). Сумма поглощенных оснований (S) определялась по ГОСТ 17.4.4.01–84. Степень насыщенности основаниями (V, %) рассчитывали по формуле:

$$V = (S / (S + Hr)) * 100 \% \quad (1),$$

где S – сумма поглощенных оснований; Hr – гидролитическая кислотность.

Легкогидролизуемый азот ( $N_{л.г.}$ ) определялся по методу Корнфилда (ГОСТ 26715–87). Подвижный фосфор ( $P_2O_5$ ) по методу Кирсанова в модификации ЦИ-НАО (ГОСТ 54650–2011). Обменный калий ( $K_2O$ ) по методу Масловой (ГОСТ 26204–91).

Вариабельность показателей между повторностями обусловлена микрозональными различиями плодородия почвы и природной гетерогенностью растительного материала.

Технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур в лизиметрах осуществлялись вручную. В период с августа по сентябрь, в зависимости от предшествующей культуры, вносились минеральные удобрения в полной норме. После этого почва в лизиметрах перекапывалась на глубину 22 см с помощью лопаты. Весной проводилось боронование с использованием граблей.

Для посева в каждом лизиметре нарезались бороздки глубиной 5 см, после чего рассчитывалось необходимое количество семян для каждой бороздки с учетом его посевной годности. После посева семена заделывались и аккуратно при-таптывались для достижения эффекта прикатывания. Посев викоовсяной смеси осуществлялся рядовым способом с шириной междурядий 15 см при норме высева овса 80 кг/га и вики яровой 120 кг/га. Уборку травосмеси проводили вручную в фазу цветения вики. Учёт урожая выполняли по массе скошенной зелёной массы с приведением показателей к стандартной влажности.

Использованные сорта культур: вика яровая – Льговская 28, овес – Горизонт, озимая пшеница – «Мироновская 808» (1992 и 1999 г.) и «Московская 39» (2006, 2009, 2024 гг.).

Для оценки урожайности озимой пшеницы применялся метод пробных снопов. Отбор проводили по диагонали каждого лизиметра с помощью рамки размером 50×50 см (0,25 м<sup>2</sup>) в четырёхкратной повторности в фазу полной спелости. Растения выкапывали с корневой системой и формировали снопы. При их анализе определяли количество продуктивных стеблей (с колосом), массу зерна со снопа. Дополнительно подсчитывали количество зёрен в колосе главного стебля (путём ручного обмолота) и определяли массу 1000 зёрен на автоматическом счётчике

семян SLY–С Plus.

Качество зерна озимой пшеницы определяли с использованием БИК-анализатора «Инфралаюм ФТ–10». В викоовсяной смеси сырая клетчатка определялась по методу Геннеберга и Штомана (ГОСТ 31675–2012), сырая зола – методом прокаливания навески при 500–600 °С до постоянной массы (ГОСТ 26226–95), а сырой протеин – по содержанию общего азота методом Кьельдаля с пересчётом на белок по коэффициенту 6,25 (ГОСТ 13496.4–93). Исследования проводились в лаборатории оценки качества биологических объектов Аграрного института.

Экспериментальные данные обработаны статистически: использованы метод дисперсионного анализа многофакторного полевого опыта, Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов, осуществлялась с помощью программного обеспечения «STAT–3» на персональном компьютере.

Оценка долевого участия факторов в общем варьировании урожайности озимой пшеницы рассчитывали путем сопоставления дисперсий главных эффектов и их взаимодействий (Иванова Т.И., 1989).

Построение смешанной линейной модели проводили при помощи пакета LME4 в программе R-studio. Модель сочетала влияние, как непрерывных (сумма осадков, сумма эффективных температур), так и дискретных (внесение удобрений и СЗР) переменных на урожайность зерна озимой пшеницы (Welham S., 2004).

Смешанная линейная модель определена по формуле:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{ij} + \mu_i + \xi_{ij} \quad (2),$$

где  $Y_{ij}$  – переменная результата для  $i$ -го наблюдения в  $j$ -й группе;  $\beta_0$  и  $\beta_1$  – коэффициенты фиксированного эффекта (независимый и градаций фактора);  $x_{ij}$  – переменная-предиктор для  $i$ -го наблюдения в  $j$ -й группе;  $\mu_i$  – случайный эффект для  $i$ -й группы (климатические показатели);  $\xi_{ij}$  – остаточная ошибка для  $i$ -го наблюдения в  $j$ -й группе (Volker В.М. et al., 2009).

Для оценки продуктивности звена севооборота и обеспечения сопоставимости данных по различным по сельскохозяйственному назначению культурам про-

вели пересчёт урожайности в универсальные зерновые единицы (з.е.). Расчёт выполнен в соответствии с Методикой определения расчётной урожайности сельскохозяйственных культур, утверждённой Приказом Минсельхоза России от 6 июля 2017 г. № 330. В соответствии с указанной методикой использовался коэффициент пересчета равнялся 0,14 з.е./т.

Общая продуктивность севооборота рассчитана как сумма урожайностей каждой культуры, выраженных в зерновых единицах, что позволяет объективно оценить совокупный выход продукции с единицы площади и сравнить эффективность различных систем применения средств химизации.

Расчёт выноса элементов питания урожаем озимой пшеницы проводился на основе фактической урожайности зерна с использованием унифицированных агрохимических коэффициентов. Использование постоянных коэффициентов (Вынос 1 т урожая озимой пшеницы N – 30 кг, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 10 кг, K<sub>2</sub>O – 25 кг, с учётом побочной продукции (Минеев В.Г., 2001)) нивелирует межгодовые колебания, обусловленные погодными условиями и иными факторами, и позволяет выявить устойчивые тренды, связанные именно с агротехническими факторами. Единая методика расчёта за весь период наблюдений обеспечивает сопоставимость данных и является общепринятой практикой для расчёта хозяйственного баланса в системе «удобрение – почва – растение». Хотя реальный вынос может варьироваться, для решения задачи оценки степени дефицита или профицита баланса при фиксированных дозах удобрений выбранный подход является корректным и обоснованным.

Баланс питательных веществ рассчитывался как разность между внесённым с удобрениями количеством элемента и его общим выносом с урожаем. В расчёте учитывался вынос элементов не только с товарной частью урожая (зерном), но и с побочной продукцией (соломой). Использованные стандартные коэффициенты выноса являются комплексными и уже включают в себя долю, приходящуюся на солому. Такой подход соответствует общепринятой агрохимической методологии и обеспечивает корректность расчёта баланса, поскольку исключает значительную недооценку выноса элементов, которая возникла бы при учёте только зерна.

Биоэнергетическую оценку эффективности возделывания культур проводили по методике, изложенной в работе Ахметова Ш.И. и Смолина Н.В. (1997). В основу расчётов положено сопоставление энергии, аккумулированной в урожае, с совокупными затратами антропогенной энергии на всех этапах технологического процесса, включая энергетические потери, связанные с изменением почвенного плодородия.

## **2.2 Агрометеорологические условия в годы исследований**

Климат Республики Мордовия умеренно континентальный, с холодной морозной зимой и умеренно жарким летом. Вегетационный период начинается 14–16 апреля, когда средняя суточная температура воздуха достигает +5 °С, и продолжается 178–183 дня, за это время накапливается 2600–2650 град. тепла. Период активной вегетации растений начинается 1–3 мая и длится 141–145 дней, с накоплением 2250–2400 град. активных температур. Сумма летних положительных температур превышает 1700–1800 град., что способствует созреванию сельскохозяйственных культур. Колошение озимых наблюдается 9–15 июня, а восковая спелость наступает 18–22 июля. Мордовия находится в зоне неустойчивого увлажнения, где годы с достаточным увлажнением чередуются с засушливыми; за тёплый период (апрель–октябрь) выпадает 345–370 мм осадков, из которых 250–270 мм приходится на период активной вегетации (<https://tourismportal.net/nature/klimat-5>).

Развитие аграрного производства находится в тесной взаимосвязи с функционированием природных компонентов вмещающего ландшафта. Среди прочих природных факторов возделываемой территории биоклимат в значительной степени определяет урожаи сельскохозяйственных культур, средний уровень продуктивности, её межгодовую изменчивость, качество полученной продукции и т.д.

Кандидаты географических наук С.В. Меркулова и П.И. Меркулов (2020) в

своем исследовании подчеркивают, что анализ динамики биоклиматических показателей (БКП) территории Мордовии демонстрирует устойчивую нисходящую тенденцию за последнее десятилетие, где увеличение сумм активных температур и продление вегетативного периода не компенсируют снижение осадков и ухудшение увлажнения. Это приводит к повышению доли лет с пониженным биоклиматическим потенциалом, что может негативно сказаться на растениеводстве и требует от аграриев внедрения мероприятий для повышения устойчивости агро-систем к аномальным условиям. Связь между биологической продуктивностью и БКП является критически важной: для достижения высокой продуктивности необходимо соответствие высоким стандартам земледелия и адаптация к изменяющемуся климату. Результаты анализа показывают, что более 30 % площади Мордовии обладает высоким потенциалом биопродуктивности, около 50 % – средним, и примерно 20 % – низким, при этом большинство хозяйств эффективно используют эколого-биоклиматический потенциал своих ландшафтов, что позитивно отражается на объемах сельскохозяйственного производства.

Исследователь А.С. Резник (2020) отмечает, что интегральная биоклиматическая комфортность Республики Мордовия находится в диапазоне низкой и умеренной комфортности (1,5–2,4 балла), Летние засухи и суховеи имеют среднюю повторяемость 20–30 %, с редкими сильными суховеями. В целом, биоклиматические условия окрестностей Саранска характеризуются как дискомфортные, с преобладанием суровых зимних условий.

Наблюдения за погодными условиями в годы исследований (Таблица 2) осуществлялись Саранской метеостанцией, расположенной на территории аэропорта и находящейся в 350 метрах от лизиметрической лаборатории. Метеорологические данные использовались в открытом доступе через интернет.

Для более точной оценки погодных условий рекомендуется использовать гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), который широко применяется в агрономии для общей характеристики климата и выделения зон с различным уровнем влагообеспеченности, что помогает определить целесообразность выращивания определенных сельскохозяйственных культур.

Селянинов выделил следующие зоны по величине ГТК: зону избыточного увлажнения или дренажа (ГТК > 1,3); зону обеспеченного увлажнения (1,0–1,3); засушливую зону (0,7–1,0); зону сухого земледелия (0,5–0,7); и зону ирригации (ГТК < 0,5).

Метеорологические условия тех периодов, в течение которых в стационаре выращивались однолетние травы и озимая пшеница представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Метеоусловия в годы возделывания исследуемых культур

Год	Количество осадков, мм				Температурный режим за вегетацию, °С			ГТК за летнюю вегетацию
	за период август–апрель	в т.ч. в виде снега	за период май–июль	всего	Сумма температур	Сумма активных температур	Средне-суточная температура	
1992 г.	320	140	95	415	1 439	519	15,8	0,61
1999 г.	474	239	138	612	1 557	724	16,9	1,20
2006 г.	303	152	159	462	1 538	618	17,4	0,89
2008 г.	248	121	182	430	1 448	538	15,7	1,59
2009 г.	220	36	127	347	1 591	676	17,3	0,81
2016 г.	403	294	129	532	1 632	712	17,7	0,79
2023 г.	337	135	217	554	1 505	585	16,4	1,44
2024 г.	363	182	97	460	1 602	729	17,4	0,61
Среднее за 37 лет	340	154	159	499	1 579	666	17,2	1,04
CV, %	19	28	36	18	8	19	8	42

В годы исследования однолетних трав и озимой пшеницы наибольшая изменчивость характерна для летних осадков (36 %), в то время как предвегетационные осадки демонстрируют наименьшие ежегодные колебания (19 %). В отличие от осадков, летние температуры подвержены менее выраженным колебаниям (4–8 %). По совокупным метеорологическим показателям, из пяти лет исследований для озимой пшеницы два года оказались засушливыми (ГТК = 0,61), два – слабо-засушливыми (ГТК = 0,81 и 0,89) и один год оптимальным (ГТК = 1,20), что указывает на неустойчивый характер погоды в регионе. При этом наиболее существенной была вариация летних осадков (CV = 36 %). Острый дефицит летних осадков отмечался в 1992 и 2024 гг.

### 2.3 Агрохимическая характеристика почвы лизиметров перед закладкой опыта

Объектом данного исследования является чернозем, относящийся к выщелоченному типу со средней мощностью и среднегумусным составом, характеризующийся высоким содержанием фракций физической глины – до 57 % в пахотном слое. Этот тип почвы широко распространен в лесостепной зоне Приволжской возвышенности, находящейся в средней полосе европейской части России. Особенностью данной почвы является наличие под горизонтом слоя аккумулятивно-карбонатных отложений.

Типичным примером почвенного профиля чернозема выщелоченного служит описание почвенного разреза, подготовленного перед заполнением лизиметров. Мощность гумусового горизонта варьировалась от 55 до 60 см и характеризуется черно-серой окраской. Верхний пахотный слой сильно выпахан и имеет комковато-глыбистую структуру, которая в подпахотном горизонте переходит в комковато-зернистую. На глубине 70–80 см располагается неоднородно окрашенный горизонт буроватого оттенка, однако, с преобладанием гумусовой окраски. Вскипание карбонатов начинается на глубине 95 см. С горизонта, находящегося ниже 100 см, начинается материнская порода, которая не содержит коагулянтов и не обладает способностью удерживать воду.

Почвенно-агрохимические лизиметры требуют определенного времени для усадки почвы и стабилизации характеристик почвенного профиля, таких как плотность, агрегатный состав, пористость и влагопроводность. По этой причине наблюдения начали фиксироваться с 1990 г., когда насыпная почва по агрофизическим показателям достигла значений, близких к естественным параметрам старопашотной почвы, расположенной рядом с лизиметрической лабораторией. Таким образом, к моменту посева плотность пахотного слоя почвы в обоих образцах оказалась одинаковой и составила в среднем  $1,01 \pm 0,2$  г/см<sup>3</sup>, а общая пористость составила  $56 \pm 2$  %.

В следующей Таблице 3 представлена информация об исходных агрохими-

ческих показателях почвы в начале закладки опыта. Эти показатели играют решающую роль в определении питательной ценности почвы и ее способности поддерживать рост и развитие культивируемых растений.

Таблица 3 – Агрохимические показатели почвы

Глубина, см	Содержание гумуса %	рН вытяжки	Гидролитическая кислотность	Сумма поглощенных оснований	Степень насыщенности основаниями, %	N <sub>л.г.</sub> , мг/кг	Содержание подвижных форм, мг/100 г почвы	
		КС1	ммоль(экв.)/100 г почвы	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			K <sub>2</sub> O	
								0–20
21–40	4,4	6,0	5,3	27,4	83,5	62,1	12,8	12,0
41–60	2,8	5,8	4,5	25,2	84,7	41,3	10,4	12,5
61–80	1,5	5,5	3,6	23,0	86,3	24,7	6,6	14,0
81–100	1,0	5,7	3,0	20,3	86,9	15,8	3,0	14,5

Агрохимические свойства, такие как уровень рН, содержание органического вещества, кислотность почвы, напрямую влияют на доступность питательных веществ для растений и, соответственно, на их урожайность.

Содержание гумуса в пахотном слое почвы составляет 6,4 %. Довольно резкое снижение гумуса в подпахотном слое обуславливает ограничение максимальной глубины обработки почвы до 25–27 см. Почва отличается высокой степенью насыщенности основаниями. В пахотном слое она достигает 85 % и с увеличением глубины возрастает. По содержанию подвижного фосфора и обменного калия для зерновых культур почва является среднеобеспеченной (Плотников А.М., 2018).

### **3 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВНЕСЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА ДИНАМИКУ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ**

Сохранившиеся многолетние полевые опыты приобретают исключительную значимость для углубленного изучения динамики плодородия и агрохимических свойств почвы под воздействием как естественных, так и антропогенных факторов. Особую ценность они представляют при анализе последствий длительного применения минеральных удобрений в контексте современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия, ориентированных на соблюдение экологического императива. Эти опыты позволяют проследить долгосрочные изменения в почвенном плодородии и оценить эффективность различных систем удобрения с учетом их влияния на окружающую среду (Грицевич Ю.Г. и др., 2012).

В условиях интенсивного земледелия антропогенное воздействие на почву неуклонно возрастает, провоцируя трансформацию её характеристик и падение продуктивности. Использование минеральных удобрений является необходимым фактором для значительного улучшения питательной среды выщелоченных черноземов. Внесение удобрений радикально преобразует питание почвы, обеспечивая достаточный резерв питательных элементов для повышения урожайности. Рациональная агротехника улучшает агрофизические свойства почвы, создает подходящую среду для активного роста почвенных микроорганизмов и обогащения почвы доступными элементами питания (Минеев В.Г., 2004).

#### **3.1 Изменение содержания гумуса в условиях длительного применения средств химизации**

Центральным элементом в системе управления плодородием почвы и воздействия на него выступает восстановление органической составляющей. Органическое вещество, в особенности гумус, – его специфическая часть, играет важ-

ную роль во множестве почвенных процессов. Физико-химические свойства, буферная емкость, способность к поглощению, снабжение растений азотом, в значительной степени фосфором, а также физические характеристики почвы напрямую зависят от количества и качественного состава этого вещества (Околелова А.А., 2017).

Большинство ученых сходятся во мнении, что ключевой задачей является поддержание положительного или, как минимум, бездефицитного баланса органического вещества в почве. Это связано с тем, что гумус служит главным поставщиком минеральных веществ, необходимых для питания растений (Куликова А.Х. и др., 2022; Синих Ю.Н., 2010; Троц В., 2011; Чекмарев П.А. и др., 2011).

Эксплуатация почв, сопряженная с различной степенью эрозионных процессов и особенностями рельефа, обуславливает уменьшение концентрации гумуса на 25–52 %, подвижных фракций гумусовых соединений на 33–50 %, и негумифицированной органики в 2–2,4 раза в сравнении с нераспаханными аналогами. Дефицит органического вещества в обрабатываемых почвах, интенсификация процессов минерализации гумуса и негумифицированных компонентов, а также неоптимальные методы обработки почвы являются решающими факторами, определяющими потери гумуса. Помимо этого, усугубляют ситуацию доминирование пропашных культур в структуре севооборотов и ограниченное включение многолетних бобовых трав (Котлярова О.Г. и др., 2004).

Органическое вещество выступает в качестве ключевого источника энергии для биологических процессов и обладает свойствами физиологически активных соединений, которые модулируют рост и питание растений. Однако при интенсивном земледелии его стабильность подвергается значительным рискам.

При дефиците внесения удобрений, формирование урожая сельскохозяйственных культур в значительной степени опирается на почвенные резервы питательных элементов, в особенности азота, высвобождаемого в процессе минерализации гумуса. Скорость разложения органического вещества в верхних горизонтах почвы определяется его общим содержанием, объемом и типом используемых удобрений, а также характеристиками самой почвы. Например, в черноземах еже-

годная минерализация гумуса в среднем достигает 0,4–0,5 % в относительном исчислении (Балаев А.Д., 2015).

Внесение минеральных удобрений, в особенности азотных, приводит к уменьшению концентрации гумусовых веществ в почве. Более того, при деградации гумуса происходит высвобождение значительного количества азота, который, мигрируя в нижние горизонты почвы, обуславливает загрязнение подземных вод нитратами. Интенсивное использование минеральных удобрений катализирует процесс разложения гумуса, что приводит к быстрому ухудшению его агробиологических характеристик. В результате почва утрачивает свои буферные свойства, снижается емкость катионного обмена и ухудшается структура (Годунова Е.И. и Шаповалова Н.Н., 2017).

Изменение концентрации гумуса в обрабатываемом горизонте почвы и его вертикальное распределение существенно зависят не только от применения удобрений и мелиорантов, но и от режима увлажнения, определяющего направление потоков органического вещества в почвенном профиле. В периоды с обильными осадками отмечается максимальное увеличение содержания гумуса в нижних горизонтах профиля, что обусловлено миграцией гумусовых соединений с гравитационным потоком воды. В засушливые годы наблюдается повышение концентрации гумуса в верхнем слое (0–40 см) с последующим уменьшением по мере углубления (Стекольников К.Е. и др., 2013).

Трансформация гумусового профиля чернозёма выщелоченного под влиянием агротехнических факторов (1987–2024 гг.) отражена в Таблице 4 (Приложения 2,3). Данные демонстрируют изменение содержания, запаса и фракционного состава гумуса по почвенным горизонтам на фоне исходного состояния.

Исследование вертикального распределения гумуса выявило существенные различия в динамике его содержания в пахотном и подпахотных горизонтах. В активном корнеобитаемом слое (0–40 см) зафиксирована максимальная амплитуда изменений содержания гумуса, варьирующая от –22 % в контроле до +8 % в варианте с высокой дозой удобрений и СЗР. Такая высокая чувствительность гумуса в пахотном слое к агрогенным воздействиям обусловлена несколькими факторами.

Во-первых, это зона максимальной биологической активности, где происходит поступательное разложение органических остатков и формирование новых гумусовых веществ. Во-вторых, пахотный слой непосредственно подвергается механическим обработкам, внесению удобрений и пестицидов, что оказывает прямое влияние на трансформацию органического вещества.

Таблица 4 – Влияние средств химизации на содержание гумуса и изменение его во времени

Вариант		Содержание гумуса, % (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	5,0 (–22 %)	3,8 (–14 %)	2,5 (–11 %)	1,4 (–7 %)	1,0 (0 %)
	СЗР	5,2 (–19 %)	4,0 (–9 %)	2,6 (–7 %)	1,4 (–7 %)	1,0 (0 %)
Умеренная доза	Контроль	6,3 (–2 %)	4,4 (0 %)	2,8 (0 %)	1,5 (0 %)	1,0 (0 %)
	СЗР	6,5 (+2 %)	4,5 (+2 %)	2,8 (0 %)	1,5 (0 %)	1,0 (0 %)
Высокая доза	Контроль	6,6 (+3 %)	4,6 (+4 %)	2,9 (+4 %)	1,5 (0 %)	1,0 (0 %)
	СЗР	6,9 (+8 %)	4,7 (+7 %)	2,9 (+4 %)	1,5 (0 %)	1,0 (0 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,2; НСР <sub>05</sub> А = 0,2; НСР <sub>05</sub> В = 0,1; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_T$						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,2; НСР <sub>05</sub> А = 0,1; НСР <sub>05</sub> В = 0,1; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_T$						

\* Для остальных слоев различия незначимы

В подпахотных горизонтах от 40 до 100 см, напротив, изменения содержания гумуса оказались незначительными и не превышали 4 % по абсолютной величине. Исключение составил контрольный вариант, где в слоях 41–60 см и 61–80 см зафиксировано снижение на 7–11 %, что, тем не менее, существенно меньше амплитуды изменений в пахотном слое. Эти результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о консервативности глубинного гумуса в условиях изоляции от внешних воздействий, созданных в лизиметрическом эксперименте.

За 37 лет наблюдений зафиксировано снижение содержания гумуса на 1,5 % на варианте без удобрений, что соответствует ежегодной потере 0,38 т/га органического углерода. Этот результат демонстрирует негативное влияние земледелия без компенсации выноса питательных веществ за гумусовый горизонт выщелоченного чернозема.

Внесение умеренной дозы удобрений привело к стабилизации содержания гумуса ( $\pm 2$  %). Предполагается, что это связано с компенсацией выноса элементов питания с урожаем, что поддерживает биомассу растений и, соответственно, поступление органических остатков в почву.

Применение высокой дозы удобрений в сочетании со средствами защиты растений привело к достоверному накоплению гумуса (+0,2 % в год). Этот эффект объясняется значительным ростом биомассы культур, что, в свою очередь, обеспечивает большее поступление растительных остатков в почву и стимулирует процессы гумификации.

Использование средств защиты растений оказало существенное влияние на динамику гумуса, усиливая эффект удобрений.

В контрольном варианте СЗР замедлили деградацию гумуса на 3 %, по сравнению с контролем без СЗР. Это можно объяснить снижением потерь фитомассы из-за воздействия вредителей и болезней, что увеличивало поступление органического вещества в почву.

При высокой дозе удобрений СЗР увеличили прирост гумуса на 5 % в относительном сравнении. Механизм этого влияния заключается в сохранении фитомассы, что приводит к увеличению растительных остатков на 15–20 %. Более здоровая и развитая растительность оставляет больше корней и надземной биомассы после уборки урожая, что является важным источником поступления органического вещества в почву.

Важно подчеркнуть, что влияние минеральных удобрений на накопление гумуса является опосредованным. В условиях лизиметрического опыта, моделирующего замкнутую систему, весь непродуктивный выход биомассы (солома, пожнивные остатки), а также корневая система растений после уборки урожая оста-

вались в лизиметрах и заделывались в почву. Таким образом, применение минеральных удобрений, существенно увеличившее общую биомассу растений, обеспечивало повышенное поступление лабильного органического материала (корневых выделений, отмерших корней, соломы) в почву. Этот материал, обогащенный элементами питания (особенно азотом), служил энергетическим субстратом и «строительным блоком» для почвенной микробиоты, что в конечном итоге стимулировало процессы гумификации и приводило к положительному балансу гумуса. В контрольном варианте без удобрений количество возвращаемых в почву растительных остатков было недостаточным для компенсации естественных процессов минерализации, что и обусловило отрицательную динамику органического вещества.

Полученные данные раскрывают фундаментальное свойство черноземов: их гумусовый профиль динамичен в агрогенном слое, но сохраняет реликтовую стабильность на глубине. Это требует дифференцированных подходов к мониторингу почвенного плодородия и разработке адаптивных систем земледелия, учитывающих вертикальную дифференциацию динамики гумуса.

### **3.2 Динамика кислотности почвы в зависимости от длительного применения минеральных удобрений и средств защиты растений**

Кислотность почвы представляет собой критически важный фактор почвенного плодородия, оказывающий определяющее воздействие на формирование урожайности сельскохозяйственных культур. Неблагоприятное влияние кислотности на растения приводит к ежегодным потерям урожая, оцениваемым в масштабах страны в пределах 10–12 млн т зерна (Чекмарев П.А. и др., 2011).

Физико-химические свойства почвы, в частности реакция почвенной среды, играют основополагающую роль в определении её плодородия. Реакция почвенной среды является ведущим свойством, определяющим направленность и интенсивность практически всех почвенных процессов, обеспечивающих азотный,

фосфорный и калийный режимы, а также доступность макро- и микроэлементов для растений.

Процессы подкисления пахотных почв обусловлены протонированием почвенной среды, связанным с жизнедеятельностью растений и микроорганизмов, окислительно-восстановительными реакциями, применением физиологически кислых минеральных удобрений, а также потерями щелочноземельных элементов вследствие выноса с урожаем и выщелачивания с различными видами стока. Антропогенные факторы могут усиливать или ослаблять естественные процессы, однако доминирующее влияние остается за природными факторами. Учитывая, что полный сток является одним из базовых факторов эволюции почв, оказывающих прямое и независимое воздействие, наблюдаемые изменения климатических условий способны смещать динамическое равновесие почвенных процессов (Чуян О.Г., 2019).

Общеизвестно, что применение минеральных удобрений сопряжено с потенциальными негативными экологическими последствиями для плодородия почв, в частности, с существенным изменением их кислотно-щелочного баланса. В научной литературе широко используется понятие «физиологическая кислотность удобрений». Внесение агрохимикатов, обладающих физиологической кислотностью, приводит к подкислению почвы вследствие преимущественного поглощения растениями катионов, оставляя анионы, такие как сульфаты и хлориды, в почвенном растворе, что способствует снижению pH (Weil R.R., N.C. Brady, 2017).

Реакция почвенной среды является краеугольным фактором, определяющим рост и развитие растений, активность почвенной микробиоты, а также ход химических и биохимических процессов, протекающих в почве. Кислотность почвы, в частности, оказывает существенное влияние на абсорбцию питательных элементов растениями из почвенного раствора и вносимых удобрений, интенсивность минерализации органического вещества и множество других физико-химических процессов. Общеизвестно, что повышенная кислотность почвы приводит к нарушению поступления элементов питания в растения, угнетению микробиологиче-

ской активности, повышению подвижности и доступности для растений токсичных металлов, ухудшению качественных показателей сельскохозяйственной продукции, снижению плодородия почв и, как следствие, урожайности сельскохозяйственных культур. Экспериментально подтверждено, что на сильнокислых почвах внесение минеральных удобрений может давать отрицательный эффект, в то время как на средне- и слабокислых почвах их эффективность снижается на 20–40 % (Черкасов Е.А. и др., 2011).

Многочисленные научные исследования и передовой сельскохозяйственный опыт однозначно свидетельствуют о том, что кислые почвы представляют собой один из основных лимитирующих факторов, препятствующих получению высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур.

Для оценки реальной кислотности чернозёма выщелоченного в условиях агрогенной нагрузки была проанализирована динамика рН солевой вытяжки. Показатель отражает содержание обменных ионов  $H^+$  и  $Al^{3+}$  в почвенном поглощающем комплексе, что критично для прогноза подвижности токсичных металлов и доступности элементов питания. В отличие от гидролитической кислотности (Нг), характеризующей потенциальный резерв кислотности, рН КСl демонстрирует текущее состояние почвенного раствора. Результаты сравнительных измерений и сравнений 1987 и 2024 гг. систематизированы в Таблице 5 (Приложения 4,5).

Интенсивное земледелие оказывает существенное влияние на кислотно-основные свойства черноземов, особенно на динамику рН пахотного слоя. Представленные данные демонстрируют, что наиболее выраженное снижение рН наблюдается в вариантах с высокой дозой удобрений без применения средств защиты растений. В частности, в слое 0–20 см снижение рН за взятый для сравнения длительный период в 37 лет может достигать 1,0 ед. (16 %).

На верхнем слое (0–40 см) происходит активная аккумуляция ионов  $H^+$ , что приводит к снижению рН на 0,4–1,0 ед. Основные причины подкисления включают корневое дыхание растений, в ходе которого выделяется  $CO_2$ , образующий угольную кислоту, и процессы нитрификации.

Таблица 5 – Влияние средств химизации на величину обменной кислотности почвы и изменение ее во времени

Вариант		Значение рН (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	5,8 (–6 %)	5,9 (–2 %)	5,9 (+3 %)	5,5 (0 %)	5,7 (0 %)
	СЗР	5,9 (–5 %)	6,0 (0 %)	5,9 (+2 %)	5,6 (+2 %)	5,7 (0 %)
Умеренная доза	Контроль	5,5 (–11 %)	5,7 (–5 %)	5,8 (0 %)	5,5 (0 %)	5,7 (0 %)
	СЗР	5,6 (–10 %)	5,8 (–3 %)	5,8 (0 %)	5,6 (+2 %)	5,7 (0 %)
Высокая доза	Контроль	5,2 (–16 %)	5,4 (–10 %)	5,5 (–5 %)	5,5 (0 %)	5,7 (0 %)
	СЗР	5,3 (–14 %)	5,5 (–8 %)	5,5 (–5 %)	5,6 (+2 %)	5,7 (0 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,1; НСР <sub>05</sub> А = 0,1; НСР <sub>05</sub> В = 0,1; для сочетания факторов АВ F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub>						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,1; НСР <sub>05</sub> А = 0,1; НСР <sub>05</sub> В = F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub> ; для сочетания факторов АВ F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub>						

\* Для остальных слоев различия незначимы

В нижнем слое (61–100 см) наблюдается относительная стабильность рН (изменения  $\Delta \leq \pm 0,1$  ед.). Это обусловлено буферной емкостью иллювиальных горизонтов, способностью поглощать избыток ионов  $H^+$  и сглаживать колебания рН.

Применение СЗР позволяет снизить темпы подкисления на 10–15 %. Это связано с подавлением сорной растительности, что уменьшает вынос катионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  и др.) из почвы. Сорные растения активно потребляют катионы, и их удаление посредством СЗР способствует сохранению этих элементов в почве, снижая подкисление.

Интенсивность подкисления напрямую зависит от дозы вносимых удобрений. Физиологическая кислотность удобрений обусловлена процессом нитрификации аммонийного азота ( $NH_4^+$ ), в результате которого образуются ионы  $H^+$  (до 3,6 кг  $H^+$ /га на 100 кг N). Таким образом, чем больше вносится аммонийных удобрений, тем интенсивнее происходит нитрификация и, следовательно, подкисление почвы. Кроме того, вынос оснований с урожаем также способствует подкисле-

нию, поскольку сельскохозяйственные культуры поглощают катионы из почвы, которые затем удаляются с урожаем.

Повышение кислотности почвы при длительном применении минеральных удобрений, в первую очередь аммиачной селитры, в значительной степени обусловлено процессом нитрификации. Данное утверждение, даже в отсутствие прямых данных по динамике аммонийного и нитратного азота, находит своё обоснование в установленной химической природе удобрения и выявленных экспериментальных закономерностях. Аммиачная селитра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) содержит 50 % азота в аммонийной форме ( $\text{NH}_4^+$ ), которая в процессе микробиологического окисления до нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ) продуцирует ионы водорода ( $\text{H}^+$ ). Косвенным подтверждением протекания этого процесса служит динамика легкогидролизуемого азота, который включает в себя комплекс лабильных органических и минеральных соединений, служащих субстратом для нитрифицирующих микроорганизмов. Наиболее же убедительным свидетельством является чёткая дозозависимая картина подкисления: максимальное снижение рН и рост гидролитической кислотности зафиксированы именно в варианте с высокой дозой удобрений, где поступление аммонийного азота в почву было наибольшим. Таким образом, совокупность теоретических предпосылок и строгой корреляции «доза удобрений – степень подкисления» позволяет считать нитрификацию ключевым звеном в исследуемом процессе.

При достижении  $\text{pH} < 5,5$  в слое 0–20 см наблюдаются следующие негативные последствия: концентрация подвижного алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ) может достигать  $> 5$  мг/100 г.  $\text{Al}^{3+}$ , который является токсичным для растений и ингибирует рост корневой системы злаковых культур, препятствуя поглощению воды и питательных веществ. А также снижается доступность фосфора для растений на 40–60 %. При низком рН фосфор образует нерастворимые соединения с алюминием и железом, что делает его недоступным для усвоения корневой системой растений.

Таким образом, интенсивное земледелие, особенно применение высоких доз удобрений, может приводить к значительному подкислению пахотного слоя чернозема. Это негативно сказывается на плодородии почвы и урожайности сельскохозяйственных культур. Необходимо применять меры по регулированию кислот-

ности почвы, такие как известкование, а также оптимизировать систему удобрений и использовать СЗР для снижения темпов подкисления.

Для количественной оценки многолетней динамики подкисления чернозёма выщелоченного при агрогенной нагрузке также проведён системный анализ изменений гидролитической кислотности в пяти почвенных горизонтах (0–100 см). В отличие от обменной кислотности, отражающей мгновенное состояние почвенного раствора, гидролитическая кислотность характеризует потенциальный резерв обменных катионов  $H^+$  и  $Al^{3+}$  в почвенном поглощающем комплексе. Этот показатель критичен для прогноза долгосрочных изменений буферности чернозёма, особенно при интенсивном агротехническом воздействии. Результаты за 1987–2024 гг. представлены в Таблице 6 (Приложения 6,7).

Таблица 6 – Влияние средств химизации на величину гидролитической кислотности почвы и изменение ее во времени

Вариант		Величина $H_g$ , ммоль(экв.)/100 г почвы (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	6,57 (+13 %)	5,51 (+4 %)	4,51 (0 %)	3,53 (–2 %)	3,03 (+1 %)
	СЗР	6,22 (+7 %)	5,41 (+2 %)	4,51 (0 %)	3,44 (–4 %)	2,83 (–6 %)
Умеренная доза	Контроль	7,55 (+30 %)	6,59 (+24 %)	5,60 (+24 %)	4,23 (+18 %)	3,48 (+16 %)
	СЗР	7,41 (+28 %)	6,35 (+20 %)	5,43 (+21 %)	4,13 (+15 %)	3,25 (+8 %)
Высокая доза	Контроль	9,02 (+56 %)	7,91 (+49 %)	5,52 (+23 %)	4,28 (+19 %)	3,35 (+12 %)
	СЗР	8,93 (+54 %)	7,62 (+44 %)	5,33 (+18 %)	4,17 (+16 %)	3,26 (+9 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,09; НСР <sub>05</sub> А = 0,08; НСР <sub>05</sub> В = 0,06; для сочетания факторов АВ = 0,06						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,18; НСР <sub>05</sub> А = 0,15; НСР <sub>05</sub> В = 0,12; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_T$						

\* Для остальных слоев различия незначимы

Удобрения, в первую очередь азотные, являются одним из основных факто-

ров, влияющих на уровень кислотности почвы. Исследования показали, что существует линейная зависимость между дозой вносимых удобрений и увеличением Нг. Так, в контрольном варианте (без внесения удобрений) Нг составляет +0,77 ммоль(экв.)/100 г. При умеренной дозе удобрений этот показатель возрастает до +1,75 ммоль(экв.)/100 г, а при высокой дозе – до +3,22 ммоль(экв.)/100 г. Этот эффект обусловлен, прежде всего, процессом нитрификации, в ходе которого происходит окисление аммонийных форм азотных удобрений с выделением ионов водорода ( $H^+$ ). Увеличение концентрации ионов  $H^+$  приводит к снижению рН почвы и, как следствие, к увеличению гидролитической кислотности. Наиболее выраженные изменения наблюдаются в верхнем слое почвы (0–20 см), где происходит активная трансформация внесенных удобрений. В этом слое зафиксировано максимальное увеличение Нг (+30–56 %). В более глубоких слоях (81–100 см) изменения кислотности выражены в меньшей степени (+1–12 %).

Средства защиты растений также оказывали влияние на кислотность почвы, хотя и в меньшей степени, чем удобрения. Применение СЗР приводило к снижению прироста Нг на 1–7 % относительно контроля по фактору А. Например, в слое 0–20 см при внесении высокой дозы удобрений прирост Нг снижался с 56 % до 54 % при использовании СЗР. Этот эффект, вероятно, связан с подавлением процессов нитрификации и стабилизацией органического вещества в почве. СЗР могут оказывать ингибирующее воздействие на нитрифицирующие бактерии, в частности, на бактерии рода *Nitrosomonas spp.*, которые играют значимую роль в процессе нитрификации. Установлено, что СЗР снижают активность этих бактерий на 15–30 %. Снижение активности этих бактерий приводит к замедлению процесса окисления аммонийного азота и, как следствие, уменьшению выделения ионов  $H^+$ .

Пространственная динамика изменения кислотности характеризуется наиболее интенсивным подкислением в слое 0–40 см, где прирост Нг при внесении удобрений превышает 20 %. В более глубоких слоях (41–100 см) изменения кислотности, как правило, статистически незначимы. Вертикальное распределение кислотности тесно связано с миграцией нитрат-ионов ( $NO_3^-$ ) и ионов водоро-

да ( $H^+$ ) по почвенному профилю.

Помимо нитрификации, значительный вклад в подкисление почвы вносит вынос оснований с урожаем сельскохозяйственных культур. Интенсивное выращивание зерновых и пропашных культур приводит к выносу значительного количества катионов оснований ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  и др.) из почвы, что также способствует увеличению кислотности.

Проведенные многолетние сравнительные наблюдения (за 37 лет) показали, что кислотность черноземов выщелоченных в пахотном слое возросла на 13–56 %, причем степень подкисления напрямую зависит от дозы вносимых удобрений: контроль < умеренная доза < высокая доза. Дозы удобрений определяют 70 % вариабельности  $Hr$ , а применение СЗР снижает прирост  $Hr$  на 1–7 %. Полученные данные согласуются с результатами мониторинга кислотности почв в Тверской области (1998–2022 гг.), который показал рост  $Hr$  на 40–60 % при высоких дозах азотных удобрений (Иванов Д.А. и др., 2023).

### **3.3 Состояние ППК в зависимости от длительного применения средств химизации**

В агроэкосистемах дегумификация и потери кальция в выщелоченных черноземах взаимосвязаны, ухудшая структуру почвы и ее физико-гидрологические свойства. Изменения в почвенном поглощающем комплексе (ППК), характеризующемся суммой обменных оснований, емкостью катионного обмена, степенью насыщенности основаниями и типами кислотности, могут быть вызваны применением минеральных удобрений, содержащих одновалентные катионы и анионы. Эти удобрения способны приводить к потерям кальция, снижению степени насыщенности ППК основаниями и разрушению структуры почвы за счет диспергирующего действия катионов калия и аммония. Продолжительное использование различных дозировок и комбинаций удобрений также влияет на ППК (Подколзин О.А. и др., 2025). Мониторинг физико-химических свойств почвы в многолет-

них стационарных опытах необходим для выявления причин негативного воздействия антропогенных факторов, сравнения с другими свойствами черноземов и определения оптимальных методов возделывания сельскохозяйственных культур, направленных на восстановление плодородия почв черноземного типа.

Даже при высокой насыщенности основаниями (превышающей 90 %) и значительной буферной способности черноземов, антропогенное влияние вызывает заметные изменения в составе почвенного коллоидного комплекса. Многочисленные исследования (Щеглов Д.И., 1999; Йонко О.А. и др., 2010) указывают на то, что длительное сельскохозяйственное использование черноземных почв приводит к потере обменного кальция и снижению емкости поглощения. Этот процесс деградации, обусловленный интенсивным земледелием, влечет за собой изменение ионного состава поглощающего комплекса. Уменьшение содержания кальция, как ключевого элемента структуры почвы, негативно сказывается на ее физических свойствах, включая агрегатную устойчивость и водопроницаемость. Снижение емкости поглощения отражает уменьшение способности почвы удерживать питательные вещества, что может привести к снижению плодородия и увеличению потребности в минеральных удобрениях. Таким образом, необходимо учитывать антропогенные факторы при оценке состояния черноземов и разрабатывать стратегии для поддержания их плодородия и устойчивости к деградации (Агурова И.В. и др., 2024).

В условиях интенсификации земледелия основным показателем экологической стабильности почв служит сумма поглощённых оснований ( $S$ ), отражающая способность ППК удерживать питательные катионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ) и противостоять подкислению. Наши многолетние исследования выявили, что средства химизации – минеральные удобрения и пестициды оказывали дивергентное влияние на этот показатель (Таблица 7; Приложения 8,9).

Исследование выявило глубинную дифференциацию в изменении содержания обменных оснований. Максимальное снижение  $S$  наблюдалось в пахотном слое (0–20 см) при внесении высокой дозы удобрений (–35 %), в то время как в контрольном варианте снижение составило 12, а при умеренной дозе 11 %. Минимальные потери  $S$  зафиксированы в подпахотном слое (81–100 см), варьируя от

5 % (контроль) до 15 % (высокая доза). Такая дифференциация обусловлена активным вымыванием оснований и подкислением ризосферы в зоне корневой активности, где происходят наиболее интенсивные процессы обмена между почвой и растениями.

Таблица 7 – Влияние средств химизации на величину суммы поглощенных оснований и изменение ее во времени

Вариант		Значение S, ммоль(экв.)/100 г почвы (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	28,72 (–12 %)	24,52 (–10 %)	22,91 (–9 %)	21,57 (–6 %)	19,33 (–5 %)
	СЗР	29,82 (–9 %)	24,78 (–10 %)	23,30 (–8 %)	21,69 (–6 %)	19,36 (–5 %)
Умеренная доза	Контроль	29,05 (–11 %)	25,10 (–8 %)	23,48 (–7 %)	21,80 (–5 %)	19,40 (–4 %)
	СЗР	29,72 (–9 %)	25,43 (–7 %)	23,78 (–6 %)	22,04 (–4 %)	19,59 (–4 %)
Высокая доза	Контроль	21,38 (–35 %)	19,23 (–30 %)	18,87 (–25 %)	18,72 (–19 %)	17,21 (–15 %)
	СЗР	24,48 (–25 %)	19,68 (–28 %)	18,99 (–25 %)	18,92 (–18 %)	17,30 (–15 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 1,10; НСР <sub>05</sub> А = 0,90; НСР <sub>05</sub> В = 0,73; для сочетания факторов АВ = 0,73						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,97; НСР <sub>05</sub> А = 0,79; НСР <sub>05</sub> В = F <sub>φ</sub> <F <sub>T</sub> ; для сочетания факторов АВ F <sub>φ</sub> <F <sub>T</sub>						

\* Для остальных слоев различия незначимы

Влияние удобрений оказалось значительным. Высокая доза удобрений привела к критическому падению содержания S в слое 0–20 см, снижая его до 21,38 ммоль(экв.)/100 г, что ниже оптимального порога в 25 ммоль(экв.)/100 г. Этот эффект объясняется диссоциацией ионов аммония (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) из удобрений, что приводит к аккумуляции протонов (H<sup>+</sup>) в почве. Протоны, в свою очередь, вытесняют катионы Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> с поверхности почвенных коллоидов, делая их более подвижными и подверженными. Умеренная доза удобрений, напротив, продемонстрировала меньшие потери S по сравнению с контролем, что, вероятно, связано с

поддержанием более сбалансированного биохимического состояния почвы и оптимальным соотношением питательных элементов.

Влияние СЗР проявилось статистически значимо только при высокой дозе удобрений в пахотном слое (0–20 см). Применение СЗР снизило потери S с –35 % до –25 % ( $\Delta = +9$  %). Этот эффект может быть связан со снижением стресса у растений при использовании СЗР, что приводит к уменьшению экссудации органических кислот в ризосферу. Органические кислоты, выделяемые корнями растений в ответ на стресс, могут способствовать растворению минералов почвы и вымыванию оснований. В контрольном варианте и при умеренной дозе удобрений СЗР не оказывали существенного влияния на содержание S ( $\Delta \leq 1$  %), что указывает на их меньшую значимость в условиях сбалансированного питания и отсутствия сильного стресса у растений.

Исследование выявило деградационный тренд: за 37 лет при высоких дозах НРК-удобрений чернозем выщелоченный потерял до 35 % буферных оснований в пахотном слое. Это подчеркивает необходимость оптимизации доз минеральных удобрений, особенно азотных, для предотвращения подкисления почвы и снижения потерь обменных оснований. В случаях применения высоких доз удобрений целесообразно использование СЗР для снижения стресса растений и минимизации негативного воздействия на почвенный баланс.

Степень насыщенности основаниями ( $V$ , %) – основной параметр буферного потенциала почв, отражающий баланс между питательными катионами ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) и токсичными ионами ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) в почвенном поглощающем комплексе. Наши 37-летние сравнительные исследования (1987–2024 гг.) выявили, что длительное применение минеральных удобрений вызывает деградацию этого показателя (Таблица 8; Приложения 10,11): критический порог ( $V < 75$  %) достигается через 15–20 лет эксплуатации.

Анализ данных выявил четкую зависимость глубины деградации, оцениваемой по падению  $V$ , от интенсивности применения удобрений. Максимальное снижение  $V$  зафиксировано в пахотном слое (0–20 см), где в варианте с высокой дозой удобрений оно достигло –17 % (контроль по СЗР) и –14 % (СЗР). Такой вы-

раженный эффект обусловлен тем, что именно в пахотный горизонт вносятся удобрения, и здесь же сосредоточена основная масса корневой системы растений, активно поглощающих питательные элементы и выделяющих в почву органические кислоты. Подпахотный слой (21–40 см) деградирует слабее ( $\Delta = -2...-15\%$ ), что свидетельствует о миграции кислотности вглубь почвенного профиля, хотя и с меньшей интенсивностью. Ниже 40 см изменения  $V$  статистически незначимы ( $\Delta < 5\%$ ), что указывает на ограниченное влияние антропогенных факторов на нижние горизонты почвы.

Таблица 8 – Влияние средств химизации на степень насыщенности основаниями и изменение ее во времени

Вариант		Значение $V$ , % (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	81,4 (–4 %)	81,7 (–2 %)	83,6 (–1 %)	85,9 (0 %)	86,4 (–1 %)
	СЗР	82,7 (–3 %)	82,1 (–2 %)	83,8 (–1 %)	86,3 (0 %)	87,2 (0 %)
Умеренная доза	Контроль	79,4 (–6 %)	79,2 (–5 %)	80,7 (–5 %)	83,7 (–3 %)	84,8 (–2 %)
	СЗР	80,0 (–6 %)	80,0 (–4 %)	81,4 (–4 %)	84,2 (–2 %)	85,8 (–1 %)
Высокая доза	Контроль	70,3 (–17 %)	70,8 (–15 %)	77,4 (–9 %)	81,4 (–6 %)	83,7 (–4 %)
	СЗР	73,3 (–14 %)	72,1 (–14 %)	78,1 (–8 %)	81,9 (–5 %)	84,1 (–3 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,77; НСР <sub>05</sub> А = 0,63; НСР <sub>05</sub> В = 0,51; для сочетания факторов АВ = 0,51						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,92; НСР <sub>05</sub> А = 0,75; НСР <sub>05</sub> В = 0,61; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_{\tau}$						

\* Для остальных слоев различия незначимы

Влияние удобрений на  $V$  имеет четкую дозозависимую закономерность. В контрольном варианте, где удобрения не применялись, наблюдалось незначительное снижение  $V$  на 3–4 %, обусловленное естественными процессами биогенной

кислотности, связанными с разложением органического вещества и выделением органических кислот. Умеренная доза удобрений приводила к снижению  $V$  на 6–6,5 %, что является следствием использования физиологически кислых удобрений, которые в процессе нитрификации высвобождают ионы водорода ( $H^+$ ), способствующие подкислению почвы. Высокая доза удобрений вызывала значительное снижение  $V$  до 70 %, что является критическим порогом для черноземов, оптимальное значение  $V$  для которых составляет 80–90 %. При  $V$  ниже 75 % снижается доступность фосфора и калия для растений, усиливается токсичность ионов алюминия ( $Al^{3+}$ ), что негативно сказывается на росте и развитии растений.

Применение СЗР оказывает положительное влияние на  $V$ , снижая потери этого показателя на 1,5–4 %, особенно при высоких дозах удобрений (например, –17 % → –14 %). Механизм этого эффекта связан с улучшением фитосанитарного состояния растений, что снижает вынос  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  из почвы с урожаем. Здоровые растения более эффективно поглощают питательные элементы и выделяют меньше органических кислот, что снижает скорость подкисления почвы. Статистический анализ показывает, что взаимодействие факторов А (удобрения) и В (СЗР) значимо только в слое 0–20 см, что подчеркивает комплексное влияние этих факторов на верхний слой почвы. В слое 21–40 см доминирует фактор А, что указывает на ведущую роль удобрений в подкислении подпахотного горизонта.

Пространственно-временная динамика  $V$  характеризуется вертикальным градиентом подкисления, с максимальным падением  $V$  в пахотном слое (0–20 см) и менее выраженным снижением в подпахотном слое (21–40 см). Глубокая миграция  $H^+$  при высокой дозе удобрений ( $V$  в 21–40 см: –15 %) подтверждает формирование кислотного барьера на глубине 20–25 см.

### **3.4 Содержание NPK в почве в зависимости от длительного применения минеральных удобрений и пестицидов в лизиметрическом опыте**

Существующие данные об изменениях концентрации азота в почвенном покрове остаются весьма неоднозначными и противоречивыми. Это, вероятнее всего, обусловлено высокой мобильностью азота как химического элемента и зависимостью его содержания от почвенно-климатических и метеорологических факторов. Для получения наиболее достоверной информации о динамике азотных соединений в почве необходимы продолжительные стационарные исследования. Только при длительном мониторинге можно учесть все факторы, влияющие на трансформацию азота (Ражева Д.Р., 2009).

Накопление азота является важным процессом почвообразования. Неоднородность условий приводит к разной степени и скорости трансформации азота в почве. Общее количество азота определяется содержанием органического вещества (до 98 % почвенного азота), глубиной гумусового горизонта, где он преимущественно закрепляется. В почве азот присутствует в различных формах: элементарный азот в почвенном воздухе и растворе, минеральный азот (газы и ионы аммония, нитрита и нитрата), и органический азот, разделяемый на легко-, трудно- и негидролизуемый. В почве преобладает трудногидролизуемый азот (69–77 %). Органические соединения азота входят в состав гумуса (Филиппова Л. С., 2023).

При проектировании систем удобрения сельскохозяйственные производители столкнулись с проблемой диссонанса между расчетным уровнем азотного обеспечения растений и их реальной продуктивностью. Нередко отмечается, что расчетные нормы внесения удобрений, ориентированные на планируемый урожай, не демонстрируют высокой точности, а отклонения от прогнозируемых показателей могут быть значительными. Для понимания данной ситуации необходимо учитывать, что при расчетах обычно принимается во внимание фактическое содержание доступного для растений азота, однако не всегда учитываются специфические характеристики почв, метеорологические условия и применяемые агротехнические приемы. Наиболее надежным индикатором фактической обеспе-

ченности растений азотом считается легкогидролизуемый азот ( $N_{л.г.}$ ), поскольку он оперативно трансформируется из органических соединений в минеральные формы в процессе нитрификации. Использование данного показателя позволяет более точно оценить потребности растений в азоте и оптимизировать систему удобрения (Еремин Д.И. и Демина О.Н., 2021).

Оценка динамики гидролизуемого азота имеет важное значение для понимания процессов трансформации азотных соединений в почве и их доступности для растений. В лизиметрическом опыте, где контролируется водный режим и отток питательных веществ, особенно ценно отслеживать изменения в содержании гидролизуемого азота, поскольку это позволяет судить о скорости аммонификации и нитрификации. Динамика гидролизуемого азота в лизиметрическом опыте, где исследуется влияние средств химизации на свойства почвы представлена в Таблице 9 (Приложения 12,13).

Таблица 9 – Влияние средств химизации на содержание легкогидролизуемого азота и изменение его во времени

Вариант		Содержание $N_{л.г.}$ , мг/кг (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	46,7 (–46 %)	42,3 (–32 %)	36,6 (–11 %)	22,9 (–7 %)	15,0 (–5 %)
	СЗР	44,1 (–49 %)	40,0 (–36 %)	35,0 (–15 %)	22,2 (–10 %)	14,8 (–6 %)
Умеренная доза	Контроль	78,5 (–9 %)	56,8 (–8 %)	40,5 (–2 %)	24,9 (+1 %)	16,0 (+1 %)
	СЗР	82,3 (–4 %)	60,0 (–3 %)	41,2 (0 %)	25,0 (+1 %)	16,3 (+3 %)
Высокая доза	Контроль	65,8 (–24 %)	48,5 (–22 %)	38,2 (–8 %)	23,6 (–4 %)	15,3 (–3 %)
	СЗР	62,1 (–28 %)	44,3 (–29 %)	36,0 (–13 %)	23,0 (–7 %)	15,0 (–5 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,3; НСР <sub>05</sub> А = 0,2; НСР <sub>05</sub> В = 0,2; для сочетания факторов АВ = 0,2						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,2; НСР <sub>05</sub> А = 0,2; НСР <sub>05</sub> В = 0,2; для сочетания факторов АВ = 0,2						

\* Для остальных слоев различия незначимы

В контрольном варианте наблюдается максимальное падение легкогидролизуемого азота в верхнем слое почвы (0–20 см), достигающее 49 % при использовании СЗР. Также было зафиксировано дополнительное снижение на 3–5 % из-за угнетения уреазной активности микробиоты под воздействием гербицидов.

Интересно, что при умеренной дозе удобрений уровень  $N_{л.г.}$  стабилизируется на отметке 78,5–82,3 мг/кг, что соответствует снижению на 4–9 %. Механизм этого процесса, как показано в данных, включает в себя увеличение  $N_{л.г.}$  на 3,8 мг/кг благодаря подъемам активности азотфиксации у бобовых культур.

Однако применение высоких доз удобрений привело к противоречивому эффекту: несмотря на внесение азота, наблюдается снижение  $N_{л.г.}$  на 24–29 %. Этот эффект объясняется несколькими механизмами, включая подкисление почвы, нарушение гумификации из-за дисбаланса соотношения углерода и азота, а также ускоренную минерализацию лабильных фракций.

Данные также демонстрируют вертикальную дифференциацию изменения  $N_{л.г.}$ , где интенсивность изменений в слое 0–40 см была в 5–7 раз выше, чем в нижнем слое 41–100 см. В частности, в слое 41–60 см при умеренной дозе удобрений с применением СЗР наблюдается стабилизация  $N_{л.г.}$  на уровне 41,2 мг/кг благодаря миграции растворимых органических соединений.

В обсуждении результатов выделяются два ключевых аспекта. Во-первых, механизмы трансформации  $N_{л.г.}$  показывают баланс минерализации и гумификации: умеренные дозы удобрений способствуют равновесию между разложением органики и синтезом новых соединений, тогда как высокие дозы приводят к значительным потерям  $N_{л.г.}$ . Во-вторых, влияние севооборота и применения удобрений имеет неоднозначный эффект на уровень  $N_{л.г.}$ , что подтверждается наблюдениями за различными культурами.

Таким образом, оптимальным режимом остается применение умеренной дозы удобрений в сочетании с СЗР, что позволяет минимизировать снижение  $N_{л.г.}$  до 4–9 % и способствует активизации азотфиксаторов. Высокие дозы азота оказываются неэффективными для сохранения  $N_{л.г.}$ , что подтверждает теорию насыщения азота. Также стабилизация глубоких горизонтов (41–100 см) свидетельствует об

их буферной роли, где изменения  $N_{д.г.}$  остаются статистически незначительными.

Фосфор, в силу высокой химической активности, в природе встречается исключительно в форме соединений, преимущественно фосфатов кальция, в гидро- и литосфере. Будучи критически важным для живых организмов, в атмосфере практически отсутствует. Почвенный цикл фосфора включает трансформацию органических соединений в неорганические фосфаты под воздействием фосфат-солубилизирующих микроорганизмов (фосфобактерий). Растения усваивают высвобожденные фосфаты, становясь источником элемента для животных. После отмирания организмов или в результате метаболизма животных органические соединения фосфора возвращаются в почву, завершая цикл. Особенностью круговорота фосфора является его относительно низкая замкнутость, что обусловлено существенным выносом элемента в океанические системы с последующей седиментацией. Дополнительно, отмечается сравнительно низкая скорость миграции фосфора в почвенной среде и водных экосистемах. Интенсификация аграрной деятельности привела к значительному увеличению концентрации фосфорных соединений в почвах в результате широкого применения фосфорсодержащих удобрений (Акимова А.С., 2023).

Общий фосфор, или валовое содержание фосфора, отражает совокупность органических и минеральных соединений фосфора, присутствующих в почве. В верхних горизонтах почвенного профиля концентрация общего фосфора, как правило, существенно выше, чем в нижележащих слоях. Этот феномен обусловлен целым рядом взаимосвязанных факторов. Во-первых, основная масса фосфора поступает в верхние слои почвы с растительным опадом и органическими остатками. Во-вторых, корневые системы растений и микроорганизмы играют важную аккумулятивную роль, поглощая фосфор из почвенного раствора и концентрируя его в своей биомассе, которая впоследствии, после отмирания, возвращается в почву. Вместе с тем, концентрация фосфора тесно связана со степенью дисперсности почвенных частиц, достигая максимума в мелкодисперсных фракциях. Наибольшие значения содержания фосфора отмечаются в илистой фракции почвы, представленной частицами размером менее 1 мкм. Это обусловлено чрезвы-

чайно высокой удельной поверхностью илистых частиц, что обеспечивает повышенную сорбционную способность по отношению к фосфат-ионам. Более того, илистые частицы часто обогащены оксидами и гидроксидами железа и алюминия, которые обладают высокой аффинностью к фосфатам и эффективно фиксируют их в почве (Карпова Д.В. и др., 2016).

При попадании фосфора в почвенную среду запускается ряд процессов, приводящих к его фиксации. К ним относятся: биологическая иммобилизация, осуществляемая почвенными микроорганизмами; формирование нерастворимых фосфатных солей с участием двухвалентных металлов, оксидов и гидроксидов алюминия, железа и марганца; а также адсорбция фосфат-ионов на поверхности глинистых минералов и органических коллоидов. В почве непрерывно происходят взаимопревращения между органическими и минеральными формами фосфора, причем значительная часть фосфорных соединений входит в состав сложных органо-минеральных комплексов. Растения способны поглощать фосфор исключительно из почвенного раствора. Для поддержания динамического равновесия между твердой и жидкой фазами почвы часть фосфора, адсорбированного на твердой фазе, переходит в почвенный раствор, обеспечивая доступность элемента для растений (Зайцева Г.А. и Ряскова О.М., 2019).

Длительный полевой опыт на черноземе выщелоченном позволил четко выявить влияние систем минерального питания и применения средств защиты растений на динамику содержания подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) в почвенном профиле. Данные, представленные в Таблице 10 (Приложения 14,15), демонстрируют следующие закономерности:

В контрольных вариантах, где удобрения не вносились, наблюдается значительное снижение  $P_2O_5$  в пахотном слое (0–20 см и 21–40 см), достигающее 39–46 %, что связано с интенсивным выносом фосфора культурами без восполнения, причем СЗР усиливают этот вынос на 7–8 % из-за повышения урожайности. Умеренные дозы удобрений позволяют поддерживать баланс фосфора, но эффект нивелируется применением СЗР, из-за увеличивающейся продуктивности культур. Высокие дозы удобрений приводят к накоплению  $P_2O_5$  в слое 0–40 см (до +40 %),

однако эффект СЗР снижает накопление на 8–9 % из-за максимального выноса фосфора с урожаем. В глубоких слоях (41–100 см) статистически значимых изменений не выявлено, что указывает на слабую подвижность фосфатов в черноземах и неспособность удобрений и СЗР компенсировать вынос фосфора ниже 40 см.

Таблица 10 – Влияние средств химизации на содержание  $P_2O_5$  и изменение его во времени

Вариант		Содержание $P_2O_5$ , мг/100 г почвы (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	9,5 (–39 %)	8,2 (–36 %)	8,0 (–23 %)	5,9 (–11 %)	2,7 (–10 %)
	СЗР	8,3 (–46 %)	7,6 (–41 %)	7,9 (–24 %)	5,9 (–11 %)	2,7 (–10 %)
Умеренная доза	Контроль	16,5 (+6 %)	13,0 (–2 %)	10,3 (–1 %)	6,5 (–2 %)	2,7 (–10 %)
	СЗР	15,2 (–2 %)	12,4 (–3 %)	9,5 (–8 %)	5,5 (–17 %)	2,6 (–13 %)
Высокая доза	Контроль	21,8 (+40 %)	16,2 (+27 %)	9,7 (–7 %)	5,9 (–11 %)	2,6 (–13 %)
	СЗР	20,4 (+32 %)	15,2 (+19 %)	9,7 (–7 %)	5,7 (–14 %)	2,6 (–13 %)
Слой почвы 0–20 см:						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 0,6; НСР <sub>05</sub> А = 0,4; НСР <sub>05</sub> В = 0,4; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_{\tau}$						
Слой почвы 21–40 см:*						
НСР <sub>05</sub> ч.р. = 1,3; НСР <sub>05</sub> А = 1,0; НСР <sub>05</sub> В = 0,8; для сочетания факторов АВ $F_{\phi} < F_{\tau}$						

\* Для остальных слоев различия незначимы

При высокой дозе удобрений применение СЗР замедляло процесс интенсивного накопления  $P_2O_5$  в слое 0–40 см, вследствие более высокого выноса урожая. В пахотном слое (0–20 см) прирост содержания фосфора в варианте с СЗР был на 8 % ниже, чем без них. Взаимодействие факторов показывает, что СЗР усиливают вынос фосфора пропорционально дозе удобрений. На основании полученных данных можно сделать вывод, что умеренные дозы удобрений в сочетании с СЗР являются оптимальными для поддержания плодородия почв без эколо-

гических рисков. Мониторинг содержания  $P_2O_5$  в слое 0–40 см является показательным индикатором для оценки фосфатного режима черноземов. Высокие дозы несут риск иммобилизации фосфора и загрязнения экосистем, в то время как СЗР, повышая эффективность использования фосфора растениями, снижают его остаточное содержание в почве при высоких дозах удобрений. Сбалансированное управление фосфорным питанием требует учета синергии агротехнических и биологических факторов.

Для оценки плодородия чернозема выщелоченного важно изучение трансформации подвижных форм калия ( $K_2O$ ). Калий – важнейший макроэлемент, играющий ключевую роль в водном питании растений, особенно при интенсивном применении азотных и фосфорных удобрений. Коррекция калийного режима способствует улучшению зерновых культур, а недостаток калия замедляет синтез белка и вызывает накопление небелковых компонентов в растениях. В почве калий сосредоточен в глинистых частицах, где адсорбируется. Основным источником калия для растений – его поглощенная форма (50–300 мг/кг почвы). При внесении калийных удобрений большая часть элемента переходит в поглощенное состояние, обеспечивая доступность для растений. Незначительное количество калия (1–5 мг/кг почвы) присутствует в почвенном растворе в форме солей различных кислот (Замятин С.А. и Измestьев В.М., 2023).

Поглощение калия растениями происходит не только из верхнего, богатого гумусом горизонта, но и из более глубоких почвенных слоев. Хорошо развитая корневая система, в сочетании с достаточным плодородием нижних горизонтов, обеспечивает более глубокое проникновение корней, что, в свою очередь, увеличивает доступность калия из слоя 20–40 см.

Тем не менее, недостаток фосфора и азота в почве может ограничивать усвоение калия, даже при его значительном содержании, что негативно сказывается на урожайности. В таких условиях, оптимальное использование доступного калия лимитируется другими абиотическими факторами, такими как pH почвы, концентрации ионов кальция и магния, уровень влаго- и теплообеспеченности, а также интенсивность фотосинтетически активной радиации. В то же время, избыток подвижных

форм калия может вызывать ухудшение физических свойств почвы, включая увеличение дисперсности и снижение водопроницаемости. Указанные взаимосвязи служат важными индикаторами плодородия почвы (Сафонов А.Ф. и др., 2006).

Динамика содержания обменного калия в черноземе выщелоченном под влиянием минеральных удобрений и средств защиты растений за 37-летний период исследования представлена в Таблице 11 (Приложения 16,17).

Таблица 11– Влияние средств химизации на содержание  $K_2O$  и изменение его во времени

Вариант		Содержание $K_2O$ , мг/100 г почвы (изменение за период 1987–2024 гг., отн. %)				
Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Слой почвы, см				
		0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Без удобрений (контроль)	Контроль	7,8 (–35 %)	8,7 (–28 %)	11,3 (–10 %)	13,4 (–4 %)	14,2 (–2 %)
	СЗР	7,0 (–42 %)	7,9 (–34 %)	10,5 (–16 %)	13,1 (–6 %)	14,2 (–2 %)
Умеренная доза	Контроль	13,4 (+12 %)	13,1 (+9 %)	12,7 (+2 %)	13,8 (–1 %)	14,3 (–1 %)
	СЗР	14,1 (+18 %)	13,6 (+13 %)	13,1 (+5 %)	13,8 (–1 %)	14,3 (–1 %)
Высокая доза	Контроль	14,3 (+19 %)	13,7 (+14 %)	13,5 (+8 %)	14,4 (+3 %)	14,2 (–2 %)
	СЗР	14,7 (+22 %)	14,0 (+17 %)	13,8 (+10 %)	14,4 (+3 %)	14,2 (–2 %)
Слой почвы 0–20 см:						
$HCP_{05}$ ч.р. = 0,5; $HCP_{05}$ А = 0,4; $HCP_{05}$ В = $F_{\phi} < F_T$ ; для сочетания факторов АВ = 0,3						
Слой почвы 21–40 см:*						
$HCP_{05}$ ч.р. = 0,4; $HCP_{05}$ А = 0,3; $HCP_{05}$ В = $F_{\phi} < F_T$ ; для сочетания факторов АВ = 0,3						

\* Для остальных слоев различия незначимы

Исследование динамики калия в черноземе выявило, что при отсутствии удобрений происходит значительная деградация пахотного слоя, с максимальным истощением  $K_2O$  до 42 % в слое 0–20 см. Применение средств защиты растений усиливает вынос  $K_2O$  на 6–7 % из-за повышения продуктивности культур. Внесение умеренных доз удобрений стабилизирует содержание  $K_2O$ , компенсируя вынос на 9–12 % без СЗР и на 13–18 % с СЗР, при этом СЗР повышают эффективность усвоения калия на 4–5 %. Высокие дозы удобрений приводят к умеренному

росту  $K_2O$  на 14–22 % без признаков гипернакопления, что обусловлено буферной ёмкостью чернозема. СЗР усиливают эффект удобрений, увеличивая содержание  $K_2O$  на 3–5 % в слое 0–40 см. Изменения в основном происходят в слое 0–40 см, где сосредоточена основная корневая масса, а ниже 40 см динамика незначительна из-за миграции ионов  $K^+$  и буферных свойств почвы. Умеренные дозы удобрений компенсируют вынос, а высокие обеспечивают накопление 15–25 % от внесённого. СЗР интенсифицируют вынос  $K_2O$  в контроле за счёт повышения урожайности, а при удобрении улучшают фитосанитарное состояние, усиливая использование почвенного  $K_2O$ . Высокая буферность чернозема ограничивает рост  $K_2O$  при высоких дозах, предотвращая гипернакопление, а градиент снижения динамики с глубиной соответствует зоне аэрации и иллювиированию.

Низкий эффект СЗР в глубоких слоях объясняется ограниченным воздействием агрохимикатов ниже корнеобитаемой зоны.

Динамика NPK в почве зависит от режима внесения удобрений и пестицидов, с максимальной изменчивостью в верхних слоях. Легкогидролизуемый азот чувствителен к дисбалансу: умеренные дозы удобрений с СЗР поддерживают оптимальный уровень, активизируя азотфиксацию, тогда как высокие дозы могут снижать  $N_{д.г.}$  из-за подкисления. Фосфор характеризуется низкой подвижностью – оптимален умеренный режим удобрений без СЗР. Высокие дозы фосфорных удобрений приводят к накоплению, но СЗР усиливают вынос. Калий лучше усваивается при высоких дозах удобрений с СЗР, увеличивая его содержание в верхнем слое. Вариант без удобрений (контрольный) ведет к деградации NPK-потенциала. СЗР увеличивают вынос элементов за счет повышения урожайности, но в сочетании с удобрениями оптимизируют усвоение. Для устойчивого плодородия чернозема рекомендуется умеренно-интенсивная система, включающая умеренные дозы минеральных удобрений в сочетании с применением СЗР, минимизирующая экологические риски вымывания нитратов и иммобилизации фосфора. Для наглядности изменения обеспеченности почв основными элементами питания были рассчитаны индексы содержания N, P и K в активной корнеобитаемой зоне (0–40 см), где за 100 % принят уровень 1987 года (Рисунок 1).

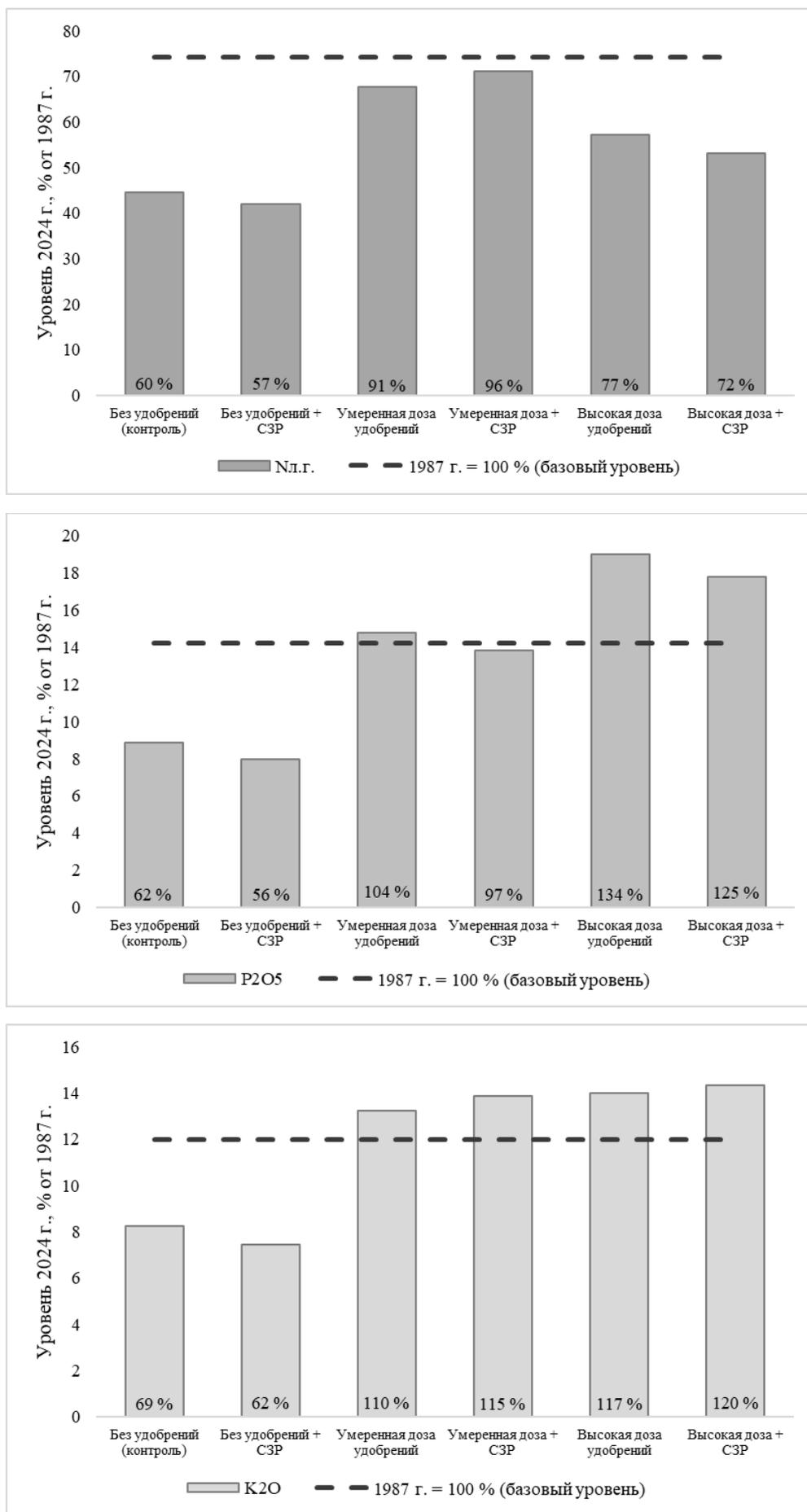


Рисунок 1 – Индексное сравнение содержания НРК (0–40 см, 1987 и 2024 гг.)

При анализе динамики содержания основных питательных элементов за период 1987–2024 гг. установлено, что изменения носили разнонаправленный характер и напрямую зависели от применяемой системы химизации. Сравнение с исходным уровнем (принятым за 100 %) показало, что содержание легкогидролизуемого азота претерпело наиболее значительные изменения. В контрольных вариантах без применения удобрений, а также при использовании высоких их доз произошло резкое снижение данного показателя – до 56–77 % от исходного значения, что свидетельствует о существенной дегумификации и истощении азотного фонда почвы. Единственным вариантом, позволившим сохранить азотный потенциал близким к исходному (96 %), стало внесение умеренной дозы удобрений в сочетании со средствами защиты растений.

Динамика фосфора и калия оказалась принципиально иной. Содержание подвижного фосфора при внесении умеренных и высоких доз удобрений не только сохранилось, но и превысило исходный уровень на 3–34 %, достигнув максимума в варианте с высокой дозой без СЗР. В то же время в контроле его запасы истощились почти вдвое (до 56–62 %). Содержание обменного калия также значительно возросло (до 110–120 % от исходного) на всех вариантах с применением удобрений, в то время как в их отсутствие наблюдалось снижение до 62–69 %.

Таким образом, длительное применение удобрений позволило не только компенсировать, но и повысить фосфорный и калийный фонд почвы. Однако для сохранения азотного потенциала критически важен сбалансированный подход: высокие дозы азотных удобрений без защиты растений оказались неэффективными и привели к значительным потерям азота, тогда как умеренная система химизации продемонстрировала оптимальный результат.

#### **4 УРОЖАЙНОСТЬ ЗВЕНА СЕВООБОРОТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ**

За прошедшие три десятилетия наблюдалось резкое сокращение использования минеральных удобрений, что, в свою очередь, обусловило значительное падение продуктивности сельскохозяйственных культур. В настоящее время в агропромышленном комплексе большинства регионов отмечается существенный дефицит макро- и микроэлементов в почве, а рентабельность их применения, выраженная в растениеводческой продукции, остается на низком уровне.

Дисбаланс в минеральном питании оказывает негативное воздействие на иммунную систему растений. Как следствие, возрастает их восприимчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, патогенам и вредителям. Обеспечение формирования качественного урожая сельскохозяйственных культур, поддержание оптимального фитосанитарного состояния почв и растений достигается посредством научно обоснованного применения агрохимикатов и средств защиты растений, включая определение оптимальных дозировок, сроков и способов их внесения (Рысев М.Н. и др., 2019).

Первостепенной целью агропромышленного сектора России является обеспечение населения высококачественными и экологически безопасными продуктами питания в необходимом ассортименте. Для достижения запланированных показателей урожайности и качества продукции основополагающим фактором является поддержание сбалансированного биологического цикла веществ в агроэкосистеме. Несмотря на обширные долгосрочные исследования эффективности удобрений, недостаточно изучены последствия длительного комплексного применения удобрений в сочетании с химическими средствами защиты растений. Значительным препятствием на пути повышения урожайности сельскохозяйственных культур и эффективности удобрений является высокая степень засоренности посевов, поражение растений вредителями и болезнями, а также полегание зерновых при интенсивном минеральном питании (Карашаева А.С. и др., 2023).

#### **4.1 Урожайность однолетних трав при длительном применении средств химизации**

Реализация потенциала агроклиматических ресурсов и интенсификация сельскохозяйственного производства являются актуальными задачами на современном этапе научного и практического земледелия. Одним из перспективных подходов к их решению выступает внедрение поливидовых посевов. Эффективно спланированные смешанные травостой обеспечивают стабилизацию продуктивности агроэкосистем и повышают питательную ценность и разнообразие кормовой базы для животноводства (Ельчанинова Н.Н. и др., 2009). В частности, сочетание зерновых злаковых и бобовых культур в составе поливидовых посевов представляет собой значимый источник высококачественного корма, отличающегося сбалансированным аминокислотным составом. Использование поликультурных смесей позволяет повысить урожайность на 20–30 % по сравнению с монокультурами, за счет синергетического эффекта и улучшения использования ресурсов (Бурлака В.А. и Чепрасов И.В., 2006).

Викоовсяная смесь представляет собой ценный компонент в питании жвачных животных и играет важную роль как предшественник для яровых и озимых культур. Внедрение комплексного подхода, включающего применение средств защиты растений и варьирующихся доз минеральных удобрений в агротехнику возделывания викоовсяной смеси, адаптированного к конкретным природно-климатическим условиям, способно существенно улучшить качественные характеристики зеленой массы этих культур. Данная стратегия позволяет оптимизировать условия роста и развития растений, повысить их резистентность к патогенам и вредителям, а также увеличить урожайность и питательную ценность производимого корма. Многочисленные научные исследования убедительно демонстрируют, что уровень минерального питания оказывает значительное влияние, как на продуктивность сельскохозяйственных культур, так и на качественные характеристики конечной продукции (Берсенев В.Н., 2013; Камнева О.П., 2016; Кузьминых А.Н. и Пашкова Г.И., 2017).

Выращивание однолетних травяных культур не требует существенных затрат на применение минеральных удобрений. Присутствующая в составе смеси яровая вика характеризуется симбиотической азотфиксацией, в результате которой происходит увеличение содержания органического азота в почве. Согласно исследованиям, викоовсяная смесь способна повышать уровень органического азота в почве на 50–70 кг за один вегетационный период (Курбонов Ф.О., 2017). Этот процесс обусловлен деятельностью клубеньковых бактерий *Rhizobium leguminosarum* на корнях вика, преобразующих атмосферный азот в формы, доступные для растений и обогащающие этим элементом почву после разложения растительных остатков.

Существует корреляционная взаимосвязь между морфологическими показателями полевых культур и их урожайностью. Влияние доз минеральных удобрений и средств защиты растений на структуру урожая викоовсяной смеси представлено в Таблице 12 (Приложения 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24).

Таблица 12 – Влияние средств химизации на количество, высоту растений и урожайность викоовсяной травосмеси на зеленый корм (в среднем за 2008, 2016, 2023 гг.)

Вариант		Показатель				Биологическая урожайность в среднем за 3 года, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество растений, шт./м <sup>2</sup>		Высота растений, см		по опыту	по фактору	
		вики	овса	вики	овса		А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	139	144	69,8	70,0	14,0	14,4	19,0
	СЗР	142	148	74,3	72,6	14,8		
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	150	156	77,6	79,1	18,8	19,8	20,3
	СЗР	152	159	82,7	82,7	20,6		
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	156	164	89,7	86,8	24,1	24,9	20,3
	СЗР	161	167	94,4	89,7	25,6		
НСР <sub>05</sub> ч. р.		5	5	3,3	3,1	0,2		
НСР <sub>05</sub> А		4	4	2,7	2,7	0,1		
НСР <sub>05</sub> В		2	3	2,2	2,1	0,1		
Для сочетания факторов АВ		F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,1		

Нашими исследованиями установлено, что наибольшая урожайность зеленой массы была получена в 2008 г. В этот вегетационный период природно-климатические условия были оптимальными: сумма осадков за май–июль составила 182 мм, а гидротермический коэффициент достигал 1,59. На вариантах с высокой дозой минеральных удобрений урожайность превысила контроль почти в два раза, а при сочетании удобрений и средств защиты растений – более чем в два раза (98–111 %). Существенно улучшались и показатели структуры урожая: высота растений возрастала на 25–28 %, а густота стояния – на 15–18 % по сравнению с контролем.

В 2016 г. условия были неблагоприятными: осадков выпало на 29 % меньше, чем в 2008 г. (129 мм), а ГТК снизился до 0,8, что характеризует сезон как слабозасушливый. Это привело к резкому снижению урожайности, на контроле она не превышала 11–12 т/га. Однако внесение высокой дозы удобрений позволило увеличить сбор зеленой массы на 31–43 %, тогда как умеренные дозы и применение СЗР обеспечивали лишь ограниченную прибавку. Структурные показатели также реагировали на агрохимический фон: высота растений и густота стояния увеличивались на 20–30 % относительно контроля, но оставались значительно ниже уровня 2008 г.

Урожайность в 2023 г. имела промежуточное положение между высокоурожайным 2008 и засушливым 2016 гг. Природно-климатические условия в этом году были близки к оптимальным (ГТК – 1,42, осадки – 217 мм). Урожайность на контроле составила 12,2 т/га, тогда как внесение высокой дозы удобрений обеспечило прибавку около 9 т/га (74 %). Средства защиты растений в целом оказали слабое влияние, увеличив урожайность лишь на 1–4 %. Однако при умеренной дозе удобрений их применение дало значимый результат: дополнительно 3,9 т/га, или 25 % к контролю этого варианта, что в пересчёте на абсолютный контроль составило 58 %. По структуре посевов отмечалось повышение густоты стояния примерно на 10–12 % и увеличение высоты растений на 25 %.

В среднем за три года урожайность зеленой массы однолетних трав на контроле составила 14 т/га. Внесение умеренной дозы удобрений обеспечивало

прирост продуктивности викоовсяной смеси на треть (34–38 %), а высокая доза – более чем на две трети (71–78 %) относительно контроля. Средства защиты растений активизировали действие удобрений, но их влияние оставалось второстепенным, прибавка варьировала в пределах 5–10 %. Показатели структуры урожая подтверждали доминирующее влияние минерального питания: густота стояния при максимальном агрохимическом фоне увеличивалась на 16–19 %, а высота растений возрастала почти на треть.

Таким образом, решающим фактором формирования структуры урожайности викоовсяной смеси являлось минеральное питание. Средства защиты растений выполняли вспомогательную функцию, усиливая действие удобрений, но их эффект был менее выраженным. Наибольшая эффективность достигалась при сочетании высокой дозы удобрений и СЗР, что обеспечивало повышение урожайности однолетних трав более чем на 80 % и заметное улучшение структуры посевов по сравнению с контролем.

Что касается качества культуры, отметим, что оно играет значимую роль в достижении высокой продуктивности. Ключевые показатели, такие как содержание сырой клетчатки, сырой золы и сырого протеина, служат определяющими факторами питательной ценности викоовсяной смеси как кормовой культуры. Эти компоненты оказывают существенное влияние не только на пищевую ценность, но и на технологические аспекты производства кормов, включая сохранность нутриентов и степень усвояемости животными (Елисеев С.Л., 2010).

Данные, представленные в таблице 13 (Приложения 36, 37, 38) показывают, что увеличение доз удобрений приводит к увеличению содержания протеина, золы и клетчатки. Максимальное содержание протеина (23,4 %) и золы (9,8 %) наблюдалось при применении высокой дозы удобрений, совместно со средствами защиты в оптимальных погодных условиях (2023 г.). Влияние СЗР выражалось в стабильном увеличении содержания протеина на 0,3–1,5 % и клетчатки на 0,3–0,9 %, особенно заметном при высоких дозах удобрений. Клетчатка возрастала на 6–15 % с увеличением доз удобрений. Погодные условия оказывали существенное влияние: оптимальные условия приводили к увеличению содержания протеина на

23,2 % по сравнению с контролем, засуха – к снижению на 8–12 %, а переувлажнение – к минимальному содержанию золы (до 9,5 %).

Таблица 13 – Влияние средств химизации на качественные показатели викоовсяной смеси, в среднем за (в среднем за 2008, 2016, 2023 гг.), %

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырая зола
Без удобрений (контроль)	Контроль	18,5	28,1	7,8
	СЗР	18,7	28,4	8,0
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	19,2	28,9	8,3
	СЗР	19,9	29,5	8,7
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	20,8	30,3	9,1
	СЗР	22,3	30,7	9,6
НСП <sub>05</sub> ч. р.		0,5	0,2	0,4
НСП <sub>05</sub> А		0,4	0,2	0,3
НСП <sub>05</sub> В		0,3	0,2	0,3
Для сочетания факторов АВ		0,2	Fφ<Fт	Fφ<Fт

Эти показатели качества критически важны для здоровья и продуктивности сельскохозяйственных животных, особенно КРС. Клетчатка стимулирует жевательную активность и поддерживает здоровье рубца, обеспечивая эффективное переваривание корма и усвоение нутриентов, что влияет на этологию животных и качество продукции (молока). Сырая зола отражает содержание необходимых минералов (P, Ca, Mg), обеспечивающих активность, рост и развитие организма. Сырой протеин является источником аминокислот, необходимых для метаболических процессов, поддержания здоровья и достижения максимальной продуктивности. Дефицит протеина приводит к метаболическим нарушениям и снижению продуктивности. Оценка этих показателей важна для экономической эффективности сельскохозяйственного производства, поскольку качество кормления напрямую связано со здоровьем и продуктивностью животных (Чухина О.В. и др., 2011).

Данные результаты подчёркивают важность оптимизации дозировок удобрений и применения СЗР для улучшения минерального состава кормовых культур.

#### **4.2 Урожайность озимой пшеницы при длительном применении минеральных удобрений и средств защиты растений**

Увеличение продуктивности посевов *Triticum aestivum* L. имеет первостепенное значение для поддержания стабильности аграрного сектора и уменьшения импортной зависимости в зерновом сегменте пищевой промышленности, что, в свою очередь, стимулирует экономический рост и повышает уровень жизни населения. Формирование урожайности зерновых культур детерминировано комплексом взаимосвязанных компонентов структуры урожая, подверженных влиянию различных агротехнических мероприятий. Оптимизация данных агротехнических приемов, таких как сроки посева, нормы высева, применение удобрений и средств защиты растений, позволяет добиться значительного увеличения урожайности и улучшения качественных показателей зерна (Силяева Е.С., 2019; Дудкина Т.А., 2023).

Для реализации потенциала урожайности и обеспечения высоких качественных характеристик зерна озимой пшеницы, необходимо поддерживать оптимальное питание растений на всех этапах онтогенеза. Защита посевов от фитопатогенов является определяющим фактором в контексте достижения максимальной продуктивности, учитывая, что ущерб от болезней, по данным ряда исследований, может достигать критических значений, превышая 40 % от потенциального урожая (Федюшкин А.В. и др., 2017; Запрометова Л.В. и Бакаева Н.П., 2024). Достижение высокой урожайности озимой пшеницы неразрывно связано с точным соблюдением технологических регламентов применения современных пестицидов, которые должны соответствовать требованиям экологической безопасности и обеспечивать отсутствие остаточных количеств в зерновой продукции (Догадина М.А. и др., 2023).

Использование передовых агротехнических приемов при культивации озимой пшеницы позволяет достичь не только повышенной продуктивности, но и соответствия зерна заданным стандартам качества (Зеленский Н.А. и Текиева М.И., 2012). Однако, игнорирование агрономических предписаний способно спровоцировать ряд неблагоприятных эффектов, которые, в свою очередь, приводят к снижению числа зерен в колосе (образование пустоколосицы). Данное явление негативно отражается на валовом сборе, ухудшая как количественные, так и качественные показатели. Следовательно, неукоснительное соблюдение агрономических регламентов является критически важным фактором для рентабельного производства озимой пшеницы (Бахвалова С.А. и др., 2023).

Формирование урожайности зерновых культур определяется комплексом взаимосвязанных элементов, на структуру которых значительное воздействие оказывают агротехнические мероприятия (Ковтун В.И., 2014). Рациональное применение удобрений с учетом потребностей культуры, стимулирует развитие озимой пшеницы и способствует формированию оптимальной структуры урожая, нивелируя негативное влияние неблагоприятных метеорологических условий (Гоман Н.В. и др., 2016).

Применение удобрений оказывает благоприятное воздействие на урожайность озимой пшеницы, поскольку со временем в большинстве почв наблюдается истощение запасов биодоступных элементов питания, часто представленных в труднорастворимых формах, слабо усваиваемых растениями. Дополнительным фактором является недостаточная физиологическая активность корневой системы пшеницы, ограничивающая поглощение питательных веществ. Внесение удобрений способствует существенному повышению урожайности пшеницы на различных типах почв, что, в конечном счете, приводит к увеличению общей продуктивности данной сельскохозяйственной культуры. Это особенно важно в условиях интенсивного земледелия, где вынос питательных веществ с урожаем превышает их естественное восполнение (Гамаюнова В.В. и Смирнова И.В., 2017).

Урожайность озимой пшеницы зачастую лимитируется фитопатологическими факторами. Ежегодное поражение посевов комплексом заболеваний, в со-

четании с расширением ареала распространения патогенов, представляет собой серьезную агрономическую проблем. Данная ситуация обусловлена как увеличением популяции патогенных микроорганизмов, развитием резистентности к фунгицидам и адаптационными способностями, так и культивированием восприимчивых сортов (Пасько Т.И., 2018).

Ухудшение плодородия почвы и дефицит макро- и микроэлементов ослабляют растения в период вегетации, что, в свою очередь, повышает восприимчивость к патогенам и приводит к угнетению ростовых процессов и развития (Huber D.M., Jones J.B., 2012; Pike V.L. et al., 2019; Tripathi D. et al., 2022). В связи с этим, возрастает актуальность интегрированных систем защиты растений, обеспечивающих эффективный контроль фитосанитарного состояния агроценоза, одновременно минимизируя экономические затраты на химические обработки и снижая пестицидную нагрузку на окружающую среду (Сапожников С.Н., 2019; Recenka J.R. et al., 2021; Zhou W., 2024).

Потенциальное снижение рентабельности, обусловленное возрастающими расходами на минеральные удобрения и увеличением норм их внесения, может быть нивелировано посредством реализации эффективных стратегий защиты сельскохозяйственных культур от фитопатогенов и вредных насекомых. Использование агрохимикатов, включая пестициды и фунгициды, является определяющим фактором в обеспечении устойчивых показателей урожайности и достижения высоких стандартов качества сельскохозяйственной продукции. При этом, необходимо учитывать потенциальное воздействие химических средств защиты растений на агробиоценоз и разрабатывать стратегии интегрированной защиты растений, сочетающие химические и биологические методы контроля (Тютчев С.Л., 2016).

Элементы структуры урожая озимой пшеницы формируются под воздействием как агротехнических приёмов, так и погодных условий вегетационного периода (Кошеляев В.В. и др., 2021). Проведённые исследования позволили установить, как минеральные удобрения и средства защиты растений изменяют эти показатели. В Таблице 14 (Приложения 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35)

представлены данные, отражающие характер влияния указанных факторов.

Результаты исследования демонстрируют, что внесение комплексных минеральных удобрений способствует значительному улучшению биометрических характеристик растений. В части озерненности колоса установлено, что применение удобрений в средних и высоких дозах вызывало колебания числа зерен от  $-10\%$  до  $+52\%$  по сравнению с контролем, что во многом зависело от погодных условий конкретного года. Влияние средств защиты растений проявлялось более стабильно, обеспечивая прирост числа зерен в колосе на  $10-25\%$ . Совместное действие факторов усиливало эффект, увеличивая этот показатель до  $75\%$  (вариант  $N_{60}P_{60}K_{40} + СЗР$ ) в 2024 г.

Таблица 14 – Влияние средств химизации на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы (в среднем за 1992, 1999, 2006, 2009, 2024 гг.)

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность в среднем за 5 лет, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	612	24	33,1	2,74	2,95	3,47
	СЗР	649	27	33,6	3,16		
$N_{60}P_{60}K_{40}$	Контроль	696	27	35,5	3,45	3,82	4,08
	СЗР	764	30	36,5	4,18		
$N_{120}P_{120}K_{80}$	Контроль	809	27	37,3	4,23	4,56	4,08
	СЗР	889	29	38,9	4,89		
НСР <sub>05</sub> ч. р.		19	3	1,3	0,18		
НСР <sub>05</sub> А		16	2	1,0	0,15		
НСР <sub>05</sub> В		13	2	$F_{\phi} < F_T$	0,12		
Для сочетания факторов АВ		13	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$		

Масса 1 000 зерен также показала высокую чувствительность к уровню минерального питания: при внесении удобрений она возрастала на  $11-18\%$ . Однако в засушливых условиях 2024 г. статистически значимого эффекта от применения средств химизации не выявлено.

По урожайности максимальные значения были получены в 1999 г., когда благоприятные метеорологические условия способствовали проявлению синергетического эффекта удобрений и средств защиты растений. На варианте с дозой  $N_{120}P_{120}K_{80}$  урожайность достигла 6,68 т/га (на 36 % выше контроля), а при совместном применении удобрений и СЗР – 6,9–7,0 т/га, что соответствовало приросту до 57 %. Минимальные показатели зафиксированы в засушливые годы (1992 и 2009 гг.), когда урожайность снижалась до 3,3–3,4 т/га. В 2024 г. при низком уровне увлажнения ( $ГТК = 0,61$ ) урожайность без удобрений составила 2,66–3,03 т/га, тогда как применение  $N_{120}P_{120}K_{80}$  и СЗР обеспечило 5,52 т/га.

В среднем за пятилетний период урожайность на контроле составила 2,75 т/га. Использование средств защиты растений на неудобренном фоне дало прибавку 0,41 т/га (15 %), внесение умеренной дозы удобрений – 0,7 т/га (25 %), а совместное их применение – 1,43 т/га (52 %). Максимальный эффект обеспечила высокая доза удобрений: прибавка составила 1,48 т/га (54 %), а в комбинации с СЗР – 2,14 т/га (78 %).

Длительное использование увеличивающихся объемов минеральных удобрений и химических средств защиты растений в рамках лизиметрического исследования дает возможность определить воздействие изучаемых факторов, а также метеорологических условий на продуктивность озимой пшеницы в различные периоды ротации, определяемые хронологически (Рисунок 2).

При анализе корреляции между среднегодовой урожайностью зерна озимой пшеницы, полученной в опыте, и количеством осадков в течение летней вегетации, установлена умеренная зависимость ( $r = 0,53$  при значениях от 95 до 159 мм;  $F_{\phi} = 18,6$ ;  $F_T = 10,1$ ).

Однако, годовое суммарное количество осадков в годы выращивания озимой пшеницы продемонстрировали сильную положительную корреляцию с урожайностью ( $r = 0,89$  при значениях от 347 до 612 мм;  $F_{\phi} = 38,2$ ;  $F_T = 10,1$ ). Данный факт указывает на то, что осадки, выпадающие летом, усиливают благоприятное воздействие запасов влаги, накопленных в осенне-зимний период, на формирование урожая.

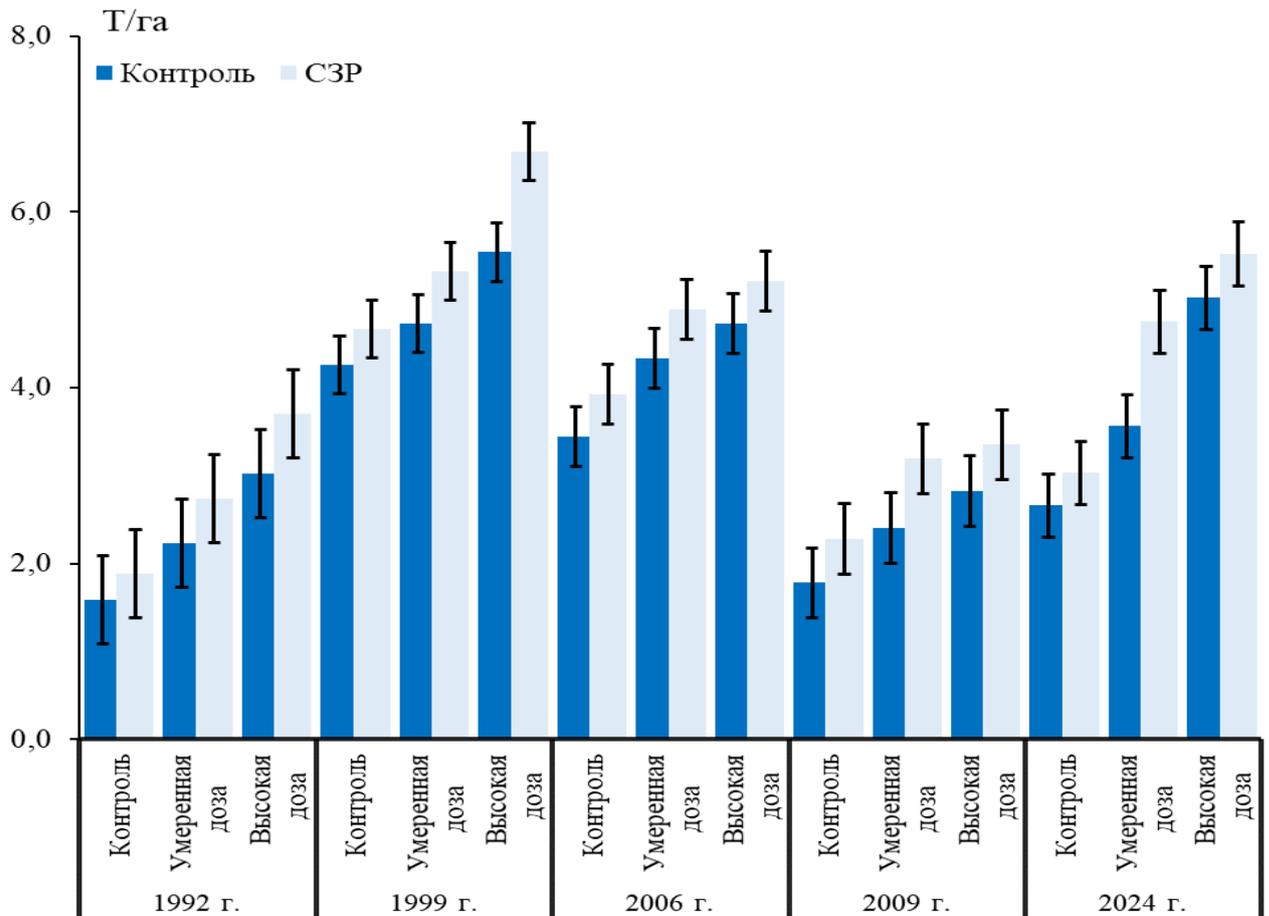


Рисунок 2 – Влияние длительного применения минеральных удобрений и средств защиты на урожайность озимой пшеницы  
 $HCP_{ч.р. 1992 г.} = 0,50 т/га$ ;  $HCP_{ч.р. 1999 г.} = 0,33 т/га$ ;  $HCP_{ч.р. 2006 г.} = 0,34 т/га$ ;  
 $HCP_{ч.р. 2009 г.} = 0,40 т/га$ ;  $HCP_{ч.р. 2024 г.} = 0,36 т/га$

Уровень урожайности зерна озимой пшеницы демонстрировал слабую зависимость от температурного режима в летний период вегетации ( $r = 0,37$  при значениях от 519 до 729 °С активных температур;  $F_{\phi} = 25,9$ ;  $F_T = 10,1$ ). Коэффициент корреляции между данными об урожайности и гидротермическим коэффициентом составил 0,7. Некоторое снижение данного показателя обусловлено влиянием температурного режима весной и летом.

Анализ долевого участия факторов (Рисунок 3) выявил, что определяющее воздействие на продуктивность озимой пшеницы оказывают агроклиматические условия на протяжении вегетационного периода и применение удобрений.

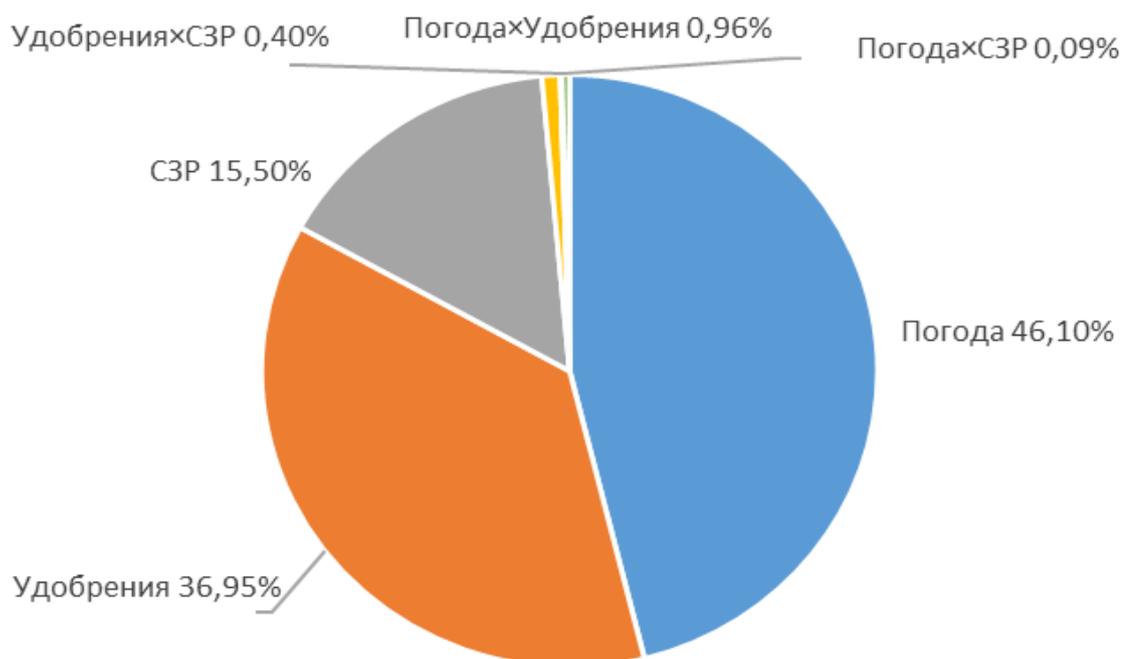


Рисунок 3 – Долевое участие факторов и их взаимодействий в формировании урожая озимой пшеницы

Использование агрохимикатов для защиты растений оказывает заметное воздействие на продуктивность сельскохозяйственных культур. Однако, согласно результатам исследований, их вклад в формирование урожайности зерна озимой пшеницы в условиях региона значительно уступает влиянию минеральных удобрений и метеорологических факторов, и эта разница достигает до 2–3 раз. При этом, взаимодействие между различными факторами оказывает незначительное влияние, не превышающее 1 % от общей дисперсии урожайности.

Анализ статистической модели выявил значимое влияние, как погодных условий, так и технологических приемов возделывания на урожайность озимой пшеницы (Таблица 15).

Расчеты показывали, что в среднем каждый миллиметр осадков, выпавших в летний период, обеспечивало увеличение урожайности на 19 кг/га, а каждые 10 °С эффективных температур – на 30 кг. В осенне-зимний период каждый миллиметр осадков способствовал увеличению урожайности на 1 кг/га.

Таблица 15 – Смешанная линейная модель влияния погодных условий, удобрений и средств защиты растений на урожайность озимой пшеницы, т/га

Переменные модели	Коэффициенты модели	Стандартное отклонение	$t_{\phi}$
Независимая переменная	- 4,783	0,451	10,5
Осадки осенне-зимний период, мм	+ 0,001	0,001	13,4
Осадки летнего периода, мм	+ 0,019	0,002	10,1
Сумма эффективных температур, °С	+ 0,003	0,001	5,17
Умеренная доза удобрений	+ 0,706	0,165	4,28
Высокая доза удобрений	+ 1,483	0,165	9,00
Средства защиты растений (СЗР)	+ 0,412	0,165	2,50
Умеренная доза удобрений × СЗР	+ 0,318	0,232	1,36
Высокая доза удобрений × СЗР	+ 0,253	0,232	1,08

\* $R^2$  модели = 0,97;  $t_{05} = 2,12$

Расширение посевов озимой пшеницы требует не только повышения продуктивности, но и улучшения качественных характеристик зерна. Актуальные агротехнические приемы должны содержать элементы, обеспечивающие резистентность растений к абиотическим и биотическим стрессорам, а также их адаптацию к изменяющимся условиям окружающей среды. Реализация указанных задач осуществима посредством технологических подходов, включающих оптимизацию минерального питания путем внесения сбалансированных удобрений, а также осуществление мероприятий по защите растений от вредителей, болезней и сорняков (Ерошенко Ф.В. и др., 2020).

Содержание протеина – один из важнейших показателей, определяющих качество зерна. Дефицит белка или его недостаточная биологическая ценность в рационах кормления могут спровоцировать повышенное потребление кормов и, как следствие, увеличение себестоимости продукции животноводства (Пынтиков С.А. и др., 2021).

В Таблице 16 (Приложения 39, 40, 41, 42, 43) представлено влияние различных схем применения средств химизации на биохимический состав зерна озимой пшеницы. Анализ качественных показателей зерна озимой пшеницы установил, что уже при средней дозе минеральных удобрений уровень протеина в зерне воз-

растал на 0,5–1,0 % по сравнению с контролем, а при высокой дозе – на 0,7–1,4 %.

Таблица 16 – Влияние средств химизации на качественные показатели зерна озимой пшеницы (в среднем за 1992, 1999, 2006, 2009, 2024 гг.), %

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	11,9	3,53	2,25
	СЗР	12,3	3,42	2,20
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	12,7	3,38	2,16
	СЗР	13,1	3,34	2,12
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	13,8	3,30	2,06
	СЗР	14,2	3,29	1,97
НСП <sub>05</sub> ч. р.		0,3	0,05	0,04
НСП <sub>05</sub> А		0,3	0,04	0,03
НСП <sub>05</sub> В		0,2	0,04	0,02
Для сочетания факторов АВ		0,1	0,04	0,02

Дополнительное применение средств защиты растений усиливало этот эффект в среднем на 0,1–0,3 %, причём наиболее выраженная синергия проявлялась при высокой дозе удобрений в 2009 и 2024 гг. Азот стимулирует синтез аминокислот в эндосперме, перераспределяя углерод из крахмала в белковые фракции (Mandal S., Verma A.K., 2021).

Параллельно с ростом протеиновой фракции многолетнее внесение удобрений неизменно приводило к снижению доли сырой клетчатки и жира. При средней дозе клетчатка уменьшалась на 0,12–0,22 %, при высокой – на 0,12–0,32 %; применение средств защиты растений дополнительно сокращало её на 0,1–0,2 %, причём к 2024 г. этот эффект обеспечил снижение клетчатки до 3,3 % против 3,7 % в контроле. Аналогичная динамика наблюдалась и для сырого жира: средняя доза удобрений снижала его на 0,1–0,2 %, высокая – на 0,2–0,4 %, а сочетание с СЗР к 2024 г. позволило довести жировую фракцию до минимальных 1,4 %.

### 4.3 Совокупная продуктивность звена севооборота

Для комплексной оценки продуктивности звена севооборота, включающего различные по хозяйственному назначению культуры, урожайность была пересчитана в универсальные зерновые единицы (з.е.) (Таблица 17).

Таблица 17 – Среднегодовая продуктивность звена севооборота

Вариант		Урожайность однолетних трав в среднем за 3 года, т з.е./га	Общая продуктивность севооборота, т з.е./га
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)		
Без удобрений (контроль)	Контроль	1,96	4,70
	СЗР	2,07	5,23
Умеренная доза	Контроль	2,63	6,08
	СЗР	2,88	7,06
Высокая доза	Контроль	3,37	7,60
	СЗР	3,58	8,47

Вариант с высокой дозой удобрений и применением СЗР повысил продуктивность на 80 % по сравнению с неудобренным контролем. Даже умеренная доза удобрений в сочетании со средствами защиты обеспечила продуктивность на 50 % выше контроля. Полученные значения общей продуктивности севооборота, особенно в вариантах с применением удобрений, можно охарактеризовать как высокие, что свидетельствует об эффективности применяемых агротехнических приемов. Наибольший вклад в формирование урожая в пересчете на зерновые единицы, как и ожидалось, обеспечила озимая пшеница. Как видно из данных, общая продуктивность закономерно возрастает с увеличением дозы удобрений и применением средств защиты растений, что демонстрирует их комплексное влияние на производственный процесс в севообороте.

## 5 КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА БАЛАНСА ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ЛИЗИМЕТРИЧЕСКОГО ОПЫТА

Агрэкосистемы, будучи динамичными системами, характеризуются тесной взаимосвязью между балансом питательных веществ и водным режимом. Этот симбиоз играет определяющую роль в обеспечении продуктивности сельскохозяйственного производства и поддержании экологической устойчивости (Дудкина Т.А., 2019). В условиях усиливающихся климатических изменений и возрастающего антропогенного давления, понимание и эффективное управление этой взаимозависимостью приобретает критическое значение.

Вода выступает основным переносчиком элементов NPK в почве. Процессы инфильтрации осадков и гравитационного стока напрямую влияют на миграцию питательных веществ. В периоды интенсивного дренажа, особенно весной, когда значительная часть осадков формирует гравитационный сток, усиливается вымывание нитратов ( $\text{NO}_3^-$ ) и калия ( $\text{K}^+$ ) в грунтовые воды. В засушливых регионах, напротив, уплотнение почвы и снижение инфильтрации ограничивают доступность фосфора для растений, даже при его внесении, что приводит к дефициту этого важного элемента (Семенов В.М. и др., 2023).

Чрезмерное внесение NPK может приводить к эвтрофикации и подкислению почв, а также существенно увеличивает риск вымывания азота и калия в грунтовые воды. Эта проблема усугубляется тем, что избыток фосфора и азота, попадающий в водоемы с инфильтрационными потоками, становится причиной эвтрофикации водных систем, стимулируя избыточный рост водорослей, приводя к так называемому «цветению воды» и, как следствие, нарушению хрупкого экосистемного баланса. Кроме того, в эрозионно-опасных регионах ливневые осадки вызывают водную эрозию, смывая плодородный слой почвы вместе с ценными питательными веществами, тем самым усугубляя деградацию почвенного покрова и снижая потенциал производства растениеводческой продукции (Варникова С.А., 2016).

Оптимизация агроэкосистем требует комплексного подхода, сочетающего в себе:

– внедрение адаптивно-ландшафтных систем земледелия (сидерация, севообороты с бобовыми культурами) способствует увеличению влагоемкости почвы и сокращению потерь NPK за счет снижения эрозии и вымывания;

– использование технологий точного земледелия, таких как дробное внесение азота, с учетом прогноза осадков позволяет минимизировать вымывание нитратов. Влагосберегающие приемы, включая мульчирование и нулевую обработку почвы, способствуют улучшению инфильтрации и снижению риска эвтрофикации (Козлова Л.М., Рубцова Н.Е., Соболева Н.Н., 2016).

Эффективное управление агроэкосистемами требует глубокого понимания взаимосвязи водного и питательного режимов. Комплексный мониторинг этих режимов, включая проведение лизиметрических исследований, является неотъемлемым инструментом для прогнозирования рисков и разработки устойчивых стратегий. Эти стратегии должны сочетать в себе принципы биологизации, точного внесения удобрений и адаптации к изменяющимся климатическим условиям, что позволит обеспечить, как высокую продуктивность сельского хозяйства, так и сохранение экологической устойчивости агроландшафтов.

### **5.1 Динамика баланса NPK при длительном применении средств химизации в лизиметрическом опыте (на примере озимой пшеницы)**

Вопросы поддержания и улучшения плодородия почвы всегда находились в центре внимания землевладельцев на всех стадиях эволюции аграрного сектора. Наличие доступных для растений минеральных питательных веществ считается одним из фундаментальных аспектов оценки качества почвы. В этой связи особое значение приобретает динамика содержания биофильных элементов в почвах под воздействием различных уровней антропогенной активности. Данный показатель может быть оценен через баланс питательных элементов в почвах, применяемых

при различных агротехнологиях. Изменение антропогенной нагрузки, связанной с сельским хозяйством, прямо влияет на концентрацию необходимых элементов в почве. Например, увеличение интенсивности сельскохозяйственного производства сопряжено с повышением потребления минеральных удобрений, что может вызывать нарушения в экосистемах почвы и уменьшение биодоступности элементов (Азаров В.Б., 2012).

Ежегодное возделывание сельскохозяйственных культур ведет к обеднению почвы основными элементами питания вследствие их извлечения растениями. Данный процесс, при отсутствии внесения удобрений, обуславливает снижение урожайности сельскохозяйственных культур. Для оптимизации применения удобрений и достижения максимальной эффективности необходимо учитывать баланс питательных веществ в почве. Определение оптимальных доз удобрений, базирующееся на анализе баланса питательных элементов, является основой для разработки агротехнически и экономически целесообразных стратегий питания растений (Волюнкина О.В., 2020). Такой подход позволяет не только компенсировать вынос элементов питания урожаем, но и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду.

В период активной химизации сельского хозяйства в России с 1966 по 1990 гг. баланс питательных веществ формировался положительно. В течение четверти века систематического и целенаправленного применения удобрений, превышение поступления питательных элементов над их выносом составило свыше 38 миллионов тонн NPK. Однако с начала 90-х годов XX в. ситуация претерпела резкие изменения. Применение минеральных удобрений значительно сократилось. От 60 до 75 % производимых минеральных туков в стране импортировались в зарубежные страны. Как следствие, баланс питательных веществ в аграрном секторе страны начал демонстрировать существенное превышение выноса над входящими в почву элементами, особенно в Нечерноземной зоне РФ (Козлова Л.М., 2019).

В 1940 г. в СССР было восполнено лишь 26 % азота, 32 % фосфора и 24 % калия, что указывает на то, что значительная доля урожая формировалась за счет

истощения природных запасов питательных веществ в почвах. В то время как опыт Западной Европы свидетельствовал о необходимости возвращать в почву около 80 % азота и калия, а также 100–110 % фосфора для обеспечения устойчивого роста урожайности сельскохозяйственных культур. Эти данные подчеркивают критическую важность поддержания баланса питательных веществ в агроэкосистемах и говорят о необходимости внесения минеральных туков на отечественных полях (Сычев В.Г. и Шафран С.А., 2017).

В агрохимии для описания круговорота биогенных элементов широко применяется метод вычисления баланса, который представляет собой разницу между количеством элемента, поступающим в систему, и его расходами. Недостаток биогенных элементов в сельском хозяйстве не только приводит к уменьшению объемов производимой продукции, но и способствуют снижению устойчивости агроландшафтов. В этом контексте компенсация недостатка этих элементов рассматривается как задача, основанная на экологических принципах (Лукин С.В., 2012).

Расчет хозяйственного баланса проведен на примере озимой пшеницы. Для этого сначала был рассчитан вынос азота, фосфора и калия с полученным урожаем (Таблица 18).

Таблица 18 – Вынос макронутриентов озимой пшеницей при внесении средств химизации

Вариант		Урожайность, т/га	Вынос урожаем, кг д.в./га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты растений (фактор В)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1992 г. (6-ая культура в чередовании)					
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	Контроль	1,59	47,7	15,9	39,8
	СЗР	1,88	56,4	18,8	47
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	2,23	66,9	22,3	55,8
	СЗР	2,74	82,2	27,4	68,5
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	3,02	90,6	30,2	75,5
	СЗР	3,70	111	37	92,5
1999 г. (13-ая культура в чередовании)					
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	Контроль	4,26	127,8	42,6	106,5
	СЗР	4,67	140,1	46,7	116,8
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	4,73	141,9	47,3	118,3
	СЗР	5,32	159,6	53,2	133,0

Вариант		Урожайность, т/га	Вынос урожая, кг д.в./га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты растений (фактор В)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	5,54	166,2	55,4	138,5
	СЗР	6,68	200,4	66,8	167,0
2006 г. (20-ая культура в чередовании)					
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	Контроль	3,44	103,2	34,4	86,0
	СЗР	3,92	117,6	39,2	98,0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	4,33	129,9	43,3	108,3
	СЗР	4,89	146,7	48,9	122,3
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	4,73	141,9	47,3	118,3
	СЗР	5,21	156,3	52,1	130,3
2009 г. (23-ая культура в чередовании)					
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	Контроль	1,78	53,4	17,8	44,5
	СЗР	2,28	68,4	22,8	57,0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	2,40	72,0	24,0	60,0
	СЗР	3,19	95,7	31,9	79,8
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	2,82	84,6	28,2	70,5
	СЗР	3,35	100,5	33,5	83,8
2024 г. (38-ая культура в чередовании)					
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	Контроль	2,66	79,8	26,6	66,5
	СЗР	3,03	90,9	30,3	75,8
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	3,56	106,8	35,6	89,0
	СЗР	4,75	142,5	47,5	118,8
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	5,02	150,6	50,2	125,5
	СЗР	5,52	165,6	55,2	138,0

\* Вынос 1 т урожая озимой пшеницы N – 30 кг, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 10 кг, K<sub>2</sub>O – 25 кг.

Данные по выносу макроэлементов показывают, что увеличение доз минеральных удобрений и применение СЗР приводят к существенному росту потребления N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O урожаем озимой пшеницы. Максимальные показатели зафиксированы в варианте N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>80</sub> + СЗР, где вынос азота превысил 200 кг/га. Полученные результаты указывают на необходимость оценки не только абсолютных значений выноса, но и их соотношения с внесёнными дозами удобрений. Для этого был проведён расчёт хозяйственного баланса питательных веществ (Таблица 19).

Результаты многолетних исследований ставят под сомнение общепринятое представление о достаточности дозы P<sub>120</sub> для обеспечения оптимального фосфорного питания озимой пшеницы.

Таблица 19 – Расчет баланса N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O в черноземе выщелоченном при возделывании озимой пшеницы

Вариант	Баланс, ± кг д.в./га			Интенсивность баланса, %		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1992 г. (6-ая культура в чередовании)						
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	-47,7	-15,9	-39,8	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> + СЗР	-56,4	-18,8	-47	0	0	0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	6,90	-37,7	15,8	90	269	72
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub> + СЗР	22,2	-32,6	28,5	73	219	58
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	-29,4	-89,8	-4,50	132	397	106
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub> + СЗР	-9,00	-83,0	12,5	108	324	86
1999 г. (13-ая культура в чередовании)						
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	-128	-42,6	-106	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> + СЗР	-140	-46,7	-116	0	0	0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	81,9	-12,7	78,2	42	127	34
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub> + СЗР	99,6	-6,80	93,0	38	113	30
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	46,2	-64,6	58,5	72	217	58
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub> + СЗР	80,4	-53,2	87,0	60	180	48
2006 г. (20-ая культура в чередовании)						
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	-103	-34,4	-86,0	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> + СЗР	-118	-39,2	-98,0	0	0	0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	69,9	-16,7	68,2	46	139	37
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub> + СЗР	86,7	-11,1	82,2	41	123	33
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	21,9	-72,7	38,2	85	254	68
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub> + СЗР	36,3	-67,9	50,2	77	230	61
2009 г. (23-ая культура в чередовании)						
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	-53,4	-17,8	-44,5	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> + СЗР	-68,4	-22,8	-57,0	0	0	0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	12,0	-36,0	20,0	83	250	67
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub> + СЗР	35,7	-28,1	39,8	63	188	50
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	-35,4	-91,8	-9,50	142	426	113
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub> + СЗР	-19,5	-86,5	3,75	119	358	96
2024 г. (38-ая культура в чередовании)						
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	-79,8	-26,6	-66,5	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub> + СЗР	-90,9	-30,3	-75,75	0	0	0
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	46,8	-24,4	49,0	56	169	45
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub> + СЗР	82,5	-12,5	78,8	42	126	34
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	30,6	-69,8	45,5	80	239	64
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub> + СЗР	45,6	-64,8	58,0	72	217	58

На основании полученных данных, в варианте N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>80</sub> зафиксирован ку-мулятивный дефицит фосфора. Данный факт свидетельствует о следующем:

Острая необходимость увеличения доз фосфорных удобрений до уровня  $P_{130-150}$  для эффективной компенсации процессов фиксации фосфора в почве и последующего бездефицитного его использования культурами севооборота.

Целесообразность приоритетного использования удобрений с повышенным содержанием цитратно-растворимого фосфора, таких как обогащенный суперфосфат, для улучшения его доступности для растений.

Применение фиксированных доз  $N_{120}$  и  $K_{80}$  продемонстрировало свою эффективность вплоть до 2024 г., что подтверждается положительным балансом данных элементов питания:

- баланс азота (N): +54,3 кг/га (при использовании схемы  $N_{120}P_{120}K_{80}$ ).
- баланс калия (K): +49,1 кг/га (при использовании схемы  $N_{120}P_{120}K_{80}$ ).

Рекомендуется поддержание умеренных доз азота и калия в основном внесении, с акцентом на увеличение частоты и адресности листовых подкормок калием в критические фазы развития растений для предотвращения дефицита и оптимизации физиологических процессов.

Многолетнее использование фиксированных доз удобрений приводит к формированию системного дефицита  $P_2O_5$ , даже при внесении 120 кг/га. Дисбаланс усугубляется применением средств защиты растений, что приводит к увеличению выноса фосфора на 22,7 % по сравнению с контрольными вариантами.

Схема удобрения  $N_{120}P_{120}K_{80} + СЗР$  демонстрирует оптимальное соотношение «затраты-эффект» (баланс N/K >+50 кг/га), однако требует обязательной корректировки по фосфору для предотвращения истощения почвенных запасов и обеспечения стабильной урожайности озимой пшеницы.

## **6 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА ФИТОСАНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ**

Фитосанитарное состояние посевов *Triticum aestivum* L. – это фактор, определяющий уровень урожайности и качественные показатели получаемого зерна. Под фитосанитарным состоянием подразумевается комплексный набор показателей, включающий степень поражения растений болезнями, уровень повреждений вредителями и степень засоренности сорняками. Современные системы защиты растений используют агротехнические, биологические и химические методы, эффективность которых зависит от почвенно-климатических условий, технологий возделывания и выбора препаратов. Однако их применение требует аргументированного подхода, основанного на анализе агроэкосистемы (Санин С.С., 2016; Пигорев И.Я. и др., 2021).

Агротехника формирует первый барьер против вредных организмов. Так размещение пшеницы после бобовых сидератов снижает пораженность корневыми гнилями на 20–30 % за счет увеличения супрессивности почвы и накопления азота. Однако продуктивность сидератов требует защиты от болезней (аскохитоз, антракноз) и вредителей (клубеньковые долгоносики). По мнению А.А. Ховатова (2006) обработка семян сидератов ТМТД (3 кг/т) и иммуноцитифитом (0,4 г/га) повышала их фитомассу на 15–20 %, что улучшало фитосанитарное состояние последующих посевов пшеницы.

Лущение стерни и глубокая зяблевая вспашка снижают запас инфекции гельминтоспориоза и фузариоза в 1,5–2 раза. Запашка стерни сокращает численность личинок хлебных жуков на 60–70 % (Денискина Н.Ф. и др., 2021). Ранние посевы озимой пшеницы сильнее поражаются мучнистой росой и септориозом, а также заселяются злаковыми мухами. Оптимальные сроки сева (с учетом региона) снижают развитие болезней на 10–15 %.

Второй аспект – это применение химических средств, которые остаются неотъемлемым инструментом оперативного контроля при превышении экономического порога вредоносности (ЭПВ).

Использование комбинированных протравителей представляет собой высокоэффективный метод борьбы с головневыми инфекциями и корневыми гнилями, обеспечивая уровень контроля в диапазоне 90–95 %. Применение фунгицидов в фазе флагового листа демонстрирует значительное снижение развития листостебельных болезней, достигая показателей эффективности 70–80 %. Инсектициды, интегрированные в систему защиты растений, способствуют поддержанию урожайности на уровне 0,3–0,5 т/га. Борьба с сорняками также оказывает положительное влияние на урожайность, увеличивая её на 0,4–0,7 т/га.

Значимым фактором является применение минеральных удобрений. Известно, что повышение доз N-удобрений (свыше  $N_{90}$ ) усиливает развитие мучнистой росы на 15–20 % и, вместе с тем, привлекает тлей. Калийные удобрения (60 кг/га) повышают устойчивость к ржавчинным грибам, а фосфорные (40 кг/га) ускоряют созревание, сокращая период уязвимости к фузариозу колоса (Прищепа И.А., 2000).

Для формирования целостной и обоснованной картины выбора стратегий необходимо провести всесторонний анализ всего спектра используемых средств. В данной главе представлен детальный анализ влияния минеральных удобрений и средств защиты растений на фитосанитарные параметры посевов озимой пшеницы, что позволяет выявить основные закономерности и тенденции, определяющие эффективность управления фитосанитарными рисками.

В рамках анализа рассматриваются следующие параметры: динамика популяций фитопатогенов и вредителей, а также уровень засоренности. Особое внимание уделяется изучению синергетических и антагонистических эффектов при комбинированном применении удобрений и средств защиты, что позволяет оптимизировать их использование и минимизировать негативные воздействия на окружающую среду.

Детальное исследование механизмов воздействия минеральных удобрений и средств защиты на фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы является важным этапом в разработке научно обоснованных рекомендаций по повышению устойчивости агроценозов к фитосанитарным угрозам (Зазимко М.И. и др., 2010).

Полученные данные способствуют формированию комплексной стратегии управления фитосанитарными рисками, направленной на обеспечение стабильного и высокого уровня урожайности зерна озимой пшеницы.

В агроэкосистемах, наряду с полезными культурами, неизбежно присутствуют сорные растения, конкурирующие за ресурсы, в том числе элементы питания, поступающие с минеральными удобрениями. Это, в свою очередь, негативно сказывается на коэффициенте утилизации удобрений культурными растениями и уменьшает общую эффективность агрохимических мер. Для повышения усвоения питательных веществ культурой и максимизации отдачи от удобрений, необходимо внедрять комплексные стратегии управления сорной растительностью, интегрированные в общую систему агротехнических приемов (Дудкин И.В. и Дудкина Т.А., 2018).

Соперничество между нежелательной растительностью и сельскохозяйственными культурами негативно сказывается на потенциальном объеме урожая биомассы. По мере увеличения биомассы сорняков наблюдается соответствующее снижение фитомассы культивируемых видов. Эффективность применения удобрений напрямую зависит от конкурентных взаимодействий между растениями, которые выражаются в ограничении доступа к жизненно важным ресурсам, таким как вода, солнечный свет и питательные вещества. Конкуренция за ресурсы является существенным фактором, определяющим урожайность сельскохозяйственных культур. Сорные растения, обладая высокой скоростью роста и размножения, часто оказываются более конкурентоспособными по сравнению с культурными растениями, что приводит к снижению продуктивности последних. Внесение удобрений может частично компенсировать негативное влияние сорняков, однако их эффективность снижается в условиях высокой конкуренции за элементы питания (Манторова Г.Ф., Зайкова Л.А., 2013).

Малолетние сорняки наиболее агрессивные и быстро растущие в начальный период вегетации пшеницы, конкурируя за свет, влагу и питательные вещества, что приводит к изреживанию всходов и угнетению молодых растений (Заргарян Н.Ю. и др., 2020). Многолетние сорняки, особенно корнеотпрысковые и корне-

вищные, формируют устойчивые очаги засорения, сложно подавляются агротехническими приемами и требуют системного применения гербицидов. Имея мощную корневую систему сорные виды интенсивно потребляют воду и элементы питания из глубоких слоев почвы, а их надземная масса затеняет культурные растения (Миренков Ю.А. и др., 2020). Комплексное засорение посевов обоими биогруппами сорняков приводит к значительным потерям урожая (до 30–50 % и более) и ухудшению качества зерна. Для обеспечения эффективной защиты необходимо провести комплексную идентификацию видового состава сорных растений и разработать дифференцированные стратегии борьбы, учитывающие биологические особенности и экологические характеристики каждого вида (Илларионов А.И., 2019).

В условиях интенсивного земледелия минеральные удобрения и гербициды выступают в качестве важных инструментов для управления популяцией сорных растений. В нынешних агротехнических подходах акцент смещен в сторону минимизации ущерба урожайности, вызванного сорной растительностью, и создания действенных методов борьбы с сорняками. Подчеркивается важность комплексного использования гербицидных препаратов и питательных веществ, что обеспечивает агрономическую и экономическую выгоду за счет подавления конкуренции сорных растений за элементы питания в начале вегетации культур. Подобное взаимодействие способствует рациональному использованию ресурсов и увеличению продуктивности агроценозов. Комбинированное применение гербицидов и удобрений позволяет воздействовать на сорняки на ранних этапах их развития, когда они наиболее уязвимы, и одновременно обеспечивает растения необходимыми элементами для роста и развития. Такой подход позволяет снизить гербицидную нагрузку на окружающую среду, одновременно повышая урожайность полевых культур (Токарева Н.В., Суоров В.В., Чухина О.В., 2020).

Проведенное исследование базируется на экстраполяции данных многолетних наблюдений (1992–2024 гг.), направленных на изучение влияния возрастающих доз NPK (фактор А) и применения химических средств защиты растений

(фактор В) на динамику численности малолетних и многолетних сорных видов в посевах озимой пшеницы (Таблица 20).

Таблица 20 – Мониторинг сорного компонента посевов озимой пшеницы (в среднем за 5 лет)

Вариант		Количество сорняков, шт./м <sup>2</sup>					
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	малолетних		многолетних		по фактору А,	
		Ч*	БЭ	Ч	БЭ	малолетних	многолетних
Без удобрений (контроль)	Контроль	32	–	14	–	20	8
	СЗР	8	75	3	79		
Умеренная доза	Контроль	17	–	7	–	11	4
	СЗР	5	84	1	93		
Высокая доза	Контроль	11	–	5	–	7	2
	СЗР	3	91	0	100		

\* Ч – численность (шт./м<sup>2</sup>); БЭ – биологическая эффективность, (%)

Анализ результатов показал, что в отношении малолетних сорняков по мере увеличения дозы удобрений наблюдается выраженная дозозависимая тенденция к снижению их численности. Для многолетних сорняков зависимость менее выражена, однако также проявляется в виде уменьшения их популяции.

Эти данные свидетельствуют о существенном влиянии агрохимических факторов на структуру и динамику сорного компонента агроценоза, а именно, повышенный фон минерального питания усиливает конкурентную способность культурного растения. Озимая пшеница формирует более мощный стеблестой и листовую поверхность, активнее потребляет влагу и элементы питания, угнетая развитие сорняков, особенно менее конкурентоспособных малолетников (Голосной Е.В. и Марцинкевич В.М., 2023).

Однако результаты исследования, проведенного Г.Н. Гасановым и соавт. (2011), показали, что внесение высоких доз удобрений не только не обеспечивает подавление сорняков, но и способствует увеличению их численности в посевах озимой пшеницы по сравнению с контрольными вариантами на 28–32 %. Этот факт подчеркивает сложность и неоднозначность воздействия агрохимических

факторов на сорный компонент агроценозов, требуя дальнейшего детального изучения и разработки более эффективных стратегий управления засоренностью в сельскохозяйственном производстве.

В контексте оценки эффективности применения химических средств защиты растений следует отметить, что их использование достоверно снизило плотность ценопопуляций всех типов сорных растений. Во всех экспериментальных вариантах внесение гербицида приводило к значительному уменьшению численности обоих типов сорняков по сравнению с соответствующими контрольными вариантами без применения защиты.

Также следует отметить, что наивысшая фитосанитарная эффективность достигается при комплексном использовании высоких доз минеральных удобрений и ХСЗР (Марчук Е.В. и др., 2022). В этом случае наблюдалась минимальная плотность сорняков, варьирующаяся в пределах 0–3 шт./м<sup>2</sup>, и максимальная биологическая эффективность, достигающая 91–100 %. Данный эффект обусловлен оптимизацией физиологического статуса культурных растений. Эти результаты согласуются с принципами интегрированной защиты растений, направленной на рациональное использование агрохимических ресурсов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду (Левитин М.М., 1999).

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности интегрированного подхода, базирующегося на комплексной оптимизации агрохимических и фитосанитарных мероприятий. Для дальнейшего совершенствования данной стратегии целесообразна реализация исследований по следующим приоритетным направлениям:

1. Оптимизация гербицидного спектра с учетом специфики дозировок минеральных удобрений и видового состава сорного фитоценоза. Результаты позволят разработать адаптивные стратегии фитопротекции, детерминированные региональными особенностями агроэкосистем.

2. Комплексная оценка экономико-экологической эффективности выявленных оптимальных комбинаций агрохимикатов и гербицидов. Это обеспечит обос-

нование рационального ресурсопотребления и минимизацию антропогенной нагрузки на окружающую среду.

3. Мониторинг динамики структурных изменений и устойчивости популяций сорных растений при пролонгированном применении системы минерального питания в комплексе с химическими средствами защиты растений. Данное направление исследований критически важно для прогнозирования рисков формирования резистентности у сорняков и разработки превентивных фитосанитарных мер.

Параллельно с проблемой засоренности, значимую угрозу урожаю *Triticum aestivum* L. создают фитофаги. Защита озимой пшеницы от комплекса вредителей представляет собой актуальную проблему в агроландшафтах Центральной полосы России. В данном исследовании проводится анализ влияния различных доз минеральных удобрений и применения инсектицидов на динамику их численности (Таблица 21).

Применение минеральных удобрений, как отмечают Н.Н. Глазунова и с соавт. (2018), играет значимую роль в формировании фитосанитарного состояния агроценоза озимой пшеницы, оказывая заметное влияние на численность и вредоносность насекомых-фитофагов. Оптимизация минерального питания способствует созданию более устойчивых посевов, что снижает повреждаемость растений вредителями и позволяет ограничить развитие их популяций (Трухачев В.И. и др., 2007; Саленко Е.А. и др., 2014; Защепкин Е.Е. и др., 2015).

Фитосанитарная значимость удобрений заключается в их способности модифицировать метаболические процессы в растениях таким образом, чтобы создать неблагоприятные условия для вредителей. Это достигается за счет повышения активности биохимических реакций, которые укрепляют естественный иммунитет растений. Удобрения также способствуют разрыву фенологической синхронизации между развитием растений и вредоносными организмами, что снижает вероятность массового повреждения культур. Кроме того, они оказывают непосредственное влияние на микроклимат и другие экологические параметры агроце-

ноза, что создает дополнительные барьеры для распространения патогенов и вредителей (Иванова О.А. и др., 2015).

Таблица 21 – Мониторинг фитофагов в посевах озимой пшеницы (в среднем за 5 лет)

Вариант		Количество фитофагов в среднем									
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Гессенская муха		Шведская муха		Хлебная стеблевая блошка		Пьявица красногрудая		Клоп вредная черепашка	
		Ч*	БЭ	Ч	БЭ	Ч	БЭ	Ч	БЭ	Ч	БЭ
Без удобрений (контроль)	Контроль	4	–	2	–	5	–	13	–	4	–
	СЗР	0	100	1	50	1	80	2	85	1	75
Умеренная доза	Контроль	3	–	2	–	5	–	12	–	4	–
	СЗР	0	100	0	100	1	80	1	92	1	75
Высокая доза	Контроль	3	–	2	–	4	–	11	–	3	–
	СЗР	0	100	0	100	1	80	1	92	0	100
по фактору А, шт./м <sup>2</sup>											
Без удобрений (контроль)		2		2		3		8		2	
Умеренная доза		2		1		3		6		2	
Высокая доза		2		1		2		6		2	

\* Ч – численность (шт./м<sup>2</sup>); БЭ – биологическая эффективность (%)

По итогам исследований, полученных в ходе нашего наблюдения, было выявлено, что минеральное питание на фоне, не обработанном инсектицидами, оказывает неоднозначное и статистически незначимое влияние на динамику численности большинства вредителей по сравнению с контрольными вариантами, где удобрения не применялись.

Например, в отношении гессенской мухи (*Mayetiola destructor* Say) и клопа вредная черепашка (*Eurygaster integriceps* Put.) внесение удобрений не продемонстрировало значимого эффекта. В то же время, в случае со шведской мухой (*Oscinella pusilla* L.), наблюдалось снижение численности в 2 раза на обоих вариантах с применением NPK.

Относительно хлебной стеблевой блошки (*Chaetocnema hortensis* Geoffr.), было зафиксировано снижение численности на 33 % на фоне N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>80</sub>, тогда как про-

тив пьявицы (*Lema (oulema) melanopus* L.) наблюдалось снижение на 25 % на обоих удобренных фонах.

Наши данные противоречат результатам исследования В.И. Танского и соавт. (2001). Работа проводилась ими в 1986–1991 гг. на озимой и яровой пшеницах в следующих природных зонах: лесная (Московская обл.), лесостепная (Белгородская обл.), лесостепная – предгорная подзона (Северная Осетия), степная (Краснодарский край), степная – подзона засушливых степей (Кустанайская обл.). Согласно их данным, в степной зоне наблюдалось увеличение численности вредителя *Lema (oulema) melanopus* L. на опытных участках с высокими дозами минеральных удобрений. В отношении личинок вредителя *Eurygaster integriceps* Put. было установлено, что они не демонстрируют предпочтения к удобренным деланкам с качественным предшественником. Однако, на участках, где предшественником был подсолнечник, внесение удобрений приводило к увеличению численности личинок данного вредителя.

Главным критерием, достоверно и резко снижающим численность всех изучаемых фитофагов, явилось применение инсектицида. Биологическая эффективность варьировала от 75 до 100 %.

Максимальная эффективность (БЭ 100 %) достигнута против *Mayetiola destructor* Say на всех фонах удобренности (включая контроль), против *Oscinella pusilla* L. на удобренных фонах и против *Eurygaster integriceps* Put. на фоне максимальной дозы удобрений.

Относительно меньшая, но все равно высокая эффективность (75–92 %) отмечена против *Lema (oulema) melanopus* L. и *Chaetocnema hortensis* Geoffr. Снижение БЭ против блошки (до 80 %) может быть связано с ее скрытым образом жизни. Против пьявицы БЭ инсектицида была стабильно высокой (85–92 %), что подчеркивает его надежность в борьбе с этим вредителем.

На фоне применения ХСЗР различия между вариантами по вносимым дозам удобрений становятся минимальными. Численность вредителей во всех обработанных вариантах снижалась до экономически незначимого уровня (0–2 экз./м<sup>2</sup>). Это свидетельствует о том, что эффективность инсектицида практически не зависела от фо-

на минерального питания в изучаемом диапазоне доз. Данный факт имеет важное практическое значение, указывая на надежность препарата ХСЗР в различных условиях обеспеченности питанием.

Помимо надежной защиты от вредителей и сорной растительности, важным аспектом устойчивого земледелия является контроль болезней. В этом контексте важным элементом устойчивого земледелия является мониторинг фитопатогенного комплекса посевов озимой пшеницы, который позволяет оценить влияние различных агротехнических приемов на развитие основных болезней озимой пшеницы. Анализ направлен на выявление закономерностей и разработку научно обоснованных элементов интегрированной защиты растений.

В ходе исследования были проанализированы особенности воздействия уровня минерального питания и применения фунгицидов на распространенность болезней в посевах озимой пшеницы. Результаты мониторинга фитопатогенного комплекса *Triticum aestivum* L. позволили выявить ряд закономерностей, связанных с воздействием факторов А и В на развитие болезней (Таблица 22).

Таблица 22 – Распространенность и развитие болезней в посевах озимой пшеницы (в среднем за 5 лет)

Вариант		Распространенность и развитие									
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	бурой листовой ржавчины		септориоза		фузариоза колоса		мучнистой росы		корневых гнилей	
		Р*	БЭ	Р	БЭ	Р	БЭ	Р	БЭ	Р	БЭ
Без удобрений (контроль)	Контроль	$\frac{14}{6}$	–	$\frac{18}{9}$	–	$\frac{10}{5}$	–	$\frac{15}{11}$	–	$\frac{23}{18}$	–
	СЗР	$\frac{8}{3}$	$\frac{43}{50}$	$\frac{9}{4}$	$\frac{50}{56}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{70}{80}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{60}{73}$	$\frac{11}{7}$	$\frac{52}{61}$
Умеренная доза	Контроль	$\frac{18}{9}$	–	$\frac{22}{11}$	–	$\frac{12}{7}$	–	$\frac{20}{14}$	–	$\frac{20}{13}$	–
	СЗР	$\frac{10}{4}$	$\frac{44}{56}$	$\frac{10}{4}$	$\frac{55}{64}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{67}{67}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{60}{71}$	$\frac{11}{7}$	$\frac{45}{46}$
Высокая доза	Контроль	$\frac{22}{14}$	–	$\frac{25}{16}$	–	$\frac{18}{11}$	–	$\frac{26}{20}$	–	$\frac{18}{11}$	–
	СЗР	$\frac{12}{5}$	$\frac{45}{64}$	$\frac{11}{5}$	$\frac{56}{69}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{67}{64}$	$\frac{12}{5}$	$\frac{54}{75}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{50}{55}$

в среднем по фактору А, %					
Контроль	$\frac{11}{4}$	$\frac{14}{6}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{10}{7}$	$\frac{17}{12}$
Умеренная доза	$\frac{14}{6}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{14}{9}$	$\frac{16}{10}$
Высокая доза	$\frac{17}{10}$	$\frac{18}{10}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{19}{12}$	$\frac{14}{8}$

\* Р – распространенность (над чертой) и развитие (под чертой) (%); БЭ – биологическая эффективность (%)

Согласно представленным данным, внесение удобрений, особенно в высоких дозах, статистически значимо увеличивало уровень пораженности листостебельными болезнями по сравнению с контрольными вариантами. Этот вывод согласуется с фундаментальными положениями отечественной фитопатологии, которая подчеркивает роль агрохимических факторов в патогенезе растений.

Азотные удобрения, стимулируя интенсивный рост вегетативной массы, создают оптимальные условия для развития патогенных микроорганизмов. Повышенная влажность и загущенность посевов, вызванные избыточным азотным питанием, являются ведущими факторами, способствующими распространению листостебельных инфекций. Более того, высокие дозы азота могут временно снижать устойчивость растительных тканей к патогенам, что дополнительно стимулирует их развитие.

Эти закономерности были подтверждены в ходе многолетних исследований, проведенных на Центральной опытной станции ВНИИА. В период с 2001 по 2010 гг. группа ученых под руководством А.К. Личко (2011) установила, что увеличение доз азота в сочетании с комплексным применением фосфорно-калийных удобрений способствовало значительному распространению болезней в посевах озимой пшеницы.

Аналогичные результаты были получены в исследованиях, проведенных на стационарном участке ГНУ Тамбовского НИИСХ Россельхозакадемии. Ю.В. Зеленева и В.П. Судникова (2014) выявили, что повышение дозы азотных удобрений приводило к увеличению зараженности озимой пшеницы септориозом.

Тем не менее, в ходе длительных полевых экспериментов, проводившихся на опытных полях Казанского ГАУ в период с 2017 по 2020 гг., группа ученых пришла к весьма противоположным выводам. В рамках данного исследования было установлено, что применение различных доз минеральных удобрений способствовало снижению уровня развития фитопатогенных микроорганизмов в посевах *Triticum aestivum* L. (Сафин Р.И. и др., 2023)

М.И. Зазимко и соавт. (2010) также наблюдали данную тенденцию. В ходе их исследований было установлено, что средняя норма азота способствовала усилению развития бурой ржавчины в 2–3 раза, а повышенные дозы – в 3–4 раза. Эти данные свидетельствуют о том, что азотные удобрения оказывают существенное влияние на патогенез растений и должны учитываться при разработке систем агрохимического ухода за сельскохозяйственными культурами.

В контексте корневых гнилей наблюдается закономерное снижение степени поражения с увеличением дозы минеральных удобрений, что обусловлено активацией и интенсификацией метаболических процессов в почвенной микробиоте (Лавринова В.А., 2019). Это явление может быть дополнительно объяснено комплексным улучшением минерального питания растений и увеличением их корневой системы, что, в свою очередь, способствует усилению ее адаптационных и защитных механизмов. Полученные данные согласуются с результатами исследования А.М. Ямалиевой (2017), в котором также была выявлена склонность к снижению уровня корневых гнилей при увеличении доз минеральных удобрений.

В ситуации с применением фунгицида на озимой пшенице на неудобренном фоне (контроль), наблюдается его высокая биологическая эффективность против различных патогенов. Однако, при анализе данных на удобренных фонах, с увеличением дозы внесения удобрений, отмечается статистически значимое снижение биологической эффективности ХСЗР в отношении некоторых инфекционных заболеваний.

В условиях применения минеральных удобрений, обработка препаратом ХСЗР неизменно демонстрировала значительное снижение уровня пораженности по сравнению с контрольными вариантами, не подвергавшимися обработке на

идентичных фонах. Тем не менее, абсолютный уровень пораженности на удобренных фонах после обработки зачастую сохранялся на уровне или даже превышал показатели необработанного фунгицидам контроля, что требует дальнейшего детального анализа механизмов действия препарата в условиях повышенного уровня плодородия почвы.

## **7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ПЕСТИЦИДОВ**

Одним из основных элементов любой агротехнологической системы, направленной на возделывание сельскохозяйственных культур, выступает ее экономическая оценка. Данный аспект требует комплексного анализа, включающего в себя оценку производственных затрат, прогнозирование доходов, а также учет факторов, влияющих на экономическую эффективность агротехнологий. Экономическая оценка является неотъемлемой частью принятия обоснованных решений в области агропромышленного комплекса, обеспечивая рациональное использование ресурсов и повышение конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции на рынке (Усольцев И.В., 2013).

В сельском хозяйстве показателем успешности является рост объёма чистой продукции (валового дохода) при минимизации использования материальных и трудовых ресурсов.

Это достигается за счет интегрального использования локальных агро-экосистемных ресурсов, включая земельные, водные, финансовые и другие, что способствует повышению экономической устойчивости и экологической сбалансированности сельскохозяйственного производства. При оценке эффективности сельскохозяйственной деятельности необходимо учитывать специфику, влияющую на конечный результат, и проводить многофакторный анализ, включающий экономическую, экологическую и социальную составляющие (Алиметова Л.Я. и Уруджев Ф.М., 2008).

Только системный подход позволяет провести комплексный анализ и достоверные выводы об основных направлениях повышения экономической эффективности в сельскохозяйственном производстве (Синеговская В.Т., 2018). Исходным является натуральный показатель – урожайность культурных растений. Именно он оказывает решающее влияние на объем прибыли и уровень рентабельности (Торикив В.Е., 2019).

Натуральные показатели, фиксируя количественные параметры продуктивности агроценозов, отражают лишь отдельные аспекты достигнутой эффективности сельскохозяйственного производства. Для комплексной оценки экономической эффективности агротехнологий требуется анализ системы факторов, включая объём совокупных трудовых затрат, детерминирующих достижение целевых значений урожайности (Хачидзе А.С. и Мамедов М.Г., 2009). В рамках исследования проведена сравнительная оценка экономической результативности возделывания изучаемой сельскохозяйственной культуры в условиях дифференцированного применения минеральных туков и средств химической защиты растений.

Интегральными индикаторами экономической эффективности агропромышленного производства выступают себестоимость продукции и уровень рентабельности. Оптимизация издержек производства и максимизация прибыльности операционной деятельности составляют основные приоритеты стратегического управления сельскохозяйственными предприятиями. В экономической интерпретации себестоимость представляет собой стоимостную агрегацию совокупных затрат (трудовых, материально-технических, финансовых ресурсов), обусловленных производственным циклом (Васильев В.Н. и Кузнецов А.П., 2019).

Рентабельность сельскохозяйственного производства является важным экономическим показателем, зависящим от себестоимости продукции и цен реализации. В условиях рыночной экономики, где конкуренция и ценообразование играют важную роль, рентабельность определяется разницей между выручкой от реализации продукции и затратами на её производство (Гамидов Г.Г., 2020). Таким образом, рентабельность можно рассматривать как функцию двух основных переменных: цены реализации и себестоимости единицы продукции.

Для повышения рентабельности сельскохозяйственных предприятий необходимо оптимизировать затраты на производство, увеличить урожайность и повысить качество продукции (Кошаева И.П. и Мурзина Е.А., 2014). Снижение себестоимости продукции достигается за счёт внедрения инновационных технологий, оптимизации производственных процессов и рационального использования ресурсов. Увеличение урожайности может быть достигнуто путём селекции высо-

коурожайных сортов, применения современных агротехнологий и эффективного управления земельными ресурсами. Повышение качества продукции способствует росту её рыночной стоимости и увеличению прибыли.

В растениеводстве при культивировании викоовсяной смеси в условиях антропогенного воздействия приоритетна максимизация выхода и улучшение качества продукции при снижении трудозатрат. Экономическая эффективность возделывания полевых культур оценивается на основе себестоимости, чистого дохода и уровня рентабельности. Себестоимость, коррелирующая с общей эффективностью агрохозяйства, зависит от затрат на весенне-летний уход за посевами, включая обработку почвы и контроль сорняков, болезней и вредителей. Снижение себестоимости ведет к увеличению экономической эффективности агротехнических мероприятий при возделывании викоовсяной смеси (Берсенев В.Н. и Чухина О.В., 2013).

Сравнительный анализ экономической эффективности объектов исследования позволяет не только выявить различия в реакции культур на уровни химизации, но и определить наиболее рациональные варианты агротехнологий, обеспечивающие максимальную отдачу при оптимальных производственных затратах.

По результатам экономической эффективности было выявлено, что наибольший экономический эффект наблюдается при возделывании викоовсяной смеси на варианте с внесением умеренной дозы удобрений в сочетании с комплексом СЗР (Таблица 23).

Стоимость полученной продукции варьировалась в широком диапазоне: от 36,6 тыс. руб. на контрольном участке до 65,4 тыс. руб. при использовании наиболее интенсивной технологии.

Максимальный условный чистый доход (27,9 тыс. руб./га) был достигнут при применении умеренной дозы удобрений в сочетании с СЗР, что на 30 % превышает показатель контрольного варианта. Несмотря на то, что рентабельность этого варианта составила 93 %, на контроле она оказалась выше (144 %) благодаря минимальным производственным затратам, главным критерием эффективности выступает максимальное получение дохода с единицы площади, а не только высокая

рентабельность при сравнительно низких затратах. В то же время, применение максимальных доз удобрений привело к снижению рентабельности до 52–56 %.

Таблица 23 – Экономическая эффективность применения средств химизации при возделывании викоовсяной смеси

Показатель	Вариант					
	Без удобрений (контроль)		N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>		N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	
	Контроль	СЗР	Контроль	СЗР	Контроль	СЗР
Урожайность, т/га	12,2	12,7	15,4	19,3	21,5	21,8
Доп. урожайность, т/га по сравнению с контролем	–	0,5	3,2	7,1	9,3	9,6
Стоимость произведенной продукции, р.	36 600	38 100	46 200	57 900	64 500	65 400
В т. ч. доп. продукция, р.	–	1 500	9 600	21 300	27 900	28 800
Затраты на производство продукции, р./т	1 232	1 310	1 819	1 554	1 922	1 968
Затраты на производство продукции р./га	15 024	16 636	28 006	29 996	41 316	42 905
Условный чистый доход, р./га	21 576	21 464	18 194	27 904	23 184	22 495
Рентабельность, %	144	129	65	93	56	52

\*Цена 1 т зеленой массы викоовсяной смеси – 3 000 рублей (на 2023 г.)

Следовательно, оптимальным решением является сочетание умеренной дозы удобрений с защитой растений, которое обеспечивает наилучший баланс между условным чистым доходом и рентабельностью. Использование повышенных доз удобрений, несмотря на увеличение урожайности, экономически менее выгодно из-за непропорционального роста производственных затрат.

Также был проведен детальный анализ экономической эффективности применения средств защиты растений при возделывании озимой пшеницы, результаты которого представлены в Таблице 24. В процессе исследования были учтены основные экономические показатели, такие как затраты на приобретение и использование СЗР, урожайность культур, а также рентабельность сельскохозяйственного производства. Полученные данные позволяют сделать обоснованные

выводы о целесообразности и экономической эффективности применения СЗР при возделывании озимой пшеницы.

Т а б л и ц а 24 – Экономическая эффективность применения средств химизации при возделывании озимой пшеницы

Показатель	Вариант					
	Без удобрений (контроль)		N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>		N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	
	Контроль	СЗР	Контроль	СЗР	Контроль	СЗР
Урожайность, т/га	2,66	3,03	3,56	4,75	5,02	5,52
Доп. урожайность, т/га по сравнению с контролем	–	0,37	0,9	2,09	2,36	2,86
Стоимость произведенной продукции, р.	34 580	39 390	46 280	61 750	65 260	71 760
В т. ч. доп. продукция, р.	–	4 810	11 700	27 170	30 680	37 180
Затраты на производство продукции, р./т	5 884	5 998	7 604	6 265	7 696	7 461
Затраты на производство продукции р./га	15 650	18 175	27 070	29 757	38 633	41 183
Условный чистый доход, р./га	18 930	21 214	19 210	31 992	26 627	30 576
Рентабельность, %	121	117	71	108	69	74
Рентабельность (с учётом сохранения плодородия), %	67	64	65	104	57	64

\*Цена 1 т зерна озимой пшеницы – 13 000 рублей (на 2024 г.)

По мере применения более интенсивных технологий выращивания стоимость произведенной продукции значительно возросла: от 34,6 тыс. руб./га в контрольном варианте до 71,8 тыс. руб./га при использовании схемы N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>80</sub> в сочетании с СЗР, что свидетельствует о двукратном увеличении по сравнению с исходным значением.

Наибольший условный чистый доход был получен при использовании умеренной дозы удобрений в сочетании с СЗР и составил 31,9 тыс. руб./га, что в 1,7 раза выше, чем на контрольном участке. Важно отметить, что этот вариант также обеспечил высокую рентабельность (108 %). На контроле рентабельность была выше (121 %), однако применение повышенной дозы удобрений привело к ее снижению до 69–74 %.

Наиболее экономически эффективным подходом к возделыванию озимой пшеницы является внесение умеренной дозы минеральных удобрений в сочетании с применением средств защиты растений. Такой подход обеспечивает оптимальный баланс между урожайностью, чистым доходом и рентабельностью. Несмотря на увеличение стоимости продукции, применение повышенных доз удобрений экономически менее оправдано из-за сопутствующего роста затрат и снижения относительной отдачи.

Проведённый анализ показал, что экономическая эффективность возделывания сельскохозяйственных культур в значительной степени определяется не только абсолютным уровнем урожайности, но и соотношением прироста продукции и затрат на её производство.

При оценке эффективности агроприемов в качестве основного критерия целесообразности следует рассматривать получение максимального чистого дохода с единицы площади. Высокая рентабельность на контрольных вариантах является следствием низких производственных затрат, но не приводит к максимальной абсолютной прибыли. Оптимальной стратегией для обеих культур является применение умеренных доз минеральных удобрений в комплексе со средствами защиты растений, что гарантирует наилучшее сочетание прироста урожайности и финансовой отдачи.

Результаты опытов подтвердили закономерность: интенсивные технологии не всегда пропорционально повышают экономическую отдачу. Повышенные дозы минеральных удобрений, несмотря на заметное увеличение урожайности, приводят к росту издержек и, как следствие, к снижению рентабельности. Напротив, умеренные дозы удобрений в сочетании со средствами защиты растений позволяют достичь оптимального соотношения затрат и прибыли, что делает их наиболее рациональным вариантом для хозяйственной практики.

При интерпретации экономических показателей важно учитывать долгосрочные последствия для почвенного плодородия. Высокая рентабельность на контроле (без удобрений) достигается за счёт мобилизации почвенных запасов и отрицательного баланса NPK. Для устранения этого противоречия введен попра-

вочный коэффициент – стоимость воспроизводства утраченного плодородия, рассчитанную по ценам минеральных удобрений. Скорректированная рентабельность снижается на контроле до 67 % и становится сопоставимой с вариантами, где удобрения не вносились, тогда как преимущество варианта с умеренной дозой удобрений и СЗР (104 %) сохраняется. Это подтверждает, что именно умеренная химизация экономически и экологически оптимальна.

Таким образом, экономическая эффективность возделывания особых культур формируется на стыке агрономических и экономических факторов. Для обеспечения устойчивого развития агропроизводства необходимо искать баланс между интенсивностью химизации и уровнем затрат. Научная и практическая ценность полученных результатов заключается в том, что они обосновывают приоритет внедрения ресурсосберегающих технологий, способных одновременно повышать продуктивность культур и сохранять высокий уровень рентабельности сельскохозяйственного производства.

Для углублённой оценки эффективности изучаемых агротехнологий, позволяющей исключить влияние ценовых колебаний и объективно оценить вклад антропогенной энергии и почвенных ресурсов, был выполнен биоэнергетический анализ (Таблица 25). Данный подход основан на сопоставлении энергии, накопленной в урожае, с совокупными затратами антропогенной энергии на всех этапах технологического процесса. Особенностью нашего расчёта является включение в статью совокупных затрат энергетических потерь, связанных с изменением почвенного плодородия (потери гумуса и элементов питания), что позволяет дать объективную оценку с позиции устойчивости агроэкосистем (Ахметов Ш.И. и Смолин Н.В., 1997).

Анализ данных таблицы 25 показывает, что все изученные варианты энергетически эффективны (Коэффициент энергетической эффективности (КЭЭ)  $> 1$ ). Однако принципиальные различия выявляются при сопоставлении величины КЭЭ и масштабов потерь почвенного плодородия.

Т а б л и ц а 25 – Биоэнергетическая эффективность возделывания культур

Вариант		Энергия в урожае, МДж/га	Совокупные энергозатраты, МДж/га	Потери энергии из-за снижения плодородия, МДж/га	Совокупные затраты с учётом плодородия, МДж/га	Коэффициент энергетической эффективности
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)					
Однолетние травы (2023 г.)						
Без удобрений (контроль)	Контроль	40 016	6 100	6 219	12 319	3,25
	СЗР	41 656	6 227	6 476	12 703	3,28
Умеренная доза	Контроль	50 512	14 569	3 224	17 793	2,84
	СЗР	63 304	14 696	5 154	19 850	3,19
Высокая доза	Контроль	70 520	23 040	1 849	24 889	2,83
	СЗР	71 504	23 167	1 996	25 163	2,84
Озимая пшеница (2024 г.)						
Без удобрений (контроль)	Контроль	87 487	7 500	7 802	15 302	5,72
	СЗР	99 657	7 901	8 883	16 784	5,94
Умеренная доза	Контроль	117 088	15 494	307	15 801	7,41
	СЗР	156 228	15 895	158	16 053	9,73
Высокая доза	Контроль	165 108	23 495	879	24 374	6,77
	СЗР	181 553	23 896	816	24 712	7,35

Наибольший интерес представляют варианты с умеренными дозами удобрений в сочетании с СЗР. Для озимой пшеницы в варианте  $N_{60}P_{60}K_{40} + \text{СЗР}$  достигнут максимальный КЭЭ (9,73) при минимальных потерях плодородия (всего 158 МДж/га). Для викоовсяной смеси аналогичный вариант  $N_{45}P_{60}K_{60} + \text{СЗР}$  также лидирует среди удобрённых фонов (КЭЭ = 3,19) и характеризуется существенно меньшими потерями элементов питания по сравнению с контролем.

Высокие дозы удобрений обеспечивают больший абсолютный выход энергии с урожаем, но их КЭЭ ниже из-за резкого роста энергозатрат на производство туков. Так, для пшеницы КЭЭ снижается с 9,73 до 7,35, для викоовса – с 3,19 до 2,84, что свидетельствует о снижении энергетической отдачи дополнительных вложений.

Контрольные варианты (без удобрений) формально имеют высокий КЭЭ (5,72 и 3,25), однако сопровождаются максимальными потерями плодородия –

7802 и 6219 МДж/га соответственно. Это означает, что высокая энергетическая эффективность контроля достигается ценой невосполнимого истощения почвенных ресурсов, что делает такие технологии неприемлемыми для долгосрочного устойчивого земледелия.

Таким образом, биоэнергетический анализ полностью подтверждает выводы экономической оценки: оптимальной стратегией является применение умеренных доз удобрений в комплексе со средствами защиты растений, обеспечивающее не только высокую продуктивность, но и сохранение почвенного плодородия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние исследования выявили разнонаправленное влияние средств химизации на плодородие выщелоченного чернозема. Агротехнология без применения удобрений привела к деградации почвы: снижению содержания гумуса на 22 %, подкислению (рН до 5,2) и значительному уменьшению запасов легкогидролизуемого азота (на 46–49 %), подвижного фосфора (на 39–46 %) и обменного калия (на 35–42 %). Использование высоких доз минеральных удобрений, несмотря на рост содержания подвижного фосфора (до +40 %) и калия (до +22 %), усугубляло подкисление и потери гумуса. Только сбалансированная система с умеренными дозами минеральных удобрений в комплексе со средствами защиты растений способствовала стабилизации гумусового баланса, поддержанию уровня азота и увеличению содержания доступных фосфора (до +6 %) и калия (до +18 %).

Комплексное применение средств химизации обеспечило значительный рост продуктивности и улучшение качества урожая. Для викоовсяной смеси умеренные дозы удобрений ( $N_{45}P_{60}K_{60}$ ) повышали урожайность зеленой массы на 34–38 %, а высокие ( $N_{90}P_{120}K_{120}$ ) – на 71–78 % относительно контроля (14,0 т/га); применение СЗР давало дополнительную прибавку в 5–10 %. Содержание сырого протеина при этом возрастало с 18,5 % до 22,3 %. Урожайность озимой пшеницы на контроле (2,74 т/га) повышалась на 25 % при внесении  $N_{60}P_{60}K_{40}$  и на 54 % – при внесении  $N_{120}P_{120}K_{80}$ . Использование СЗР дополнительно увеличивало сбор зерна на 15 % на неудобренном фоне и до 78 % в комбинации с высокой дозой удобрений, а содержание сырого протеина в зерне возрастало с 11,9 % до 14,2 %.

Анализ баланса питательных веществ за период 1992–2024 гг. выявил систематический дефицит фосфора (в среднем –77,7 кг/га) при внесении под озимую пшеницу повышенных доз удобрений ( $N_{120}P_{120}K_{80}$ ), а баланс азота и калия оставался неустойчивым и в отдельные годы отрицательным. Применение средств защиты растений в сочетании с удобрениями усиливало вынос элементов высоко-

продуктивными посевами: на варианте с высокой дозой удобрений и СЗР баланс азота и калия становился устойчиво положительным, однако дефицит фосфора усугублялся (до  $-64,8$  кг/га в 2024 г.). Для устойчивого воспроизводства плодородия необходимы систематические внесения с обязательным увеличением фосфорной компоненты до  $P_{130-150}$ .

Длительное применение средств химизации существенно улучшило фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы. На неудобренном контроле численность малолетних сорняков оставалась высокой ( $32$  шт./ $m^2$ ), тогда как при внесении высоких доз удобрений она снижалась до  $11$  шт./ $m^2$ , а в сочетании с гербицидами – до  $3$  шт./ $m^2$  (биологическая эффективность  $91-93$  %). Применение фунгицидов снижало развитие листостебельных болезней на  $70-80$  %. Установлено, что увеличение доз азотных удобрений свыше  $N_{90}$  усиливало развитие мучнистой росы на  $15-20$  %, в то время как фосфорно-калийные удобрения повышали устойчивость растений к болезням.

Наиболее высокая экономическая эффективность достигается при оптимизации доз минеральных удобрений в сочетании со средствами защиты растений. Для викоовсяной смеси максимальный условный чистый доход ( $27,9$  тыс. руб./га) и рентабельность ( $93$  %) получены на варианте с умеренной дозой удобрений и СЗР; применение высокой дозы снижало рентабельность до  $52-56$  %. Для озимой пшеницы наиболее выгодным оказался вариант с дозой  $N_{60}P_{60}K_{40}$  и СЗР, обеспечивший  $31,9$  тыс. руб./га дохода при рентабельности  $108$  %, тогда как при высокой дозе ( $N_{120}P_{120}K_{80}$ ) рентабельность падала до  $69-74$  %. Биоэнергетическая оценка подтвердила эти выводы: вариант с умеренной дозой удобрений и СЗР характеризовался максимальным коэффициентом энергетической эффективности ( $9,73$  для пшеницы) при минимальных потерях почвенного плодородия. Таким образом, оптимизированная система химизации обеспечивает рост стоимости продукции более чем в  $1,5-2$  раза по сравнению с контролем без непропорционального роста затрат.

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ**

1. В условиях лесостепи юга Нечерноземной зоны РФ для предотвращения деградации почвенного плодородия и поддержания оптимального агрохимического состояния выщелоченных черноземов необходимо проводить системный мониторинг агрохимических показателей плодородия и применять сбалансированные дозы минеральных удобрений в диапазоне  $N_{60-90}P_{60-120}K_{40-80}$ .

2. Для получения урожайности озимой пшеницы 4–5 т/га с содержанием сырого протеина в зерне 13 % рекомендуется внесение азотоса в дозировке 3,5–3,7 ц/га на фоне применения средств защиты растений: гербицид Балерина 0,6 л/га + Мортира 0,15 л/га; инсектицид Борей Нео 0,15 л/га; фунгицид Балий 0,8 л/га + Ракурс 0,2 л/га.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Полученные результаты и выявленные закономерности определяют перспективы дальнейшей научной разработки темы, в первую очередь в сфере изучения биохимических и микробиологических аспектов. В частности, требуется исследование механизмов, обеспечивающих на 15–20 % накопление гумуса при применении средств защиты растений, а также микробиологических основ снижения на 70–80 % развития листостебельных инфекций. В рамках продолжения лизиметрического опыта необходим мониторинг миграции элементов питания с установлением количественных параметров выноса макро- и микроэлементов. На основе накопленного массива данных актуальной задачей является разработка цифровых моделей для прогнозирования динамики плодородия и урожайности, что послужит основой для алгоритмов ведения точного земледелия в регионе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова, Е. В. Изменение кислотно-основных свойств почв при интенсивном земледелии / Е. В. Абрамова // *Агрохимия*. – 2015. – № 4. – С. 29–36.
2. *Агрохимия на службе урожая* / Н. С. Егорашева, А. А. Девяткин, К. С. Бычков, В. П. Шуркин // Саранск : Мордов. кн. изд-во. – 1981 – 103 с.
3. Агроэкологическое состояние почв Брянской области / А. В. Крылов, П. В. Прудников, С. В. Карпеченко [и др.]. – Брянск : Клинцовская городская типография, 2007. – 608 с.
4. 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.
5. Азаров, В. Б. Баланс элементов питания в почве в зависимости от технологии возделывания сельскохозяйственных культур в ЦЧЗ / В. Б. Азаров // *Научный журнал КубГАУ*. – 2012. – № 77. – С. 760–769.
6. Акимова, А. С. Круговорот соединений фосфора в почве / А. С. Акимова // *Международный научный журнал*. – 2023. – № 8 (134). – С. 2.
7. Алиев, А. М. Влияние комплексного применения средств химизации на баланс питательных элементов в условиях Центрального Нечерноземья / А. М. Алиев, Е. Н. Старостина, Г. А. Ивашенков // *Плодородие*. – 2022. – № 6 (129). – С. 52–54.
8. Алиев, А. М. Комплексное применение средств химизации и их влияние на урожайность и качество зерновых культур в севообороте Центрального Нечерноземья / А. М. Алиев, Е. Н. Старостина, Г. А. Ивашенков // *Плодородие*. – 2020. – № 2 (113). – С. 26–28.
9. Алиметова, Л. Я. Экономическая эффективность сельскохозяйственного производства в условиях рыночных преобразований (на примере республики

Дагестан) / Л. Я. Алиметова, Ф. М. Уруджев // Региональная экономика: теория и практика. – 2008. – № 28. – С. 63–66.

10. Артемьев, А. А. Влияние срока сева и минерального питания на продуктивность однолетних травосмесей / А. А. Артемьев, А. М. Гурьянов, М. П. Капитанов, А. А. Пронин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2021. – Т. 22, № 5. – С. 735–744.

11. Артемьев, А. А. Результаты дифференцированного применения средств химизации в условиях Республики Мордовия / А. А. Артемьев // Вестник земледелия. – 2012. – № 2. – С. 16–17.

12. Ахметов, Ш. И. Влияние средств химизации на продуктивность сельскохозяйственных культур в условиях техногенного уплотнения почвы / Ш. И. Ахметов, А. Ю. Осичкин, Д. И. Иванов // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 1. – С. 81–85.

13. Ахметов, Ш. И. Средства химизации и биоэнергетическая эффективность агрофитоценозов / Ш. И. Ахметов, Н. В. Смолин // Саранск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», 1997. – 52 с.

14. Балаев, А. Д. Трансформация органического вещества черноземных почв под влиянием длительного применения различных систем обработки и удобрения / А. Д. Балаев, М. В. Гаврилюк, В. Н. Недбаев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 1. – С. 47–48.

15. Балкизов, А. Б. Лизиметрический метод исследования водного баланса почвенных и грунтовых вод / А. Б. Балкизов, А. С. Сасиков // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. – 2021. – № 3(33). – С. 34–40.

16. Бахвалова, С. А. Формирование элементов структуры урожайности в зависимости от норм высева озимой пшеницы сортов отечественной селекции / С. А. Бахвалова, Г. Б. Демьянова-Рой, А. В. Федорова // Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов:

материалы 74-й Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. (26 января 2023 г., г. Каравеево). Каравеево : Изд-во Костромская ГСХА. – 2023. – С. 7–11.

17. Безрукова, А. М. Продуктивность вико-овсяной смеси в зависимости от доз азотных удобрений / А. М. Безрукова, О. В. Рахимова // Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства : материалы III Международной научно-практической конференции, Воронеж, 30 апреля 2021 года. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2021. – С. 336–343.

18. Белоусова, Н. И. Роль миграции водорастворимых веществ в формировании подзолистых Al-Fe-гумусовых почв (по данным лизиметрических исследований) / Н. И. Белоусова // Почвоведение. – 1974. – № 12. – С. 54–70.

19. Бочкарев, Д. В. Теоретическое обоснование и эффективность защиты сельскохозяйственных культур от сорных растений в земледелии юга Нечернозёмной зоны : дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.01.01 «Общее земледелие, растениеводство» / Д. В. Бочкарев. – Саратов, 2015. – 496 с.

20. Бурлака, В. А. Горохово-просяная смесь – важный резерв повышения качества кормов / В. А. Бурлака, И. В. Чепрасов // Кормопроизводство. – 2006. – № 5. – С. 13–16.

21. Бычков, К. С. Удобрения и урожай : (Справ. агронома) / К. С. Бычков, Н. Г. Шукаев. – Саранск : Мордов. кн. изд-во. – 1987. – 168 с.

22. Варникова, С. А. Роль минеральных удобрений в эвтрофировании водоемов // Теория и практика современной науки. – 2016. – № 12–1 (18). – С. 214–217.

23. Васбиева, М. Т. Влияние длительного применения азотных, фосфорных и калийных удобрений на содержание форм соединений фосфора в дерново-подзолистой почве Предуралья / М. Т. Васбиева, Н. Е. Завьялова, Д. Г. Шишков // Почвоведение. – 2024. – № 8. – С. 1125–1132.

24. Васильев, В. Н. Управление экономической эффективностью сельскохозяйственных предприятий / В. Н. Васильев, А. П. Кузнецов // Агропромышленный комплекс России. – 2019. – № 7. – С. 15–22.

25. Винник, М. А. Первые итоги наблюдений в открытом лизиметре / М. А. Винник, Н. Н. Большев // Почвоведение. – 1972. – № 4. – С. 114–121.

26. Влияние длительного применения систем удобрений на видовой состав и численность насекомых-фитофагов и их энтомофагов в посевах озимой пшеницы на черноземе выщелоченном / Н. Н. Глазунова, Ю. А. Безгина, Л. В. Мазницына [и др.] // Агрехимический вестник. – 2018. – № 4. – С. 46–50.

27. Влияние длительного применения средств химизации на динамику органического вещества и кислотности почвы / О. А. Логаева, Н. В. Потапова, Н. В. Смолин [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2026. – № 2(256). – С. 25–31.

28. Влияние минеральных удобрений и средств защиты на кормовые качества однолетних трав / О. А. Логаева, Н. В. Потапова, Н. В. Смолин [и др.] // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы : сб. статей XIX Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 08–09 нояб. 2024 г. – Пенза : Пензенский ГАУ, 2024. – С. 225–228.

29. Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода / Н. Б. Зинякова, Д. А. Соколов, Т. Н. Лебедева [и др.] // Агрехимия. – 2024. – № 4. – С. 14–34.

30. Влияние некорневых подкормок различными жидкими удобрениями на развитие болезней и продуктивность озимой пшеницы / Р. И. Сафин, Р. М. Низамов, Г. С. Миннуллин [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – № 2 (46). – С. 42–48.

31. Влияние различных доз удобрений на урожайность культур севооборота и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы / Н. В. Кочергина, Ю. П. Жуков, О. В. Чухина [и др.] // Плодородие. – 2015. – № 2 (83). – С. 14–20.

32. Волюнкина, О. В. Баланс питательных веществ на посевах сельскохозяйственных культур / О. В. Волюнкина // Плодородие. – 2020. – № 4 (115). – С. 13–16.

33. Воронин, А. Н. Действие различных агроприемов на засоренность дерново-подзолистой глееватой почвы и урожайность вико-овсяной смеси / А. Н. Воронин // Ресурсосберегающие технологии в земледелии : материалы II Международной научно-практической конференции, Ярославль, 14 декабря 2016 года. – Ярославль : Ярославская ГСХА, 2017. – С. 16–21.

34. Габдуллин, В. Р. Мониторинг плодородия почв Республики Марий Эл и пути его повышения / В. Р. Габдуллин, Л. А. Гараева // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – № 4. – С. 22–25.

35. Гамаюнова, В. В. Основные элементы структуры урожая пшеницы озимой в зависимости от сорта и фона питания / В. В. Гамаюнова, И. В. Смирнова // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 3 (67). – С. 145–149.

36. Гамидов, Г. Г. Рентабельность как показатель экономической эффективности сельскохозяйственного производства и методические вопросы ее исчисления / Г. Г. Гамидов // Вестник СПИ. – 2020. – № 3 (35). – С. 7–21.

37. Гальцова, А. Д. Оценка эффективности различных форм азотных удобрений при выращивании растений-ремедиантов на нефтезагрязненном черноземе типичном / А. Д. Гальцова, Р. Р. Кинжаев, А. В. Арзамазова, В. А. Романенков // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2024. – № 1. – С. 33–41.

38. Гасанов, Г. Н. Сидерация как фактор улучшения фитосанитарного состояния посевов озимой пшеницы / Г. Н. Гасанов, А. А. Римиханов, С. А. Салихов // Защита и карантин растений. – 2012. – № 2. – С. 32–34.

39. Годунова, Е. И. Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание гумуса в чернозёме обыкновенном Центрального Предкавказья / Е. И. Годунова, Н. Н. Шаповалова // Известия ОГАУ. – 2017. – № 4 – (66). – С. 20–24.

40. Голованова, Т. Н. Химизация сельского хозяйства / Т. Н. Голованова // Новые технологии. – 2016. – № 4. – С. 133–137.

41. Голосной, Е. В. Влияние удобрений на засоренность и урожайность озимой пшеницы в ООО «Агросоюз Красногвардейский» / Е. В. Голосной, В. М. Марцинкевич // Форум молодых ученых. – 2023. – № 5 (81). – С. 54–56.
42. Голубев Б. А. Лизиметрические методы исследования в почвоведении и агрохимии. / Б. А. Голубев // М. : Наука, 1967. – 110 с
43. Гоман, Н. В. Влияние микроудобрений на структуру урожая озимой пшеницы / Н. В. Гоман, В. И. Попова, И. А. Бобренко // Вестник КрасГАУ. – 2016. – № 1 (112). – С. 114–117.
44. Гречишников, Н. Н. Орошаемое луговое хозяйство и лизиметрические исследования в Федеральном научном центре кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса (к 85-летию Б. И. Короткова) / Н. Н. Гречишников, В. А. Родионов, И. А. Трофимов // Адаптивное кормопроизводство. – 2023. – № 1. – С. 60–73.
45. Гурьянов, А. М. Влияние срока сева и минерального питания на продуктивность однолетних травосмесей / А. М. Гурьянов, А. А. Артемьев, М. П. Капитанов, А. А. Пронин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2021. – Т. 22, № 5. – С. 735–744.
46. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода / Б. М. Когут, В. М. Семенов, З. С. Артемьева [и др.] // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3–13.
47. Демидов, В. В. Влияние эрозионных процессов в период весеннего снеготаяния на химический состав вод речного стока / В. В. Демидов, Т. И. Мушаева // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2014. – № 10. – С. 71–76.
48. Демина, Т. Н. Динамика содержания органического вещества в пахотных почвах Центрального региона / Т. Н. Демина // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 25–33.
49. Дёмин, А. П. Агроэкологические основы применения удобрений в земледелии Нечернозёмной зоны / А. П. Дёмин. – Москва : Россельхозакадемия, 2012. – 252 с.

50. Дёмина, Т. Н. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические свойства почв Центральной России / Т. Н. Дёмина // *Агрохимия*. – 2020. – № 9. – С. 42–51.

51. Дудкина, Т. А. Факторы повышения урожайности озимой пшеницы / Т. А. Дудкина // *Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы VI Международной научно-практической конференции (Минск, 30–31 марта 2023 г.)*. – Минск : БГАТУ, 2023. – С. 189–191.

52. Дудкина, Т. А. Влияние севооборотов на потоки вещества и энергии в агробиогеоценозах / Т. А. Дудкина // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2019. – № 7. – С. 33–42.

53. Елешев, Р. Е. *Агрохимия : учебник* / Р. Е. Елешев, А. М. Балгабаев, Р. Х. Рамазанова. – Алматы : Альманах, 2016. – 320 с.

54. Елисеев, С. Л. Качество семян вики посевной в Предуралье / С. Л. Елисеев // *Аграрный вестник Урала*. – 2010. – № 8 (74). – С. 33–35.

55. Еремин, Д. И. Влияние минеральных удобрений на содержание легкогидролизуемого азота и нитрификационную способность пахотного чернозема в лесостепи Зауралья / Д. И. Еремин, О. Н. Демина // *Вестник КрасГАУ*. – 2021. – № 2 (167). – С. 26–32.

56. Ерёмин, Д. И. Влияние уровня минерального питания на развитие корончатой ржавчины и продуктивность овса посевного / Д. И. Ерёмин, А. В. Любимова, В. В. Сахарова // *Земледелие*. – 2025. – №6. – С. 41–46.

57. Жерештиев, А. А. Химизация сельского хозяйства / А. А. Жерештиев, З. В. Ордашева // *Экономика и социум*. – 2018. – № 11 (54). – С. 348–349.

58. Жуков, Ю. П. Влияние различных доз удобрений на урожайность культур севооборота и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы / Ю. П. Жуков, О. В. Чухина, Н. В. Токарева, Е. И. Куликова // *Плодородие*. – 2015. – № 2 (83). – С. 14–20.

59. Жуков, Ю. П. Плодородие дерново-подзолистой почвы и продуктивность культур в севообороте при применении различных доз удобрений / Ю. П. Жуков, О. В. Чухина // *Агрохимия*. – 2013. – № 11. – С. 10–18.

60. Завалин, А. А. Азот в агросистеме на черноземных почвах / А. А. Завалин, О. А. Соколов, Н. Я. Шмырева. – Москва : РАН, 2018. – 180 с.
61. Зайцева, Г. А. Фосфор – как основной элемент в развитии растений полевого севооборота / Г. А. Зайцева, О. М. Ряскова // Наука и Образование. – 2019. – № 4. – С. 158.
62. Захаренко, В. А. Особенности развития технологий защиты растений в агроэкосистемах в условиях рыночной экономики России / В. А. Захаренко // Агрохимия. – 2023. – № 8. – С. 45–57.
63. Защепкин, Е. Е. Фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы при технологии прямого посева на черноземе выщелоченном / Е. Е. Защепкин, А. П. Шутко, А. Н. Есаулко // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 9. – С. 25–28.
64. Защита сельскохозяйственных культур от вредных организмов в периоды ухода и хранения : учеб. пособие / Н. Ф. Денискина, Ш. В. Гаспарян, М. Е. Дыйканова [и др.]. – Москва : МЭСХ, 2021. – 108 с.
65. Зеленева, Ю. В. Зависимость развития септориоза от агротехнических приемов в условиях Тамбовской области / Ю. В. Зеленева, В. П. Судникова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 192–193.
66. Зеленский, Н. А. Влияние элементов технологии выращивания на урожайность и качество зерна сортов озимой пшеницы / Н. А. Зеленский, М. И. Текиева // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78. – С. 675–685.
67. Золотарева, Р. И. Роль минерального питания и сорта в повышении зерновой продуктивности ярового овса / Р. И. Золотарева, В. А. Максимов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2025. – № 4. – С. 4–8.
68. Зотиков, В. И. Роль научного наследия Шатиловской СХОС в развитии аграрной науки в России / В. И. Зотиков, А. В. Николаев, Н. В. Грядунова, Т. С. Наумкина // Земледелие. – 2016. – № 4. – С. 15–19.

69. Иванов, Д. А. Особенности динамики закисления почв в агроландшафте / Д. А. Иванов, М. В. Рублюк, О. Н. Анциферова // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. – 2023. – № 5. – С. 71–77.

70. Иванова, О. А. Влияние систем удобрения на качество продукции культур зернопропашного севооборота / О. А. Иванова, Т. С. Айсанов, А. Н. Есаулко // Научное обеспечение агропромышленного комплекса молодыми учеными : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию Ставропольского государственного аграрного университета (Ставрополь, 16–22 апреля 2015 г.). – Ставрополь : Изд-во АГРУС, 2015. – С. 32–34.

71. Иванова, Т. И. Прогнозирование эффективности удобрений с использованием математических моделей / Т. И. Иванова. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 235 с.

72. Ивойлов, А. В. Ацидогенная деградация черноземных почв и адаптивные приемы ее преодоления / А. В. Ивойлов // Агрохимия. – 2022. – № 1. – С. 78–85.

73. Известкование почв / И. А. Шильников, Л. А. Лебедева ; ВАСХНИЛ. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 169 с.

74. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и продуктивности зернотравяного севооборота в зависимости от баланса питательных веществ / А. Н. Налиухин, А. В. Ерегин, Д. В. Демидов [и др.] // Агрохимия. – 2023. – № 1. – С. 3–12.

75. Илларионов, А. И. Современные методы и средства защиты озимой пшеницы от сорных растений / А. И. Илларионов. – Текст : электронный // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12, № 3(62). – С. 78–93.

76. Илюшина, Л. Н. Применение химических веществ в сельском хозяйстве / Л. Н. Илюшина // Научный журнал молодых ученых. – 2018. – № 3 (12). – С. 11–12.

77. Карашаева, А. С. Влияние удобрений и средств химизации на плодородие почвы и питание растений / А. С. Карашаева, А. А. Завалин, Г. А. Ивашенков, Е. Н. Старостина // *АгроЭкоИнженерия*. – 2023. – № 4 (117). – С. 4–14.
78. Карпова, Д. В. Анализ состояния фосфора в агросерых почвах Владимирского ополья / Д. В. Карпова, Н. П. Чижилова, Н. А. Колобова, В. В. Кононенко // *Агрехимический вестник*. – 2016. – № 3. – С. 15–19.
79. Кауричев, И. С. Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях : учеб. пособие / И. С. Кауричев, И. М. Яшин, В. А. Черников // Моск. с.-х. акад. им. К. А. Тимирязева, Учеб.-метод. объединение, каф. почвоведения и экологии. – Москва : Изд-во МСХА, 1996. – 142 с.
80. Клочков, А. М. Почвы Мордовии, их использование и улучшение / А. М. Клочков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Саранск : Морд. кн. изд-во, 1978. – 323 с.
81. Ковтун, В. И. Урожайность и элементы ее структуры у новых сортообразцов озимой мягкой пшеницы / В. И. Ковтун // *Земледелие*. – 2014. – № 5. – С. 43–44.
82. Козлова, Л. М. Продуктивность и баланс основных питательных элементов в севооборотах при различных уровнях интенсификации / Л. М. Козлова // *Достижения науки и техники АПК*. – 2019. – № 1. – С. 6–9.
83. Козлова, Л. М. Опыт разработки и подходы к совершенствованию адаптивных систем земледелия на ландшафтнoй основе в условиях центральной зоны Северо-Восточного региона европейской части РФ / Л. М. Козлова, Н. Е. Рубцова, Н. Н. Соболева // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2016. – № 5 (54). – С. 56–62.
84. Козлова, Н. В. Комплексная оценка насыщенности почв фосфором в связи с проблемой зафосфачивания при возделывании многолетних культур в субтропиках России / Н. В. Козлова, В. В. Керимзаде // *Агрехимический вестник*. – 2025. – №4. – С. 31–40.

85. Кононенко, В. В. Анализ состояния фосфора в агросерых почвах Владимирского ополья / В. В. Кононенко, Д. В. Карпова, Н. П. Чижикова, Н. А. Колобова // *Агрехимический вестник*. – 2016. – № 3. – С. 15–19.
86. Комплексная оценка состояния калия в почве / А. Ф. Сафонов, В. И. Савич, И. Г. Платонов [и др.] // *Известия ТСХА*. – 2006. – № 3. – С. 15–28.
87. Комплексное применение агрохимических средств – основа высокой продуктивности и устойчивости земледелия / А. М. Алиев, В. А. Варламов, Г. И. Ваулина [и др.] // *Плодородие*. – 2009. – № 2. – С. 4–8.
88. Корнейко, Н. И. Мониторинг кислотности пахотных почв в Белгородской области / Н. И. Корнейко // *Успехи современного естествознания*. – 2013. – № 9. – С. 152–155.
89. Косолапов, В. М. Агрolandшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление / В. М. Косолапов, И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева. – Москва : Наука, 2015. – 198 с.
90. Котлярова, О. Г. Плодородие агроландшафтов Центрально-Черноземной зоны : монография / О. Г. Котлярова, Г. И. Уваров, Е. Г. Котлярова. – Белгород : БелГСХА, 2004. – 277 с.
91. Кошаева, И. П. Пути повышения рентабельности сельскохозяйственных предприятий / И. П. Кошаева, Е. А. Мурзина. – Текст : электронный // *Вестник магистратуры*. – 2014. – № 4–2 (31). – С. 140–143.
92. Кошеляев, В. В. Особенности формирования элементов структуры урожая у сортов озимой пшеницы при различных уровнях минерального питания / В. В. Кошеляев, И. П. Кошеляева, Н. М. Гурьянова // *Нива Поволжья*. – 2021. – № 2 (59). – С. 46–54.
93. Кузнецова, Е. И. Методы полевых, вегетационных и лизиметрических исследований в агрономии : учеб. пособие / Е. И. Кузнецова, М. Г. Алещенко, Е. Н. Закабунина. – Москва : Российский государственный аграрный заочный университет, 2010. – 81 с.

94. Кузнецова, Е. И. Актуальность лизиметрических экспериментов в комплексном экологическом анализе почв / Е. И. Кузнецова, М. В. Ларионов // Инновации в науке. – 2016. – № 12-1 (61). – С. 26–28.

95. Кузнецова, Т. В. Соотношение минерализуемых пулов углерода и азота в погребенных и современных каштановых почвах / Т. В. Кузнецова, С. Н. Удальцов // Почва как компонент биосферы: актуальные проблемы в условиях изменений климата : материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В. А. Ковды, Пушкино, Московская область, 25–28 ноября 2024 года. – Пушкино, Московская область: Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2024. – С. 15–17.

96. Кузьминых, А. Н. Урожайность и качество вико-злаковых агроценозов в условиях дерново-подзолистой почвы Нечерноземной зоны / А. Н. Кузьминых, Г. И. Пашкова // Известия ОГАУ. – 2017. – № 3 (65). – С. 52–55.

97. Курбонов, Ф. О. Влияние биопрепарата ризоторфин на урожайность вико-овсяной смеси / Ф. О. Курбонов // Сб. науч. тр. по материалам 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Ярославль. – 2017. – С. 22–26

98. Куцев, Д. Н. Влияние различных факторов на содержание протеина в зерне и его сбор при возделывании озимой пшеницы / Д. Н. Куцев, С. А. Пынтиков, А. П. Гвоздов, Л. А. Булавин // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2021. – № 57. – С. 125–135.

99. Лавринова, В. А. Влияние систем основной обработки почвы и средств химизации на микобиоту корневых гнилей озимой пшеницы / В. А. Лавринова, Т. С. Полунина, М. П. Леонтьева // Теория и практика трансдисциплинарных исследований в современном мире : сб. науч. статей по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 01–02 авг. 2019 г.). – Санкт-Петербург : СПбГЭУ, 2019. – С. 66–69.

100. Лебедев, В. В. Воспроизводство плодородия и баланс гумуса при длительном применении удобрений / В. В. Лебедев // Почвоведение. – 2016. – № 7. – С. 811–820.

101. Левин, В. И. Павел Андреевич Костычев – выдающийся ученый агроном и почвовед / В. И. Левин, М. М. Крючков // Вестник РГАТУ. – 2010. – № 2. – С. 22–26.

102. Лизиметрические исследования в агрохимии, почвоведении, мелиорации и агроэкологии. – Москва : ВНИПТИХИМ, 1999. – 147 с.

103. Личко, А. К. Фитосанитарное состояние посевов и урожайность зерна озимой пшеницы при комплексном применении удобрений и химических средств защиты растений в условиях Центрального района Нечерноземной зоны / А. К. Личко, Г. И. Ваулина, Н. М. Личко // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 3. – С. 66–77.

104. Логаева, О. А. Динамика засорённости посевов озимой пшеницы в зависимости от внесения средств химизации / О. А. Логаева // Защита растений от вредных организмов : сб. статей по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 16–20 июня 2025 г. – Краснодар : Кубанский ГАУ, 2025. – С. 231–233.

105. Лукин, С. В. Баланс питательных веществ и пути его оптимизации в земледелии России / С. В. Лукин // Агрохимия. – 2012. – № 7. – С. 3–11.

106. Лукин, С. В. Динамика агроэкологического состояния почв Белгородской области при длительном сельскохозяйственном использовании / С. В. Лукин // Почвоведение. – 2023. – № 12. – С. 1671–1685.

107. Лукин, С. В. Круговорот основных питательных элементов в земледелии Белгородской области / С. В. Лукин // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 4. – С. 15–17.

108. Лукин, С. В. Мониторинг агроэкологического состояния пахотных почв Центрально-Черноземного района России / С. В. Лукин // Агрохимия. – 2023. – № 4. – С. 67–77.

109. Лысенко, Н. Н. Влияние длительного применения удобрений на содержание гумуса и кислотность почв / Н. Н. Лысенко // Агрохимия. – 2014. – № 10. – С. 55–63.

110. Мазалов, В. И. Влияние различных доз азотных удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы / В. И. Мазалов, О. М. Мосина, Н. Г. Хмызова, М. М. Донской // Земледелие. – 2019. – № 4. – С. 19–21.

111. Макаров, В. И. Влияние азотных удобрений на кислотность дерново-подзолистой супесчаной почвы и химический состав лизиметрических вод / В. И. Макаров // Вестник АГАУ. – 2016. – № 4 (138). – С. 89–95.

112. Макаров, В. И. Влияние систематического применения удобрений на агрохимические показатели дерново-подзолистой супесчаной почвы / В. И. Макаров, Е. В. Кудрявцева, И. С. Лесникова // Агрохимия. – 2019. – № 8. – С. 45–52.

113. Мальцев, Е. В. Влияние длительного применения минеральных удобрений на физико-химические свойства чернозема / Е. В. Мальцев, В. И. Черкасов, А. В. Карпов // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2011. – № 3 (15). – С. 31–34.

114. Манторова, Г. Ф. Взаимодействие культурных растений и корнеотпрысковых сорняков в агробиоценозе / Г. Ф. Манторова, Л. А. Зайкова // Земледелие. – 2013. – № 2. – С. 45–48.

115. Марцинкевич, В. М. Влияние удобрений на засоренность и урожайность озимой пшеницы в ООО «Агросоюз Красногвардейский» / В. М. Марцинкевич, Е. В. Голосной // Форум молодых ученых. – 2023. – № 5 (81). – С. 54–56.

116. Марчик, Т. П. Почвоведение с основами растениеводства : учеб. пособие / Т. П. Марчик, А. Л. Ефремов ; Гродненский гос. ун-т им. Янки Купалы. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 249 с.

117. Марченко, Т. А. Факторы повышения урожайности озимой пшеницы / Т. А. Марченко // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 30–31 марта 2023 г.). – Минск : БГАТУ, 2023. – С. 189–191.

118. Марчук, Е. В. Влияние совместного применения удобрений и гербицида на засоренность и продуктивность посевов озимой пшеницы на

дерново-подзолистой почве / Е. В. Марчук, Е. И. Золкина, С. М. Лукин // *Агрохимический вестник*. – 2022. – № 5. – С. 25–32.

119. Минеев, В. Г. *Агрохимия : учебник* / В. Г. Минеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : КолосС, 2004. – 720 с.

120. Митрофанов, В. Н. Действие различных агроприемов на засоренность дерново-подзолистой глееватой почвы и урожайность вико-овсяной смеси / В. Н. Митрофанов // *Ресурсосберегающие технологии в земледелии : сб. науч. трудов по материалам II Междунар. науч.-практ. конф. (Ярославль, 14 дек. 2016 г.)*. – Ярославль : Ярославская ГСХА, 2017. – С. 16–21.

121. Меркулова, С. В. Климат и хозяйственная деятельность на территории Республики Мордовия: современные тенденции / С. В. Меркулова, П. И. Меркулов // *Научное обозрение*. – 2020. – №4. – С. 1–6.

122. Многолетние исследования физических свойств почв в больших лизиметрах МГУ: основные итоги первых 60 лет (1961–2021) / А. Б. Умарова, Т. А. Архангельская, А. А. Кокорева [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. – 2021. – № 3. – С. 5–15.

123. Мониторинг кислотности пахотных почв Центрально-Черноземного района / П. А. Чекмарев, С. В. Лукин, Ю. И. Сискевич [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. – 2011. – № 7. – С. 6–8.

124. Мониторинг содержания органического вещества в пахотных почвах ЦЧР / П. А. Чекмарев, С. В. Лукин, Ю. И. Сискевич [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. – 2011. – № 10. – С. 23.

125. Налиухин, А. Н. Эффективность фосфорных удобрений: результаты исследований в длительных полевых опытах России, Великобритании и Китае / А. Н. Налиухин, Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан, Ю. Е. Гусева // *Агрохимия*. – 2024. – № 12. – С. 89–100.

126. Наумов, В. Д. Научное наследие академика В. Р. Вильямса в почвоведении / В. Д. Наумов // *Известия ТСХА*. – 2014. – № 1. – С. 10–15.

127. Новиков, В. В. Влияние азотных удобрений на урожайность и качество зерна озимой пшеницы / В. В. Новиков, А. Н. Орлов, Г. С. Егоров // Земледелие. – 2018. – № 2. – С. 21–25.

128. Обзор лизиметрических станций в Словакии / И. Матусек, С. Рет, К. Хердт [и др.] // 17th Gumpensteiner Lysimetertagung. – 2017. – С. 209–212.

129. О возможности использования почвенных лизиметров для моделирования миграции нефти и продуктов её трансформации / М. Г. Кегиян, Е. И. Ковалева, А. С. Горленко [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – № 1-3. – С. 910–916.

130. Околелова, А. А. Экологическое почвоведение и законы экологии : учебное пособие / А. А. Околелова, В. Ф. Желтобрюхов, Г. С. Егорова. – Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2017. – 220 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/107857> (дата обращения: 07.04.2024).

131. Опыт разработки и подходы к совершенствованию адаптивных систем земледелия на ландшафтной основе в условиях центральной зоны Северо-Восточного региона РФ / Л. М. Козлова, Н. Е. Рубцова, Н. Н. Соболева // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2016. – № 5 (54). – С. 56–62.

132. Осипов, А.И. История научных исследований в агрохимии и перспективы применения удобрений в России / А.И. Осипов, В.П. Якушев, В.В. Якушев // Агрохимический вестник. – 2020. – №2. – С. 73–79.

133. Осипов, А. И. Научные основы химической мелиорации почв и перспективы их дальнейшего изучения / А. И. Осипов // Агрофизика. – 2012. – № 3. – С. 41–50.

134. Осипов, А. И. Роль удобрений в плодородии почв и питании растений / А. И. Осипов // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 874–887.

135. О совершенствовании мер борьбы с многолетними сорными растениями / Ю. А. Миренков, В. Р. Кажарский, А. В. Папсуев [и др.] // Вестник

Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1. – С. 68–73.

136. Основные результаты длительного (с 1931 г.) полевого опыта Д. Н. Прянишникова на даос / Ю. Г. Грицевич, В. Г. Игнатов, Н. К. Сидоренкова [и др.] // *Агрохимический вестник*. – 2012. – № 6. – С. 30–33.

137. Особенности формирования урожайности вико-овсяной смеси в зависимости от погодных условий и средств химизации / О. А. Логаева, Н. В. Смолин, Н. В. Потапова [и др.] // *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 11. – С. 35–41.

138. Особенности функционирования почвенного поглощающего комплекса чернозема выщелоченного Прикубанской низменности при многолетнем его использовании в зернотравяно-пропашном севообороте / О. А. Подколзин, В. Н. Слюсарев, А. В. Осипов, Е. Д. Федащук // *Земледелие*. – 2025. – № 2. – С. 23–27.

139. Оценка влияния длительного применения минеральных удобрений на свойства почв, качество продукции и накопление  $^{137}\text{Cs}$  урожаем зерновых культур / В. К. Кузнецов, Н. И. Санжарова, С. В. Серегин [и др.] // *Агрохимия*. – 2017. – № 2. – С. 64–72.

140. Оценка влияния новых органоминеральных препаратов на формирование урожая и качество зерна озимой пшеницы / Ф. В. Ерошенко, И. Г. Сторчак, Е. А. Бильдиева, А. А. Калашникова // *Агрохимический вестник*. – 2020. – № 2. – С. 7–12.

141. Оценка влияния систематического внесения удобрений и предшественников на урожай и качество зерна озимой пшеницы / А. В. Федюшкин, С. В. Пасько, А. В. Парамонов [и др.] // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2017. – № 4 (66). – С. 65–68.

142. Павлова, Т. Н. Динамика фитосанитарного состояния посевов озимой пшеницы в условиях применения минеральных удобрений / Т. Н. Павлова, Д. В. Козлов, А. А. Зайцев // *Агрохимический вестник*. – 2021. – № 4. – С. 27–33.

143. Павлюшин, В. А. Приёмы фитосанитарной оптимизации агробиоценозов кормовых культур в Зауралье / В. А. Павлюшин, А. А. Постовалов // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – №1 (45). – С. 13–22.

144. Папсуев, А. В. Продуктивность вико-овсяной смеси при внесении удобрений / А. В. Папсуев, Ю. А. Миренков, В. Р. Кажарский // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 23–28.

145. Парамонов, А. В. Влияние систематического применения удобрений на плодородие почвы в длительном стационарном опыте / А. В. Парамонов, С. В. Пасько // Географическая сеть опытов с удобрениями : материалы Всерос. совещ. науч. учреждений – участников Географической сети опытов. – Москва : ВНИИА, 2016. – С. 204–209.

146. Пигорев, И. Я. Влияние макро- и микроудобрений на фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы / И. Я. Пигорев, В. А. Кудинов, Г. А. Бирюков // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 8. – С. 80–89.

147. Пеньков, Д. В. Содержание гумуса и баланс органического вещества в пахотных почвах при длительном применении удобрений / Д. В. Пеньков, Е. С. Романенко // Почвоведение. – 2017. – № 5. – С. 620–628.

148. Плотников, А. М. Зависимость урожайности зерновых культур от содержания в почве доступных форм фосфора и калия / А. М. Плотников // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 1 (29). – С. 17–20.

149. Показатели структуры урожая озимой пшеницы в зависимости от применения средств химизации / О. А. Логаева, Н. В. Смолин, Н. В. Потапова [и др.] // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. – 2025. – Т. 4, № 1 (13). – С. 36–41.

150. Попов, В. В. Почвенный раствор и методы его изучения / В. В. Попов // Почвы и окружающая среда. – 2020. – Т. 3, № 1. – С. 4–10.

151. Применение лизиметрических методов в почвоведении, агрохимии и ландшафтоведении : материалы Всесоюз. совещ., Ленинград, 1972 г. / отв. ред. Е. И. Шилова ; Геогр. о-во СССР. – Ленинград, 1972. – 163 с.

152. Принципы интегрированного подхода к решению проблем защиты растений / М. М. Левитин, В. И. Танский, Ю. И. Власов [и др.] // Вестник защиты растений. – 1999. – № 1. – С. 44–51.

153. Прищепа, И. А. Влияние минеральных удобрений на эффективность пестицидов и ретардантов, применяемых на посевах зерновых колосовых культур (Обзор литературы) / И. А. Прищепа // Вестник защиты растений. – 2000. – №1. – С. 73–93.

154. Продуктивная кустистость озимой пшеницы в зависимости от уровня минерального питания / О. А. Логаева, Н. В. Потапова, Е. Е. Маркачев [и др.] // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : материалы VII Междунар. студенческой науч. конф., Майский, 25–27 февр. 2025 г. – Майский : Белгородский ГАУ, 2025. – С. 88–89.

155. Продуктивность озимой пшеницы в зависимости от доз минеральных удобрений при различных технологиях орошения в условиях Юга России / С. М. Васильев, В. И. Ольгаренко, А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 3 (39). – С. 241–253.

156. Прудников, П. В. Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв Брянской области / П. В. Прудников, С. В. Карпеченко, А. А. Новиков, Н. Г. Поликарпов. – Брянск : Клиновская городская типография, 2007. – 608 с.

157. Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации / А. Л. Иванов, В. С. Столбовой, А. М. Гребенников [и др.] // Бюллетень Почвенного института. – 2020. – № 103. – С. 168–187.

158. Ражева, Д. Р. Содержание различных форм азота в почве при длительном сельскохозяйственном использовании чернозема выщелоченного Южного Зауралья / Д. Р. Ражева // Вестник АГАУ. – 2009. – № 5. – С. 35–39.

159. Резник, А. С. Биоклиматический потенциал города Саранска / А. С. Резник // Научное обозрение. – 2020. – № 3. – С. 1–4.

160. Роль минеральных удобрений и способов обработки почвы в стабилизации фитосанитарной обстановки в посевах озимой пшеницы / М. И. Зазимко, В. Н. Орлов, Т. Б. Пермякова, С. С. Егоров // Защита и карантин растений. – 2010. – № 1. – С. 28–30.

161. Роль органических удобрений (соломы, сидератов, пожнивных корневых остатков) в воспроизводстве и сохранении гумуса в почве / А. Х. Куликова, Е. А. Яшин, Е. А. Черкасов, Е. С. Волкова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 4(60). – С. 53–58.

162. Романенко, А. А. Плодородие чернозема выщелоченного деградированного и продуктивность озимой пшеницы в севообороте при различных способах обработки и системах удобрения / А. А. Романенко, В. М. Кильдюшкин, В. А. Кулик, А. Г. Солдатенко, Е. Г. Животовская // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – №2. – С. 8–10.

163. Рысев, М. Н. Влияние жидких комплексных макро- и микроудобрений на урожайность зерновых культур / М. Н. Рысев, Е. Н. Федотова, М. В. Дятлова // Вестник Брянской ГСХА. – 2019. – № 3 (73). – С. 9–14.

164. Сабинин, Д. А. Избранные труды по минеральному питанию растений / Д. А. Сабинин // Москва : Наука. – 1971. – 512 с.

165. Саидов, М. М. Агрохимический мониторинг почв земель сельскохозяйственного назначения в Тульской области / М. М. Саидов, Г. А. Новикова, Е. М. Молчанова // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – № 12. – С. 51–55.

166. Саленко, Е. А. Влияние минеральных удобрений на пораженность озимой пшеницы корневой гнилью в умеренно-влажной зоне Ставропольского края / Е. А. Саленко, А. Н. Есаулко, А. П. Шутко, А. И. Подколзин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1642.

167. Санин, С. С. Проблемы фитосанитарии России на современном этапе / С. С. Санин // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 6. – С. 45–55.

168. Сапожников, С. Н. Современные системы интегрированной защиты растений / С. Н. Сапожников // Защита и карантин растений. – 2019. – № 6. – С. 3–8.

169. Середа, Н. А. Тенденции изменения плодородия черноземов Южного Урала при различных системах удобрений / Н. А. Середа, Р. И. Баязитова, М. В. Нафикова // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 11. – С. 36–38.

170. Силаев, А. Л. Баланс элементов питания при производстве кормов в зависимости от применения минерального удобрения / А. Л. Силаев, Е. В. Смольский, И. Н. Белоус // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – №3. – С. 39–44.

171. Силяева, Е. С. Народнохозяйственное значение озимой пшеницы и ее роль в продовольственной безопасности страны / Е. С. Силяева // Научный журнал молодых ученых. – 2019. – № 4(17). – С. 39–43.

172. Синих, Ю. Н. Севооборот и биологизация земледелия / Ю. Н. Синих // Аграрная Россия. – 2010. – №6. – С. 5–9.

173. Скрынникова, И. Н. Методы исследования химического анализа жидкой фазы почв / И. Н. Скрынникова // Методы стационарного изучения почв. – Москва : Наука, 1977. – С. 3–40.

174. Смирнов, А. П. Всероссийская научная конференция «Лизиметрические исследования в агрохимии, почвоведении и мелиорации» / А. П. Смирнов // Агрохимия. – 2005. – № 5. – С. 90–92.

175. Смирнов, П. М. Агрохимия / П.М. Смирнов, Э.А. Муравин // – Москва : Колос, 1977. – 239 с.

176. Смолин, Н. В. Влияние средств химизации и соломы на баланс гумуса в зерновом севообороте на черноземе выщелоченном / Н. В. Смолин // Агрохимия. – 1998. – № 1. – С. 21–27.

177. Соколова Т.А. Роль биоты в создании почвенного профиля и функционировании почвы: новые материалы и интерпретация известных фактов и

существующих концепций / Т.А. Соколова // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – Вып. 105. – С. 208–225.

178. Стекольников, К. Е. Влияние длительного применения удобрений и мелиоранта на гумусное состояние чернозема выщелоченного / К. Е. Стекольников, И. С. Горб, О. М. Кольцова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1(36). – С. 13–17.

179. Сычев, В. Г. Значение Географической сети опытов с удобрениями для решения современных проблем сельскохозяйственного производства / В. Г. Сычев, В. А. Романенков, М. В. Беличенко // 75 лет Географической сети опытов с удобрениями : материалы Всероссийского совещания научных учреждений – участников Географической сети опытов с удобрениями. – Москва : ВНИИА, 2016. – С. 3–10.

180. Сычев, В. Г. О балансе питательных веществ в земледелии России / В. Г. Сычев, С. А. Шафран // Плодородие. – 2017. – № 1 (94). – С. 1–4.

181. Сычев, В. Г. Потребность в минеральных удобрениях с учётом роста урожаев и воспроизводства плодородия почв России / В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин // Плодородие. – 2024. – № 4 (139). – С. 5–10.

182. Сычев, В. Г. Применение минеральных удобрений и их эффективность в различных зонах России / В. Г. Сычев, С. А. Шафран, И. В. Ильюшенко // Плодородие. – 2022. – № 3 (126). – С. 3–6.

183. Сычев, В. Г. Стратегия и координация фундаментальных и прикладных агрохимических исследований / В. Г. Сычев // О развитии и совершенствовании методологии фундаментальных и прикладных агрохимических исследований. – Москва : РАСХН, 2005. – С. 23–32.

184. Сычев, В. Г. Факторы эффективности минеральных удобрений / В. Г. Сычев // Плодородие. – 2025. – № 3 (144). – С. 4–7.

185. Ториков, В. Е. Производство продукции растениеводства: учебное пособие / В. Е. Ториков, О. В. Мельникова // Санкт–Петербург: Лань. – 2019. – 512 с.

186. Троц, В. Плодородие почв – основа благосостояния населения / В. Троц, Д. Ахматов // Аграрное решение. – 2011. – № 3. – С. 22–26.

187. Трухачев, В. И. Энергосберегающие, почвозащитные системы земледелия Ставропольского края / В. И. Трухачев, В. М. Пенчуков, Г. Р. Дорожко // Эволюция и деградация почвенного покрова : материалы III Международной научно-практической конференции. – Ставрополь : АГРУС, 2007. – С. 206–209.

188. Тютюрев, С. Л. Сочетание факторов повышения продуктивности и защиты от болезней – необходимое условие рационального возделывания пшеницы в Российской Федерации / С. Л. Тютюрев // Вестник защиты растений. – 2016. – № 1(87). – С. 5–13.

189. Удобрения и качество зелёной массы вико-овсяной смеси / О. В. Чухина, Е. И. Куликова, Н. В. Токарева, К. А. Усова // Кормопроизводство. – 2011. – № 8. – С. 6–8.

190. Усольцев, И. В. Показатели и критерии эффективности сельскохозяйственного производства / И. В. Усольцев // Вестник ГУУ. – 2013. – №4. – С. 236–242.

191. Ферментативная активность черноземов степной зоны / О. А. Йонко, Л. Д. Стахурлова, И. Д. Свистова [и др.] // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия : материалы конф. – Курск, 2010. – С. 100–105.

192. Федоров, А. А. Повышение плодородия почв и улучшение использования земель / А. А. Федоров // Система ведения сельского хозяйства в Приморском крае. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ. – 1981. – С. 26–54.

193. 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.

194. Филиппова, Л. С. Круговорот азота и его соединений в почве / Л. С. Филиппова // Международный научный журнал. – 2023. – № 8 (134). – С. 3.

195. Хачидзе, А. С. Влияние сортовых особенностей и технологии выращивания зерновых культур на вынос питательных веществ и окупаемость удобрений / А. С. Хачидзе, М. Г. Мамедов // *Агрохимия*. – 2009. – № 5. – С. 42–48.

196. Ховатов, А. А. Влияние защиты зернобобовых сидеральных культур от болезней и вредителей на фитосанитарное состояние и продуктивность озимой пшеницы в условиях Тамбовской области : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.11 «Защита растений» / А. А. Ховатов ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Воронеж, 2006. – 24 с.

197. Храмцов, И. Ф. Влияние минеральных удобрений, соломы и средств защиты растений на плодородие чернозема выщелоченного и продуктивность культур зернопарового севооборота / И. Ф. Храмцов, Е. В. Безвиконный // *Агрохимия*. – 1998. – № 5. – С. 31–37.

198. Цыганова, А. В. Агроэкологическая характеристика почв в условиях изменяющегося климата / А. В. Цыганова, Л. П. Романенко // *Аграрная наука*. – 2019. – № 2. – С. 55–59.

199. Чеботарев, Н. Т. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность многолетних трав в кормовом севообороте Европейского Севера / Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова // *Агрохимия*. – 2023. – № 8. – С. 16–22.

200. Чекмарев, П. А. Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв, эффективность применения средств химизации и новых комплексных удобрений в Брянской области / П. А. Чекмарев, П. В. Прудников // *Достижения науки и техники АПК*. – 2016. – Т. 30, № 7. – С. 24–33.

201. Черкасов, Е. А. Динамика кислотности пахотных почв Ульяновской области / Е. А. Черкасов, Б. К. Саматов, А. В. Карпов // *Вестник Ульяновской ГСХА*. – 2011. – № 3 (15). – С. 31–34.

202. Чуян, О. Г. К вопросу оценки динамики кислотности пахотных почв ЦЧР / О. Г. Чуян // *Достижения науки и техники АПК*. – 2019. – № 12. – С. 5–9.

203. Швыркин, С. Н. Баланс питательных элементов как отражение состояния и перспектив продуктивности культур и применения удобрений в

Центральном Нечерноземье : специальность 06.01.04 «Агрохимия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Швыркин С. Н. – Москва. – 2006. – 180 с.

204. Шеуджен, А. Х. Влияние длительного применения удобрений на физико-химические свойства чернозема выщелоченного / А. Х. Шеуджен, М. А. Осипов, И. А. Лебедевский, С. В. Есипенко // Агрохимический вестник. – 2013. – № 6. – С. 2–3.

205. Шилова, Е. И. Почвенные растворы и лизиметрические воды подзолистых почв : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Е. И. Шилова ; Ленингр. гос. ун-т им. А. А. Жданова. – Ленинград, 1964. – 38 с.

206. Щеглов, Д. И. Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов / Д. И. Щеглов. – Москва : [б. и.], 1999. – 320 с.

207. Эвтрофикация пахотной почвы: сравнительное влияние минеральной и органической систем земледелия / В. М. Семенов, Т. Н. Лебедева, Н.Б. Зинякова [и др.] // Почвоведение. – 2023. – № 1. – С. 58–73.

208. Экологическая роль смешанных посевов в стабилизации кормопроизводства Поволжья / Н. Н. Ельчанинова, С. Н. Зудилин, О. Д. Ласкин, А. Е. Старостин // Кормопроизводство. – 2009. – № 2. – С. 5–9.

209. Эффективность защиты озимой пшеницы от болезней современными препаратами Bayer / М. А. Догадина, А. В. Таракин, Л. П. Еремин [и др.] // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2023. – № 6 (105). – С. 17–25.

210. Эффективность допосевного применения гербицидов и их фитотоксичность на выщелоченном чернозёме в Курганской области / Н. Ю. Заргарян, А. С. Филиппов, А. Ю. Кекало [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. – 2020. – № 2 (34). – С. 16-19.

211. Юмашев, Н. П. Мониторинг содержания органического вещества в пахотных почвах Центрально-Черноземного района / П. А. Чекмарев, С. В. Лукин,

Ю. И. Сискевич, Н. П. Юмашев, В. И. Корчагин, А. Н. Хижняков // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 10. – С. 23.

212. Ямалиева, А. М. Степень пораженности озимой пшеницы корневыми гнилями в зависимости от удобрений / А. М. Ямалиева // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2017. – Т. 3, № 2 (10). – С. 62–66.

213. Яшин, И. М. Эко-геохимическая оценка воздействия сельскохозяйственного производства на поверхностные воды : интерактивный курс / И. М. Яшин. – Москва : РГАУ-МСХА, 2014. – 124 с.

214. Эвтрофикация пахотной почвы: сравнительное влияние минеральной и органической систем земледелия / В. М. Семенов, Т. Н. Лебедева, Н.Б. Зинякова [и др.] // Почвоведение. – 2023. – № 1. – С. 58–73.

215. Abhiram, G. An innovative lysimeter system for controlled climate studies / G. Abhiram, M. McCurdy, C. E. Davies [et al.] // Biosystems Engineering. – 2023. – Vol. 228. – P. 105–119.

216. Balykin, D. Using the innovative lysimeter technology in the German–Russian research project KULUNDA / D. Balykin, A. Puzanov, E. Stephan, R. Meissner // Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia / ed. by L. Mueller, A. K. Sheudshen, F. Eulenstein. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – P. 387–399.

217. Bergström, L. Use of lysimeters to estimate leaching of pesticides in agricultural soils / L. Bergström // Environmental Pollution. – 1990. – Vol. 67, № 4. – P. 325–347.

218. Bolker, B. M. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution / B. M. Bolker, M. E. Brooks, C. J. Clark [et al.] // Trends in ecology & evolution. – 2009. – Vol. 24(3). – P. 127–135.

219. Bronick, C. J. Soil structure and management: a review / C. J. Bronick, R. Lal // Geoderma. – 2005. – Vol. 124, № 1–2. – P. 3–22.

220. Butterbach-Bahl, K. Denitrification and associated soil N<sub>2</sub>O emissions due to agricultural activities in a changing climate / K. Butterbach-Bahl, M. Dannenmann // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. – 2011. – T. 3. – №. 5. – С. 389–395.
221. Dick, R. P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters / R. P. Dick // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 1992. – Vol. 40, № 1–4. – P. 25–36.
222. Devkota, M. Managing soil salinity with permanent bed planting in irrigated production systems in Central Asia / M. Devkota, C. Martius, R. K. Gupta [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2015. – Vol. 152. – P. 1–10.
223. Epstein, L. The Impact of Integrated Pest Management Programs on Pesticide Use and Costs / L. Epstein, S. Bassein, F. G. Zalom // Davis : University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. – 2014. – 27 p.
224. Giacometti, C. Rotation and fertilization effects on soil quality and yields in a long-term field experiment / C. Giacometti, F. Mazzoncini, M. Antichi [et al.] // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 636.
225. Giraud, F. Timely fungicide application: a strategy to minimize fusarium head blight and associated mycotoxin production in winter wheat / F. Giraud, O. Klemsdal, H. Jestoi [et al.] // *Journal of Plant Pathology*. – 2011. – P. S15–S18.
226. Goss, M. J. The role of lysimeters in the development of our understanding of processes in the vadose zone relevant to contamination of groundwater aquifers / M. J. Goss, W. Ehlers, A. Unc // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. – 2010. – Vol. 35, № 15–18. – P. 913–926.
227. Guasconi, D. Experimental drought and soil amendments affect grassland above-and belowground vegetation but not soil carbon stocks / D. Guasconi, S. A. Cousins, S. Manzoni, N. Roth, G. Hugelius // *Soil*. – 2025. – T. 11. – №. 1. – С. 233–246.
228. Harsch, N. Large-Scale Lysimeter Site St. Arnold, Germany: Analysis of 40 Years of Precipitation, Leachate and Evapotranspiration / N. Harsch, M. Brandenburg, O. Klemm // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2009. – Vol. 13. – P. 305–317.

229. Hitaj, C. Sowing uncertainty: what we do and don't know about the planting of pesticide-treated seed / C. Hitaj, E. Smith, R. Code [et al.] // *Bioscience*. – 2020. – Vol. 70, № 5. – P. 390–403.
230. Huber, D. M. Relationship between nutrition and plant diseases / D. M. Huber, J. B. Jones // *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* – 2nd ed. – London : Academic Press. – 2012. – P. 283–309.
231. Johnston, A. E. Nitrogen in agriculture: an overview and definitions of nitrogen use efficiency (Proceedings of the International Fertiliser Society No. 651) / A. E. Johnston, P. R. Poulton // *Proceedings of the International Fertiliser Society*. – 2009. – Vol. 651. – 48 p.
232. Khan, S. A. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration / S. A. Khan, R. L. Mulvaney, T. R. Ellsworth, C. W. Boast // *Journal of Environmental Quality*. – 2007. – Vol. 36, № 6. – P. 1821–1832.
233. Kunzová, E. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic / E. Kunzová, M. Hejcman // *Field Crops Research*. – 2009. – Vol. 111. – P. 226–234.
234. Liu, C. Effects of soil acidification on humus, electric charge, and bacterial community diversity / C. Liu, X. Shang, J. Wang, & S. Zhao // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – T. 196. – №. 11. – C. 1116.
235. Mandal, S. Wheat Breeding, Fertilizers, and Pesticides: Do They Contribute to the Increasing Immunogenic Properties of Modern Wheat? / S. Mandal, A. K. Verma // *Gastrointestinal Disorders*. – 2021. – Vol. 3. – P. 247–264.
236. Matusek, I. Review of lysimeter stations in Slovakia / I. Matusek, S. Reth, C. Heerdt [et al.] // 17. Gumpensteiner Lysimetertagung. – 2017. – P. 209–212.
237. McLaughlin, M. J. Metals and micronutrients – food safety issues / M. J. McLaughlin, D. R. Parker, J. M. Clarke // *Field Crops Research*. – 1999. – Vol. 60, № 1–2. – P. 143–163.
238. Menšík, L. 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, E. Kunzová, J. Čermák [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18. – P. 2813–2822.

239. Muller, J. The use of lysimeters in forest hydrology research in north-east Germany / J. Muller, A. Bolte // *Landbauforschung Volkenrode*. – 2009. – Vol. 59, № 1. – P. 1–10.

240. Napoletano M., Depletion and recovery of soil organic matter: Ecological, economic and social implications / M. Napoletano, A. Bellino, D. Baldantoni // *Ecological Civilization*. – 2025. – T. 2. – №. 2. – C. 10002.

241. Pecenka, J. R. IPM reduces insecticide applications by 95 % while maintaining or enhancing crop yields through wild pollinator conservation / J. R. Pecenka, J. G. Lundgren, J. J. Duan // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. – 2021. – T. 118, № 44. – P. 1–8.

242. Pike, V. L. On the diverse and opposing effects of nutrition on disease / V. L. Pike, K. D. Lafferty, J. R. Rohr // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2019. – T. 286, № 1894. – P. 1–9.

243. Ralph, L. The influence of long-term fertilizer use on soil fertility and crop productivity: a review / L. Ralph, P. Hobbs // *Soil & Tillage Research*. – 2014. – Vol. 145. – P. 123–135.

244. Rengel, Z. Nutrient use efficiency in plants: concepts and approaches / Z. Rengel // *Nutrient Use in Crop Plants* / ed. by Z. Rengel. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – P. 1–40.

245. Reth, S. Lysimeter research in Central Europe: current status and perspectives / S. Reth, I. Matusek, H. Meissner [et al.] // *European Journal of Soil Science*. – 2017. – Vol. 68, № 3. – P. 305–318.

246. Ruser, R. Nitrous oxide emissions from soils – a review / R. Ruser, R. Flessa // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2006. – Vol. 72. – P. 207–228.

247. Sattari, S. Z. et al. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle / S. Z. Sattari // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – T. 109. – №. 16. – C. 6348–6353.

248. Schjønning, P. Soil physical constraints to plant growth and crop production / P. Schjønning, S. Elmholt, B. T. Christensen // *Advances in Agronomy*. – 2004. – Vol. 90. – P. 285–295.
249. Smidt, E. Long-term organic matter decomposition studies using large lysimeters / E. Smidt, M. Meissner, J. Müller [et al.] // *Waste Management*. – 2011. – Vol. 31, № 9–10. – P. 1887–1896.
250. Soil moisture determines the consistency of organic matter decomposition in field and lab test patterns / Chen, Q., Li, G., Li, H., Li, Q., Zhou, Z., Feng, Y., ... & Tian, X // *Catena*. – 2024. – T. 246. – C. 108–485.
251. Tilman, D. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture / D. Tilman, C. Balzer, J. Hill, B. L. Befort // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2011. – Vol. 108, № 50. – P. 20260–20264.
252. Tripathi, D. Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant interaction / D. Tripathi, V. P. Singh, S. M. Prasad // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – T. 13. – P. 1–18.
253. Unc, A. Lysimeter studies of nitrogen leaching from agricultural land / A. Unc, M. J. Goss, W. Ehlers // *Journal of Environmental Quality*. – 2004. – Vol. 33, № 4. – P. 1237–1244.
254. Weil R. R., *The nature and properties of soils* / R. R. Weil, N. C. Brady // London, UK : Pearson, 2017. – T. 1104. – P. 217.
255. Welham, S. J. *Statistical methods in biology: design and analysis of experiments and regression* / S. J. Welham, S. A. Gezan, S. J. Clark, A. Mead. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 583 p.
256. Zhang, X. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands / X. Zhang, J. Guo, R. D. Vogt // *Geoderma*. – 2020. – T. 366. – C. 114–234.
257. Zhou, W. *Integrated Pest Management: An Update on the Science and Practice* / W. Zhou, Y. Zhang, Q. Li // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. – 2024. – T. 8. – P. 1–15.

Дозы удобрений в лизиметрическом опыте за период с 1987 по 2024 гг.

Год	Культура севооборота	Доза удобрений, кг д.в. на га					
		Умеренная доза			Высокая доза		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1987	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
1988	Озимая рожь	60	60	40	120	120	80
1989	Картофель	60	60	90	120	120	180
1990	Яровая пшеница	60	60	40	120	120	80
1991	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
1992	Озимая пшеница	60	60	40	120	120	80
1993	Ячмень	60	60	40	120	120	80
1994	Соя	20	60	60	40	120	120
1995	Просо	60	60	60	120	120	120
1996	Картофель	60	60	80	120	120	160
1997	Яровая пшеница	60	60	40	120	120	80
1998	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
1999	Озимая пшеница	60	60	40	120	120	80
2000	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2001	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
2002	Озимая рожь	60	60	40	120	120	80
2003	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2004	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
2005	Картофель	90	90	90	180	180	180
2006	Озимая пшеница	60	60	40	120	120	120
2007	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2008	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
2009	Озимая пшеница	60	60	40	120	120	120
2010	Картофель	90	90	90	180	180	180
2011	Яровая пшеница	60	60	40	120	120	80
2012	Овес	60	60	40	120	120	80
2013	Кукуруза на силос	90	90	90	180	180	180
2014	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2015	Картофель	90	90	90	180	180	180
2016	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
2017	Озимая рожь	60	60	40	120	120	80
2018	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2019	Кукуруза на зерно	90	90	90	180	180	180
2020	Соя	20	60	60	40	120	120
2021	Гречиха	60	60	60	120	120	120

Год	Культура севооборота	Доза удобрений, кг д.в. на га					
		Умеренная доза			Высокая доза		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2022	Ячмень	60	60	40	120	120	80
2023	Однолетние травы	45	60	60	90	120	120
2024	Озимая пшеница	60	60	40	120	120	80
Сумма за 38 лет		2 230	2 430	2 100	4 460	4 860	4 200
Среднее за 38 лет		59	64	55	118	128	110

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание гумуса в слое 0–20 см, %, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	5,1	4,9	5	5,0	5,1	6,0
	СЗР	5,1	5,3	5,3	5,2		
Умеренная доза	Контроль	6,2	6,4	6,3	6,3	6,4	
	СЗР	6,4	6,6	6,6	6,5		
Высокая доза	Контроль	6,7	6,7	6,5	6,6	6,8	6,2
	СЗР	7	6,9	6,8	6,9		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	9,480	17				100
Повторений	0,010	2				0
Вариантов	9,340	5	1,9	143,69	3,33	99
Случайное	0,130	10	0,0			1

Точность опыта % = 99,07      Ошибка разности = 0,08  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,18  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	9,48	17					
Повторений	0,01	2					
Фактор А	9,07	2	4,53	348,85	4,10	95,7	0,15
Фактор В	0,27	1	0,27	20,68	4,96	2,8	0,12
Вз-вие АВ	0,00	2	0,00	0,04	4,10	0,0	Fф<Fт
Случайное	0,13	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	30,70	5,12	0,03	0,07	
А 2	6	38,50	6,42	0,03	0,07	a
А 3	6	40,60	6,77	0,03	0,07	a
В 1	12	53,80	4,48	0,57	0,22	
В 2	12	56,00	4,67	0,58	0,22	a

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание гумуса в слое 21–40 см, %, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	3,7	3,8	3,8	3,8	3,9	4,3
	СЗР	3,9	4	4,1	4,0		
Умеренная доза	Контроль	4,5	4,3	4,4	4,4	4,5	4,4
	СЗР	4,6	4,5	4,5	4,5		
Высокая доза	Контроль	4,8	4,6	4,5	4,6	4,7	4,4
	СЗР	4,9	4,7	4,6	4,7		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	2,324	17				100
Повторений	0,028	2				1
Вариантов	2,178	5	0,4	36,64	3,33	94
Случайное	0,119	10	0,0			5

Точность опыта % = 98,75      Ошибка разности = 0,08  
 Ошибка ср. = 0,05      НСР = 0,17  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	2,32	17					
Повторений	0,03	2					
Фактор А	2,05	2	1,03	86,40	4,10	88,4	0,14
Фактор В	0,11	1	0,11	9,16	4,96	4,7	0,11
Вз-вие АВ	0,01	2	0,01	0,61	4,10	0,6	Fф<Fт
Случайное	0,12	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	23,30	3,88	0,02	0,06	
А 2	6	26,80	4,47	0,01	0,04	a
А 3	6	28,10	4,68	0,02	0,06	a
В 1	12	38,40	3,20	0,16	0,12	
В 2	12	39,80	3,32	0,12	0,10	a

## Дисперсионный анализ

Влияние вариантов опыта на содержание обменной кислотности в слое 0–20 см, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	5,8	5,7	5,8	5,8	5,9	5,5
	СЗР	6	5,9	5,9	5,9		
Умеренная доза	Контроль	5,4	5,6	5,5	5,5	5,5	
	СЗР	5,6	5,6	5,5	5,6		
Высокая доза	Контроль	5,2	5,1	5,2	5,2	5,2	5,6
	СЗР	5,3	5,2	5,3	5,3		

*Результаты анализа в Однофакторной интерпретации*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	1,320	17				100
Повторений	0,003	2				0
Вариантов	1,267	5	0,3	50,67	3,33	96
Случайное	0,050	10	0,0			4

Точность опыта % = 99,36      Ошибка разности = 0,05  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,11  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

*Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	1,32	17					
Повторений	0,00	2					
Фактор А	1,20	2	0,60	120,33	4,10	91,2	0,09
Фактор В	0,06	1	0,06	11,11	4,96	4,2	0,07
Вз-вие АВ	0,01	2	0,00	0,78	4,10	0,6	Fф<Fт
Случайное	0,05	10	0,00				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	35,10	5,85	0,01	0,04	
А 2	6	33,20	5,53	0,01	0,03	b
А 3	6	31,30	5,22	0,01	0,03	b
В 1	12	49,30	4,11	0,07	0,08	
В 2	12	50,30	4,19	0,09	0,08	a

## Дисперсионный анализ

Влияние вариантов опыта на содержание обменной кислотности в слое 21–40 см, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	6	5,9	5,9	5,9	6,0	5,7
	СЗР	5,9	6	6,1	6,0		
Умеренная доза	Контроль	5,7	5,6	5,7	5,7	5,7	5,8
	СЗР	5,9	5,7	5,8	5,8		
Высокая доза	Контроль	5,4	5,5	5,4	5,4	5,5	5,8
	СЗР	5,6	5,5	5,4	5,5		

*Результаты анализа в Однофакторной интерпретации*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	0,871	17				100
Повторений	0,008	2				1
Вариантов	0,791	5	0,2	21,91	3,33	91
Случайное	0,072	10	0,0			8

Точность опыта % = 99,26      Ошибка разности = 0,06  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,13  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

*Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	0,87	17					
Повторений	0,01	2					
Фактор А	0,75	2	0,38	52,00	4,10	86,2	0,11
Фактор В	0,04	1	0,04	4,92	4,96	4,1	Fф<Fт
Вз-вие АВ	0,00	2	0,00	0,31	4,10	0,5	Fф<Fт
Случайное	0,07	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	35,80	5,97	0,01	0,03	
А 2	6	34,40	5,73	0,01	0,04	b
А 3	6	32,80	5,47	0,01	0,03	b
В 1	12	51,10	4,26	0,05	0,06	
В 2	12	51,90	4,33	0,06	0,07	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание гидролитической кислотности  
в слое 0–20 см, ммоль(экв.)/100 г почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	6,58	6,61	6,53	6,57	6,40	7,72
	СЗР	6,18	6,31	6,18	6,22		
Умеренная доза	Контроль	7,45	7,57	7,64	7,55	7,48	7,52
	СЗР	7,36	7,40	7,47	7,41		
Высокая доза	Контроль	9,04	9,06	8,97	9,02	8,98	7,52
	СЗР	8,91	8,92	8,96	8,93		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	20,386	17				100
Повторений	0,011	2				0
Вариантов	20,341	5	4,1	1178,40	3,33	100
Случайное	0,035	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,61  
 Ошибка ср. = 0,03  
 Ошибка разности = 0,04  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 НСР = 0,09  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	20,39	17					
Повторений	0,01	2					
Фактор А	20,11	2	10,06	2913,03	4,10	98,7	0,08
Фактор В	0,17	1	0,17	49,85	4,96	0,8	0,06
Вз-вие АВ	0,06	2	0,03	8,04	4,10	0,3	0,06
Случайное	0,03	10	0,00				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	38,39	6,40	0,04	0,08	
А 2	6	44,89	7,48	0,01	0,04	a
А 3	6	53,86	8,98	0,00	0,03	a
В 1	12	69,45	5,79	1,14	0,31	
В 2	12	67,69	5,64	1,38	0,34	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание гидролитической кислотности  
в слое 21–40 см, ммоль(экв.)/100 г почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	5,62	5,37	5,53	5,51	5,46	6,67
	СЗР	5,39	5,41	5,44	5,41		
Умеренная доза	Контроль	6,53	6,71	6,53	6,59	6,47	6,46
	СЗР	6,12	6,43	6,50	6,35		
Высокая доза	Контроль	7,95	7,87	7,91	7,91	7,76	6,46
	СЗР	7,62	7,57	7,66	7,62		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	16,369	17				100
Повторений	0,010	2				0
Вариантов	16,225	5	3,2	241,82	3,33	99
Случайное	0,134	10	0,0			1

Точность опыта % = 99,12      Ошибка разности = 0,08  
 Ошибка ср. = 0,06      НСР = 0,18  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	16,37	17					
Повторений	0,01	2					
Фактор А	16,00	2	8,00	596,04	4,10	97,7	0,15
Фактор В	0,20	1	0,20	14,63	4,96	1,2	0,12
Вз-вие АВ	0,03	2	0,02	1,20	4,10	0,2	Fф<Fт
Случайное	0,13	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	32,76	5,46	0,01	0,04	
А 2	6	38,82	6,47	0,04	0,08	a
А 3	6	46,58	7,76	0,03	0,07	a
В 1	12	60,02	5,00	1,09	0,30	
В 2	12	58,14	4,85	0,93	0,28	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание суммы поглощенных оснований  
в слое 0–20 см, ммоль(экв.)/100 г почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	28,75	28,15	29,26	28,72	29,27	26,38
	СЗР	29,85	30,31	29,30	29,82		
Умеренная доза	Контроль	28,30	29,10	29,75	29,05	29,39	28,01
	СЗР	30,36	29,05	29,75	29,72		
Высокая доза	Контроль	20,50	22,24	21,40	21,38	22,93	28,01
	СЗР	24,50	23,85	25,09	24,48		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	185,982	17				100
Повторений	0,492	2				0
Вариантов	180,655	5	36,1	74,73	3,33	97
Случайное	4,835	10	0,5			3

Точность опыта % = 98,72      Ошибка разности = 0,49  
 НСР = 1,10  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	185,98	17					
Повторений	0,49	2					
Фактор А	163,75	2	81,88	169,35	4,10	88,0	0,90
Фактор В	11,86	1	11,86	24,53	4,96	6,4	0,73
Вз-вие АВ	5,04	2	2,52	5,22	4,10	2,7	0,73
Случайное	4,83	10	0,48				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	175,62	29,27	0,59	0,31	
А 2	6	176,31	29,39	0,52	0,29	b
А 3	6	137,58	22,93	3,34	0,75	b
В 1	12	237,45	19,79	14,50	1,10	
В 2	12	252,06	21,01	7,27	0,78	a

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание суммы поглощенных оснований  
в слое 21–40 см, ммоль(экв.)/100 г почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	24,96	24,05	24,55	24,52	24,65	22,95
	СЗР	25,24	24,80	24,30	24,78		
Умеренная доза	Контроль	24,40	25,15	25,75	25,10	25,27	23,29
	СЗР	24,95	25,45	25,89	25,43		
Высокая доза	Контроль	18,45	19,25	19,99	19,23	19,45	23,29
	СЗР	19,70	20,23	19,05	19,66		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	127,328	17				100
Повторений	0,290	2				0
Вариантов	123,227	5	24,6	64,68	3,33	97
Случайное	3,810	10	0,4			3

Точность  
опыта % = 98,67  
Ошибка  
разности = 0,44

Кр. Стьюдента = 2,23  
НСР = 0,97

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	127,33	17					
Повторений	0,29	2					
Фактор А	122,69	2	61,34	161,00	4,10	96,4	0,79
Фактор В	0,52	1	0,52	1,37	4,96	0,4	Fф<Fт
Вз-вие АВ	0,02	2	0,01	0,03	4,10	0,0	Fф<Fт
Случайное	3,81	10	0,38				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	147,90	24,65	0,19	0,18	
А 2	6	151,59	25,27	0,30	0,23	b
А 3	6	116,67	19,45	0,43	0,27	b
В 1	12	206,55	17,21	8,16	0,82	
В 2	12	209,61	17,47	7,69	0,80	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на степень насыщенности основаниями  
в слое 0–20 см, %, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	81,4	81,0	81,8	81,4	82,1	77,0
	СЗР	82,9	82,8	82,6	82,7		
Умеренная доза	Контроль	79,2	79,4	79,6	79,4	79,7	78,7
	СЗР	80,5	79,7	79,9	80,0		
Высокая доза	Контроль	69,4	71,1	70,5	70,3	71,8	78,7
	СЗР	73,3	72,8	73,7	73,3		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	366,415	17				100
Повторений	0,204	2				0
Вариантов	363,848	5	72,8	307,90	3,33	99
Случайное	2,363	10	0,2			1

Точность опыта % = 99,69      Ошибка разности = 0,34  
 НСР = 0,77  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	366,42	17					
Повторений	0,20	2					
Фактор А	347,20	2	173,60	734,54	4,10	94,8	0,63
Фактор В	12,52	1	12,52	52,96	4,96	3,4	0,51
Вз-вие АВ	4,13	2	2,07	8,74	4,10	1,1	0,51
Случайное	2,36	10	0,24				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	492,31	82,05	0,62	0,32	
А 2	6	478,21	79,70	0,22	0,19	b
А 3	6	430,71	71,79	3,00	0,71	b
В 1	12	693,11	57,76	26,30	1,48	
В 2	12	708,12	59,01	17,94	1,22	a

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на степень насыщенности основаниями  
в слое 21–40 см, %, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	81,6	81,8	81,6	81,7	81,9	77,2
	СЗР	82,4	82,1	81,7	82,1		
Умеренная доза	Контроль	78,9	78,9	79,8	79,2	79,6	78,1
	СЗР	80,3	79,8	79,9	80,0		
Высокая доза	Контроль	69,9	71,0	71,7	70,8	71,5	78,1
	СЗР	72,1	72,8	71,3	72,1		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	367,041	17				100
Повторений	0,115	2				0
Вариантов	363,548	5	72,7	215,23	3,33	99
Случайное	3,378	10	0,3			1

Точность опыта % = 99,63      Ошибка разности = 0,41  
 НСР = 0,92  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	367,04	17					
Повторений	0,12	2					
Фактор А	360,04	2	180,02	532,88	4,10	98,1	0,75
Фактор В	3,00	1	3,00	8,88	4,96	0,8	0,61
Вз-вие АВ	0,51	2	0,25	0,75	4,10	0,1	Fф<Fт
Случайное	3,38	10	0,34				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	491,19	81,87	0,10	0,13	
А 2	6	477,66	79,61	0,32	0,23	b
А 3	6	428,72	71,45	0,98	0,40	b
В 1	12	695,11	57,93	24,40	1,43	
В 2	12	702,46	58,54	21,11	1,33	a

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание легкогидролизуемого азота  
в слое 0–20 см, мг/кг, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	46,4	46,9	46,7	46,7	45,4	63,6
	СЗР	43,9	44,3	44,0	44,1		
Умеренная доза	Контроль	78,2	78,4	78,8	78,5	80,4	62,8
	СЗР	81,8	82,6	82,4	82,3		
Высокая доза	Контроль	65,5	66,0	65,8	65,8	63,9	62,8
	СЗР	61,9	62,3	62,0	62,1		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	3732,705	17				100
Повторений	0,693	2				0
Вариантов	3731,745	5	746,3	27988,09	3,33	100
Случайное	0,267	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,87      Ошибка разности = 0,12  
 Ошибка ср. = 0,08      НСР = 0,26  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	3732,70	17					
Повторений	0,69	2					
Фактор А	3679,41	2	1839,71	68988,94	4,10	98,6	0,21
Фактор В	3,13	1	3,13	117,19	4,96	0,1	0,17
Вз-вие АВ	49,21	2	24,60	922,69	4,10	1,3	0,17
Случайное	0,27	10	0,03				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	272,20	45,37	2,07	0,59	
А 2	6	482,20	80,37	4,44	0,86	a
А 3	6	383,50	63,92	4,15	0,83	a
В 1	12	572,70	47,73	192,22	4,00	
В 2	12	565,20	47,10	273,97	4,78	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание легкогидролизуемого азота  
в слое 21–40 см, мг/кг, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	41,9	42,3	42,6	42,3	41,1	49,2
	СЗР	39,7	40,2	40,1	40,0		
Умеренная доза	Контроль	56,4	57,1	56,8	56,8	58,4	48,1
	СЗР	59,6	60,2	60,3	60,0		
Высокая доза	Контроль	48,2	48,7	48,5	48,5	46,4	48,1
	СЗР	44,0	44,7	44,2	44,3		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	991,263	17				100
Повторений	1,074	2				0
Вариантов	989,956	5	198,0	8525,94	3,33	100
Случайное	0,232	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,84      Ошибка разности = 0,11  
 Ошибка ср. = 0,08      НСР = 0,24  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	991,26	17					
Повторений	1,07	2					
Фактор А	940,20	2	470,10	20243,56	4,10	94,8	0,20
Фактор В	5,01	1	5,01	215,91	4,96	0,5	0,16
Вз-вие АВ	44,74	2	22,37	963,33	4,10	4,5	0,16
Случайное	0,23	10	0,02				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	246,80	41,13	1,62	0,52	
А 2	6	350,40	58,40	3,31	0,74	a
А 3	6	278,30	46,38	5,29	0,94	a
В 1	12	442,50	36,88	39,78	1,82	
В 2	12	433,00	36,08	83,51	2,64	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание  $P_2O_5$  в слое 0–20 см, мг/100 гр почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	9,5	9,8	9,2	9,5	8,9	15,9
	СЗР	8,6	8,1	8,3	8,3		
Умеренная доза	Контроль	16,5	16,1	16,9	16,5	15,9	14,6
	СЗР	14,9	15,6	15,2	15,2		
Высокая доза	Контроль	21,4	22,3	21,8	21,8	21,1	14,6
	СЗР	20,1	20,6	20,4	20,4		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	457,329	17				100
Повторений	0,188	2				0
Вариантов	455,923	5	91,2	748,10	3,33	100
Случайное	1,219	10	0,1			0

Точность опыта % = 98,86      Ошибка разности = 0,25  
 Ошибка ср. = 0,17      НСР = 0,55  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	457,33	17					
Повторений	0,19	2					
Фактор А	448,25	2	224,12	1838,76	4,10	98,0	0,45
Фактор В	7,61	1	7,61	62,39	4,96	1,7	0,37
Вз-вие АВ	0,07	2	0,03	0,29	4,10	0,0	Fф<Fт
Случайное	1,22	10	0,12				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	53,50	8,92	0,47	0,28	
А 2	6	95,20	15,87	0,59	0,31	a
А 3	6	126,60	21,10	0,75	0,35	a
В 1	12	143,50	11,96	28,81	1,55	
В 2	12	131,80	10,98	27,41	1,51	b

## Дисперсионный анализ

Влияние вариантов опыта на содержание  $P_2O_5$  в слое 21–40 см, мг/100 гр почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	7,8	8,2	8,5	8,2	7,9	12,5
	СЗР	7,9	7,4	7,6	7,6		
Умеренная доза	Контроль	13,3	12,8	13,0	13,0	12,7	
	СЗР	12,0	12,7	12,4	12,4		
Высокая доза	Контроль	16,6	16,2	15,7	16,2	15,2	11,4
	СЗР	15,0	12,2	15,5	14,2		

*Результаты анализа в Однофакторной интерпретации*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	179,340	17				100
Повторений	1,103	2				1
Вариантов	171,860	5	34,4	53,90	3,33	96
Случайное	6,377	10	0,6			4

Точность опыта % = 96,65      Ошибка разности = 0,56  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 1,26  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

*Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	179,34	17					
Повторений	1,10	2					
Фактор А	165,16	2	82,58	129,50	4,10	92,1	1,03
Фактор В	4,91	1	4,91	7,70	4,96	2,7	0,84
Вз-вие АВ	1,79	2	0,90	1,40	4,10	1,0	Fф<Fт
Случайное	6,38	10	0,64				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	47,40	7,90	0,16	0,16	
А 2	6	76,20	12,70	0,21	0,19	a
А 3	6	91,20	15,20	2,47	0,64	a
В 1	12	112,10	9,34	12,29	1,01	
В 2	12	102,70	8,56	9,52	0,89	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на содержание  $K_2O$  в слое 0–20 см, мг/100 гр почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	7,4	8,2	7,8	7,8	7,4	11,8
	СЗР	7,1	6,6	7,3	7,0		
Умеренная доза	Контроль	13,4	13,1	13,6	13,4	13,8	12,0
	СЗР	13,9	14,2	14,3	14,1		
Высокая доза	Контроль	14,3	14,6	14,1	14,3	14,5	12,0
	СЗР	14,7	14,9	14,6	14,7		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	186,689	17				100
Повторений	0,081	2				0
Вариантов	185,723	5	37,1	419,45	3,33	99
Случайное	0,886	10	0,1			0

Точность опыта % = 98,75      Ошибка разности = 0,21  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,47  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	186,69	17					
Повторений	0,08	2					
Фактор А	183,64	2	91,82	1036,87	4,10	98,4	0,38
Фактор В	0,07	1	0,07	0,76	4,96	0,0	Fф<Fт
Вз-вие АВ	2,01	2	1,01	11,37	4,10	1,1	0,31
Случайное	0,89	10	0,09				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	44,40	7,40	0,31	0,23	
А 2	6	82,50	13,75	0,22	0,19	a
А 3	6	87,20	14,53	0,08	0,12	a
В 1	12	106,50	8,88	9,40	0,88	
В 2	12	107,60	8,97	13,93	1,08	b

## Дисперсионный анализ

Влияние вариантов опыта на содержание  $K_2O$  в слое 21–40 см, мг/100 гр почвы, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	8,7	8,4	9,0	8,7	8,3	11,8
	СЗР	8,2	7,9	7,6	7,9		
Умеренная доза	Контроль	13,4	12,9	13,0	13,1	13,4	11,9
	СЗР	13,5	13,8	13,6	13,6		
Высокая доза	Контроль	13,8	13,5	13,9	13,7	13,9	11,9
	СЗР	13,8	14,0	14,3	14,0		

*Результаты анализа в Однофакторной интерпретации*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	116,505	17				100
Повторений	0,090	2				0
Вариантов	115,745	5	23,1	345,51	3,33	99
Случайное	0,670	10	0,1			1

Точность опыта % = 98,91  
 Ошибка ср. = 0,13  
 Ошибка разности = 0,18  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 НСР = 0,41  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

*Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	116,51	17					
Повторений	0,09	2					
Фактор А	114,22	2	57,11	852,41	4,10	98,0	0,33
Фактор В	0,00	1	0,00	0,01	4,96	0,0	Fф<Fт
Вз-вие АВ	1,52	2	0,76	11,35	4,10	1,3	0,27
Случайное	0,67	10	0,07				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост
А 1	6	49,80	8,30	0,26	0,21	
А 2	6	80,20	13,37	0,12	0,14	a
А 3	6	83,30	13,88	0,07	0,11	a
В 1	12	106,60	8,88	5,69	0,69	
В 2	12	106,70	8,89	8,88	0,86	b

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность однолетних трав, т/га,  
в среднем за 2008, 2016, 2023 гг.

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	13,9	14,0	14,0	14,0	14,4	19,0
	СЗР	14,7	14,9	14,7	14,8		
Умеренная доза	Контроль	18,8	18,9	18,9	18,8	19,7	20,3
	СЗР	20,5	20,8	20,6	20,6		
Высокая доза	Контроль	23,9	24,1	24,2	24,1	24,9	20,3
	СЗР	25,7	25,5	25,7	25,6		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	340,694	17				100
Повторений	0,043	2				0
Вариантов	340,561	5	68,1	7568,01	3,33	100
Случайное	0,090	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,76      Ошибка разности = 0,07  
 Ошибка ср. = 0,05      НСР = 0,15  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	340,69	17					
Повторений	0,04	2					
Фактор А	331,16	2	165,58	18397,92	4,10	97,2	0,12
Фактор В	8,59	1	8,59	954,25	4,96	2,5	0,10
Вз-вие АВ	0,81	2	0,40	44,99	4,10	0,2	0,10
Случайное	0,09	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост и
А 1	6	86,13	14,36	0,20	0,18	
А 2	6	118,40	19,73	0,98	0,40	a
А 3	6	149,17	24,86	0,73	0,35	a
В 1	12	170,63	14,22	19,27	1,27	
В 2	12	183,07	15,26	22,24	1,36	a

## Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность однолетних трав, 2008 год

Вариант		Показатель				Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество растений, шт./м <sup>2</sup>		Высота растений, см		по опыту	по фактору	
		вики	овса	вики	овса		А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	146	154	73,8	76,9	18,4	19,0	27,6
	СЗР	147	158	77,5	80,2	19,6		
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	153	165	81,1	85,7	27,9	28,6	
	СЗР	159	169	85,6	89,0	29,4		
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	163	174	92,1	93,5	36,5	37,7	29,3
	СЗР	169	176	98,3	96,9	38,9		
НСР <sub>05</sub> ч. р.		4	5	3,4	2,6	0,3		
Фактор А		3	4	2,7	2,4	0,3		
Фактор В		2	3	2,2	1,9	0,2		
Фактор АВ		F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,2		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность однолетних трав, т/га, 2008 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	18,6	18,3	18,4	18,4	19,0	27,6
	СЗР	19,8	19,7	19,4	19,6		
Умеренная доза	Контроль	27,9	27,8	28,1	27,9	28,7	29,3
	СЗР	29,5	29,5	29,1	29,4		
Высокая доза	Контроль	36,3	36,6	36,7	36,5	37,7	29,3
	СЗР	39,2	38,7	38,9	38,9		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	1063,736	17				100
Повторений	0,054	2				0
Вариантов	1063,236	5	212,6	4772,63	3,33	100
Случайное	0,446	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,63      Ошибка разности = 0,15  
 Ошибка ср. = 0,11      НСР = 0,33  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	1063,74	17					
Повторений	0,05	2					
Фактор А	1049,35	2	524,68	11775,80	4,10	98,6	0,27
Фактор В	12,67	1	12,67	284,30	4,96	1,2	0,22
Вз-вие АВ	1,21	2	0,61	13,63	4,10	0,1	0,22
Случайное	0,45	10	0,04				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	114,20	19,03	0,46	0,28	
А 2	6	171,90	28,65	0,65	0,33	a
А 3	6	226,40	37,73	1,77	0,54	a
В 1	12	248,70	20,73	61,50	2,26	
В 2	12	263,80	21,98	69,88	2,41	a

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность однолетних трав, 2016 год

Вариант		Показатель				Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество растений, шт./м <sup>2</sup>		Высота растений, см		по опыту	по фактору	
		вики	овса	вики	овса		А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	117	98	58,4	51,2	11,3	11,6	12,9
	СЗР	122	103	63,3	54,3	12,0		
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	131	111	68,1	60,6	13,2	13,2	
	СЗР	136	115	73,9	64,7	13,3		
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	142	122	79,6	69,5	14,3	15,2	
	СЗР	148	127	83,7	73,3	16,2		
НСР <sub>05</sub> ч. р.		5	5	3,5	3,8	0,3		
Фактор А		4	4	2,9	3,2	0,2		
Фактор В		3	3	2,4	2,5	0,2		
Фактор АВ		F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,2		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность однолетних трав, т/га, 2016 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	11,0	11,4	11,4	11,3	11,6	12,9
	СЗР	11,8	12,2	11,9	12,0		
Умеренная доза	Контроль	13,2	13,4	12,9	13,2	13,2	13,8
	СЗР	13,1	13,3	13,4	13,3		
Высокая доза	Контроль	14,1	14,4	14,3	14,3	15,2	13,8
	СЗР	16,3	16,0	16,3	16,2		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	46,244	17				100
Повторений	0,121	2				0
Вариантов	45,771	5	9,2	259,90	3,33	99
Случайное	0,352	10	0,0			1

Точность опыта % = 99,30      Ошибка разности = 0,13  
 Ошибка ср. = 0,09      НСР = 0,30  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	46,24	17					
Повторений	0,12	2					
Фактор А	39,41	2	19,71	559,51	4,10	85,2	0,24
Фактор В	3,74	1	3,74	106,06	4,96	8,1	0,20
Вз-вие АВ	2,62	2	1,31	37,21	4,10	5,7	0,20
Случайное	0,35	10	0,04				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	69,70	11,62	0,19	0,18	
А 2	6	79,30	13,22	0,04	0,08	а
А 3	6	91,40	15,23	1,14	0,44	а
В 1	12	116,10	9,68	1,76	0,38	
В 2	12	124,30	10,36	3,55	0,54	а

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность однолетних трав, 2023 год

Вариант		Показатель				Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество растений, шт./м <sup>2</sup>		Высота растений, см		по опыту	по фактору	
		вики	овса	вики	овса		А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	155	180	77,3	81,9	12,2	12,5	16,4
	СЗР	156	182	82,2	83,2	12,7		
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	165	193	83,7	90,9	15,4	17,4	
	СЗР	162	193	88,5	94,3	19,3		
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	164	195	97,4	97,4	21,5	21,7	17,9
	СЗР	167	197	101	98,8	21,8		
НСР <sub>05</sub> ч. р.		5	4	3,1	3,0	0,2		
Фактор А		4	4	2,6	2,5	0,1		
Фактор В		F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	2,1	2,0	0,1		
Фактор АВ		F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,1		

**Дисперсионный анализ**  
**Влияние вариантов опыта на продуктивность однолетних трав, т/га, 2023 год**

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	12,0	12,3	12,2	12,2	12,4	16,3
	СЗР	12,5	12,8	12,7	12,7		
Умеренная доза	Контроль	15,2	15,4	15,6	15,4	17,3	
	СЗР	19,0	19,5	19,3	19,3		
Высокая доза	Контроль	21,4	21,4	21,6	21,5	21,6	17,9
	СЗР	21,6	21,9	21,8	21,8		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	277,631	17				100
Повторений	0,268	2				0
Вариантов	277,258	5	55,5	5253,31	3,33	100
Случайное	0,106	10	0,0			0

Точность опыта % = 99,70      Ошибка разности = 0,07  
 Ошибка ср. = 0,05      НСР = 0,16  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены **СУЩЕСТВЕННЫЕ** различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	277,63	17					
Повторений	0,27	2					
Фактор А	254,32	2	127,16	12046,79	4,10	91,6	0,13
Фактор В	10,89	1	10,89	1031,58	4,96	3,9	0,11
Вз-вие АВ	12,05	2	6,02	570,68	4,10	4,3	0,11
Случайное	0,11	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	74,50	12,42	0,09	0,12	
А 2	6	104,00	17,33	4,53	0,87	а
А 3	6	129,70	21,62	0,04	0,08	а
В 1	12	147,10	12,26	16,74	1,18	
В 2	12	161,10	13,43	16,61	1,18	а

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га,  
в среднем за 1992, 1999, 2006, 2009, 2024 гг.

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	2,69	2,76	2,78	2,74	2,95	3,47
	СЗР	3,26	3,02	3,19	3,16		
Умеренная доза	Контроль	3,57	3,37	3,41	3,45	3,82	4,08
	СЗР	4,26	4,17	4,11	4,18		
Высокая доза	Контроль	4,25	4,40	4,02	4,23	4,56	4,08
	СЗР	5,04	4,90	4,74	4,89		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fта6095.	Влияние %
Общее	9,691	17				100
Повторений	0,056	2				1
Вариантов	9,502	5	1,9	143,63	3,33	98
Случайное	0,132	10	0,0			1

Точность опыта % = 98,48      Ошибка разности = 0,08  
 Ошибка ср. = 0,06      НСР = 0,18  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	9,69	17					
Повторений	0,06	2					
Фактор А	7,78	2	3,89	294,15	4,10	80,3	0,15
Фактор В	1,63	1	1,63	123,43	4,96	16,9	0,12
Вз-вие АВ	0,08	2	0,04	3,20	4,10	0,9	Fф<Fт
Случайное	0,13	10	0,01				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост и
А 1	6	17,70	2,95	0,06	0,10	
А 2	6	22,89	3,82	0,17	0,17	a
А 3	6	27,36	4,56	0,16	0,16	a
В 1	12	31,26	2,61	0,43	0,19	
В 2	12	36,68	3,06	0,58	0,22	a

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы, 1992 год

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	485	19	29,7	1,59	1,73	2,28
	СЗР	505	22	30,1	1,88		
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	567	22	33,1	2,23	2,49	
	СЗР	631	25	32,8	2,74		
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	693	26	33	3,02	3,36	2,77
	СЗР	722	29	34,2	3,70		
НСР <sub>05</sub> ч.р.		19	3	1,0	0,40		
Фактор А		15	2	0,9	0,33		
Фактор В		12	2	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,27		
Фактор АВ		12	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га, 1992 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	1,49	1,80	1,47	1,59	1,73	2,28
	СЗР	2,07	1,84	1,73	1,88		
Умеренная доза	Контроль	2,32	2,01	2,37	2,23	2,49	2,77
	СЗР	2,96	2,73	2,53	2,74		
Высокая доза	Контроль	2,99	3,48	2,60	3,02	3,36	2,77
	СЗР	3,44	3,90	3,76	3,70		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	9,968	17				100
Повторений	0,144	2				1
Вариантов	9,170	5	1,8	28,06	3,33	92
Случайное	0,654	10	0,1			7

Точность опыта % = 94,94      Ошибка разности = 0,18  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,40  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	9,97	17					
Повторений	0,14	2					
Фактор А	7,97	2	3,98	60,95	4,10	80,0	0,33
Фактор В	1,09	1	1,09	16,68	4,96	10,9	0,27
Вз-вие АВ	0,11	2	0,06	0,85	4,10	1,1	Fф<Fт
Случайное	0,65	10	0,07				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	10,40	1,73	0,05	0,09	
А 2	6	14,92	2,49	0,11	0,14	а
А 3	6	20,17	3,36	0,24	0,20	а
В 1	12	20,53	1,71	0,45	0,19	
В 2	12	24,96	2,08	0,65	0,23	а

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы, 1999 год

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	733	31	37	4,26	4,47	4,84
	СЗР	780	32	38,2	4,67		
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	830	29	41	4,73	5,03	5,56
	СЗР	886	31	42,4	5,32		
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	940	29	44,1	5,54	6,11	5,56
	СЗР	1 047	30	46,6	6,68		
НСР <sub>05</sub> ч.р.		28	3	0,9	0,33		
Фактор А		23	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,8	0,27		
Фактор В		19	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,6	0,22		
Фактор АВ		19	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,6	0,22		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га, 1999 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	4,17	3,99	4,61	4,26	4,46	4,84
	СЗР	4,52	4,72	4,77	4,67		
Умеренная доза	Контроль	4,81	4,64	4,75	4,73	5,03	5,56
	СЗР	5,47	5,45	5,04	5,32		
Высокая доза	Контроль	5,29	5,64	5,69	5,54	6,11	5,56
	СЗР	6,53	6,65	6,85	6,68		

*Результаты анализа в Однофакторной интерпретации*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	11,616	17				100
Повторений	0,073	2				1
Вариантов	11,097	5	2,2	49,87	3,33	96
Случайное	0,445	10	0,0			4

Точность опыта % = 97,97      Ошибка разности = 0,15  
 Ошибка ср. = 0,11      НСР = 0,33  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

*Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа*

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	11,62	17					
Повторений	0,07	2					
Фактор А	8,39	2	4,19	94,23	4,10	72,2	0,27
Фактор В	2,28	1	2,28	51,29	4,96	19,7	0,22
Вз-вие АВ	0,43	2	0,21	4,81	4,10	3,7	0,22
Случайное	0,45	10	0,04				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	26,78	4,46	0,10	0,13	
А 2	6	30,16	5,03	0,13	0,15	a
А 3	6	36,65	6,11	0,42	0,26	a
В 1	12	43,59	3,63	0,35	0,17	
В 2	12	50,00	4,17	0,81	0,26	a

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы, 2006 год

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	653	29	34	3,44	3,68	4,17
	СЗР	689	31	35,2	3,92		
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	757	30	37,8	4,33	4,61	4,67
	СЗР	834	32	38,6	4,89		
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	884	28	41,6	4,73	4,97	4,67
	СЗР	1 001	27	42,1	5,21		
НСР <sub>05</sub> ч.р.		15	3	1,4	0,34		
Фактор А		12	2	1,1	0,28		
Фактор В		10	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,23		
Фактор АВ		10	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га, 2006 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	3,21	3,65	3,45	3,44	3,68	4,16
	СЗР	4,21	3,73	3,82	3,92		
Умеренная доза	Контроль	4,54	4,23	4,21	4,33	4,61	
	СЗР	5,20	4,64	4,84	4,89		
Высокая доза	Контроль	4,73	4,69	4,77	4,73	4,97	4,67
	СЗР	5,63	5,04	4,96	5,21		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	7,237	17				100
Повторений	0,252	2				3
Вариантов	6,510	5	1,3	27,37	3,33	90
Случайное	0,476	10	0,0			7

Точность опыта % = 97,53      Ошибка разности = 0,15  
 Кр. Стьюдента = 2,23      НСР = 0,34  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	7,24	17					
Повторений	0,25	2					
Фактор А	5,33	2	2,67	56,04	4,10	73,7	0,28
Фактор В	1,17	1	1,17	24,60	4,96	16,2	0,23
Вз-вие АВ	0,01	2	0,00	0,08	4,10	0,1	Fф<Fт
Случайное	0,48	10	0,05				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень значимост и
А 1	6	22,07	3,68	0,12	0,14	
А 2	6	27,66	4,61	0,14	0,15	a
А 3	6	29,82	4,97	0,12	0,14	a
В 1	12	37,48	3,12	0,35	0,17	
В 2	12	42,07	3,51	0,41	0,18	a

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы, 2009 год

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	538	20	30,4	1,78	2,03	2,33
	СЗР	569	24	31,3	2,28		
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	596	24	32,1	2,40	2,80	
	СЗР	669	28	33,6	3,19		
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	704	23	34	2,82	3,09	
	СЗР	756	25	35,8	3,35		
НСР <sub>05</sub> ч.р.		15	5	1,4	0,5		
Фактор А		12	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	1,2	0,41		
Фактор В		10	3	0,9	0,33		
Фактор АВ		10	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>		

Дисперсионный анализ  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га, 2009 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	1,86	1,76	1,73	1,78	2,03	2,33
	СЗР	2,46	2,01	2,36	2,28		
Умеренная доза	Контроль	2,70	2,22	2,28	2,40	2,80	2,94
	СЗР	2,88	3,14	3,56	3,19		
Высокая доза	Контроль	3,03	2,99	2,44	2,82	3,09	2,94
	СЗР	3,95	3,15	2,95	3,35		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	6,569	17				100
Повторений	0,279	2				4
Вариантов	5,298	5	1,1	10,69	3,33	81
Случайное	0,991	10	0,1			15

Точность опыта % = 94,03      Ошибка разности = 0,22  
 Ошибка ср. = 0,16      НСР = 0,50  
 Кр. Стьюдента = 2,23  
 В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	6,57	17					
Повторений	0,28	2					
Фактор А	3,57	2	1,78	18,00	4,10	54,3	0,41
Фактор В	1,65	1	1,65	16,65	4,96	25,1	0,33
Вз-вие АВ	0,08	2	0,04	0,41	4,10	1,2	Fф<Fт
Случайное	0,99	10	0,10				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
и						
А 1	6	12,18	2,03	0,10	0,13	
А 2	6	16,78	2,80	0,26	0,21	a
А 3	6	18,51	3,09	0,24	0,20	a
В 1	12	21,01	1,75	0,25	0,14	
В 2	12	26,46	2,21	0,37	0,17	a

Влияние вариантов опыта на структуру урожая и продуктивность озимой пшеницы, 2024 год

Вариант		Показатель			Биологическая урожайность, т/га		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Количество колосьев, шт./м <sup>2</sup>	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1 000 зерен, гр.	по опыту	по фактору	
						А	В
Без удобрений (контроль)	Контроль	650	23	34,2	2,66	2,84	3,75
	СЗР	704	25	33,3	3,03		
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	732	29	33,4	3,56	4,16	4,43
	СЗР	802	35	35	4,75		
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	822	27	33,9	5,02	5,27	4,43
	СЗР	920	35	35,8	5,52		
НСР <sub>05</sub> ч.р.		20	3	1,7	0,36		
Фактор А		16	2	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,29		
Фактор В		14	2	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,24		
Фактор АВ		14	2	F <sub>φ</sub> <F <sub>τ</sub>	0,24		

**Дисперсионный анализ**  
Влияние вариантов опыта на продуктивность озимой пшеницы, т/га, 2024 год

Доза удобрений (Фактор А)	Средства защиты (Фактор В)	Повторность			Среднее по вариантам	Среднее по фактору А	Среднее по фактору В
		1	2	3			
Контроль	Контроль	2,73	2,59	2,65	2,66	2,85	3,74
	СЗР	3,02	2,80	3,28	3,03		
Умеренная доза	Контроль	3,49	3,74	3,44	3,56	4,16	4,44
	СЗР	4,78	4,91	4,57	4,75		
Высокая доза	Контроль	5,23	5,22	4,61	5,02	5,27	4,44
	СЗР	5,64	5,77	5,16	5,52		

**Результаты анализа в Однофакторной интерпретации**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fтаб095.	Влияние %
Общее	21,139	17				100
Повторений	0,175	2				1
Вариантов	20,444	5	4,1	78,74	3,33	97
Случайное	0,519	10	0,1			2

Точность опыта % = 97,21      Ошибка разности = 0,16  
 Ошибка ср. = 0,11      НСР = 0,36  
 Кр. Стьюдента = 2,23

В опыте выявлены СУЩЕСТВЕННЫЕ различия вариантов!

**Результаты ДвухФакторного Дисперсионного Анализа**

Источ. вариации	Сумма кв.	ст. свободы	Дисперсия	Fфакт	Fт095.	Влияние %	НСР
Общее	21,14	17					
Повторений	0,18	2					
Фактор А	17,70	2	8,85	170,46	4,10	83,7	0,29
Фактор В	2,16	1	2,16	41,52	4,96	10,2	0,24
Вз-вие АВ	0,58	2	0,29	5,63	4,10	2,8	0,24
Случайное	0,52	10	0,05				

Статистика по градациям факторов

	Кол-во	Сумма	Среднее	Дисп.	Ошибка	Уровень
						значимост
						и
А 1	6	17,07	2,85	0,07	0,11	
А 2	6	24,93	4,16	0,45	0,27	а
А 3	6	31,63	5,27	0,17	0,17	а
В 1	12	33,70	2,81	1,11	0,30	
В 2	12	39,93	3,33	1,27	0,32	а

## Влияние средств химизации на качественные показатели викоовсяной смеси, 2008 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырая зола
Без удобрений (контроль)	Контроль	18,5	28,6	7,7
	СЗР	18,7	28,9	8,0
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	19,2	29,3	8,3
	СЗР	19,8	29,6	8,6
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	20,1	30,2	9,1
	СЗР	21,9	30,5	9,5
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,5	0,3	0,4
Фактор А		0,4	0,3	0,4
Фактор В		0,3	0,2	0,3
Фактор АВ		0,3	F $\phi$ <F $\Gamma$	F $\phi$ <F $\Gamma$

## Влияние средств химизации на качественные показатели викоовсяной смеси, 2016 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырая зола
Без удобрений (контроль)	Контроль	17,9	28,1	8,0
	СЗР	18,2	28,1	8,2
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	18,7	28,6	8,5
	СЗР	19,4	28,9	8,8
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	20,5	29,7	8,9
	СЗР	21,6	29,9	9,5
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,5	0,2	0,3
Фактор А		0,4	0,2	0,3
Фактор В		0,3	0,2	0,2
Фактор АВ		F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub>	F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub>	F <sub>ф</sub> <F <sub>т</sub>

## Влияние средств химизации на качественные показатели викоовсяной смеси, 2023 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырая зола
Без удобрений (контроль)	Контроль	19,0	27,7	7,7
	СЗР	19,3	28,2	7,8
N <sub>45</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	Контроль	19,8	28,9	8,2
	СЗР	20,5	29,9	8,8
N <sub>90</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	Контроль	21,9	30,9	9,2
	СЗР	23,4	31,8	9,8
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,5	0,1	0,4
Фактор А		0,4	0,1	0,3
Фактор В		0,3	0,1	0,3
Фактор АВ		0,3	0,1	F <sub>φ</sub> <F <sub>T</sub>

## Влияние средств химизации на качественные показатели озимой пшеницы, 1992 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	13,4	3,54	1,86
	СЗР	13,8	3,42	1,83
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	13,9	3,38	1,81
	СЗР	13,9	3,35	1,75
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	14,1	3,30	1,70
	СЗР	14,3	3,30	1,70
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,2	0,06	0,02
Фактор А		0,1	0,05	0,02
Фактор В		0,1	0,04	0,01
Фактор АВ		0,1	0,04	0,01

## Влияние средств химизации на качественные показатели озимой пшеницы, 1999 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	11,5	3,17	2,63
	СЗР	11,6	2,94	2,58
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	11,9	2,80	2,51
	СЗР	12,5	2,73	2,51
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	13,0	2,60	2,49
	СЗР	13,2	2,56	2,38
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,3	0,09	0,04
Фактор А		0,2	0,08	0,05
Фактор В		0,2	0,06	0,03
Фактор АВ		0,2	0,06	0,03

## Влияние средств химизации на качественные показатели озимой пшеницы, 2006 год

Вариант		Показатель		
Доза удобрений (фактор А)	Средства защиты (фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	11,2	3,61	2,34
	СЗР	12,3	3,59	2,28
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	11,9	3,59	2,28
	СЗР	12,6	3,50	2,27
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	13,7	3,52	2,25
	СЗР	14,2	3,52	2,17
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,2	0,04	0,03
Фактор А		0,2	0,03	0,02
Фактор В		0,2	0,03	0,02
Фактор АВ		0,2	0,03	0,02

## Влияние средств химизации на качественные показатели озимой пшеницы, 2009 год

Вариант		Показатель		
доза удобрений (Фактор А)	средства защиты (Фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	11,9	3,66	2,16
	СЗР	12,1	3,59	2,10
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	13,0	3,58	2,01
	СЗР	13,2	3,57	1,91
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	14,0	3,56	1,83
	СЗР	14,8	3,54	1,73
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,4	0,03	0,03
Фактор А		0,3	0,03	0,02
Фактор В		0,2	0,02	0,02
Фактор АВ		0,2	0,02	0,02

## Влияние средств химизации на качественные показатели озимой пшеницы, 2024 год

Вариант		Показатель		
доза удобрений (Фактор А)	средства защиты (Фактор В)	Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир
Без удобрений (контроль)	Контроль	11,4	3,66	2,28
	СЗР	11,7	3,57	2,23
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>40</sub>	Контроль	12,6	3,56	2,19
	СЗР	13,3	3,55	2,17
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>80</sub>	Контроль	14,0	3,53	2,02
	СЗР	14,4	3,52	1,87
НСР <sub>05</sub> ч. р.		0,6	0,04	0,06
Фактор А		0,6	0,03	0,05
Фактор В		0,4	0,03	0,04
Фактор АВ		$F_{\phi} < F_T$	0,03	0,04

**Акт****О внедрении научных разработок**

В результате усовершенствования технологии выращивания сельскохозяйственных культур в ООО «Озёрки» Рузаевского района РМ, предложенной аспиранткой Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва Логаевой Ольгой Александровной, на площади 120 га достигнуто повышение урожайности озимой пшеницы до 4,93 т/га (контрольный вариант – 3,17 т/га). Рост урожайности обеспечен за счет внесения минеральных удобрений в дозе  $N_{60}P_{60}K_{40}$  в сочетании с применением средств защиты растений.

Директор ООО «Озёрки»  
Рузаевского района РМ



Е.А. Пирогов