

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Д.Н. ПРЯНИШНИКОВА»

На правах рукописи

Шишков Данил Глебович

**АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ
ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ, УРОЖАЙНОСТЬ И ПОКАЗАТЕЛИ
КАЧЕСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЛИТЕЛЬНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В СРЕДНЕМ
ПРЕДУРАЛЬЕ**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель –
кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент В.Р. Олехов

Пермь – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	9
1.1 Влияние длительного применения минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы	9
1.2 Влияние минеральных удобрений на урожайность озимой ржи	17
1.3 Влияние минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой ржи	22
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	31
2.1 Методика полевого опыта	31
2.2 Методика сопутствующих исследований	34
2.3 Почвенно-агрохимическая характеристика участка опыта	36
2.4 Агроклиматическая характеристика региона и вегетационных периодов исследования.....	39
ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО- ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ	45
3.1 Влияние длительного применения минеральных удобрений на физико- химические свойства почвы	45
3.2 Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание гумуса в почве.....	62
3.3 Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание подвижных форм фосфора и калия в почве	69
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМОЙ РЖИ СОРТА ФАЛЁНСКАЯ 4.....	81
ГЛАВА 5 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ	94
5.1 Технологические показатели зерна озимой ржи.....	94
5.2 Биохимические показатели зерна озимой ржи	100
ГЛАВА 6 СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В РАСТЕНИЯХ ОЗИМОЙ РЖИ	111
ГЛАВА 7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ.....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Озимая рожь является одной из важнейших стратегических сельскохозяйственных культур России и Европы (Сысуев и др., 2014, 2015; Домаш и др., 2017; Hadasch et al., 2020; Studnicki et al., 2021; Umarov, Azizov, 2021). Посевная площадь под этой культурой в России в 2020 году составляла 987,2 тыс. га, из которых 730,9 тыс. га приходилось на Приволжский ФО. Годовое потребление озимой ржи составляет около 100 кг на человека, в России же производится только около 30 кг, в то время как в Европейском союзе и Республике Беларусь 50-100 кг (Сысуев и др., 2015; Возделывание озимой..., 2021). Тем не менее посевные площади этой культуры, как и всего озимого клина, в Пермском крае в последние годы сокращаются, а урожайность в среднем по краю остаётся на уровне 1,5-1,8 т/га (Пермский край..., 2019; 2023). В связи с этим большое количество зерна для производства продовольствия завозится из Омской и Курганской областей, Алтайского края. Поэтому потребность в высококачественном зерне озимой ржи в Пермском крае высока (Мудрых, 2017).

Среди озимых культур рожь наиболее полно реализует свой потенциал в зоне малоплодородных дерново-подзолистых почв, однако залогом повышения её урожайности и качества является систематическое применение минеральных удобрений (Сысуев и др., 2015; Абашев и др., 2018, 2020; Белоус и др., 2018; Кирин и др., 2022). В условиях изменяющегося климата, появления новых сортов культурных растений и высоких цен на минеральные удобрения выбор соотношений элементов питания, обеспечивающих получение стабильных урожаев и высокое качество зерна при сохранении рентабельности производства и плодородия почв продолжает оставаться актуальным вопросом современной агрохимии (Иванова, 1988; Сиротенко и др., 2009; Пасынков, Пасынкова, 2011; Пинаева и др., 2017; Степанова, 2020; Полетаев и др., 2022).

При систематическом применении минеральных удобрений происходит существенное изменение агрохимических свойств дерново-подзолистых почв. По

мнению многих авторов, для изучения динамики параметров плодородия почвы в наибольшей степени подходят исследования в длительных стационарных опытах с удобрениями (Абашев и др., 2014; Дербенёва, 2017; Гамзиков, Анкудович, 2018; Сычёв и др., 2018а, б).

Степень разработанности темы. Вопросы изменения агрохимических свойств дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв при использовании полного минерального удобрения в Среднем Предуралье достаточно широко изучены в работах А.И. Косолаповой (2012, 2013, 2018), Л.А. Михайловой (2008), Н.Е. Завьяловой (2014, 2019, 2020, 2021, 2023) и других. В свою очередь, вопрос влияния различных соотношений минеральных удобрений полностью не раскрыт. Вышеупомянутыми авторами отмечается повышение урожайности озимой ржи при применении полного минерального удобрения, однако недостаточно данных по влиянию на данный показатель различных сочетаний минеральных удобрений. В исследованиях А.А. Завалина (2007), А.В. Пасынкова (2016), В.Д. Абашева (2014, 2020), Ф.А. Попова (2020), А.М. Коновой (2020) рассмотрены закономерности изменения показателей качества и биохимического состава зерна озимой ржи в зависимости от применения минеральных удобрений в почвенно-климатических условиях отличных от условий Среднего Предуралья. Вопросы накопления элементов питания, соотношений их в растениях слабо изучены как для региона в целом, так и для специфических условий стационарного опыта, в частности. Остаётся неизученным вопрос аминокислотного состава зерна озимой ржи и факторов, влияющих на его изменение.

Цель исследований: оценить влияние длительного применения различных доз и соотношений азотных, фосфорных и калийных удобрений на изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, урожайность и показатели качества зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4.

Задачи исследований:

1. Установить изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном внесении различных доз и соотношений минеральных удобрений;

2. Выявить влияние применения различных доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность озимой ржи;

3. Оценить влияние различных доз и соотношений минеральных удобрений на технологические показатели качества и биохимический состав зерна озимой ржи;

4. Определить закономерности накопления элементов питания растениями озимой ржи в условиях длительного стационарного опыта;

5. Дать экономическую и энергетическую оценку изучаемым приёмам возделывания озимой ржи.

Научная новизна. Впервые в условиях дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв Среднего Предуралья изучено изменение их основных агрохимических свойств при длительном применении широкого диапазона доз и соотношений минеральных удобрений. Построены прогнозные модели изменения агрохимических показателей за 40 лет в зависимости от доз удобрений и исходного уровня показателей. Проведена комплексная оценка влияния различных видов и доз минеральных удобрений в различных гидротермических условиях на урожайность зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4, технологические показатели и биохимический состав зерна. Установлены особенности накопления культурой элементов питания в течение вегетации в условиях длительного стационарного опыта. Установлены закономерности и степень влияния минеральных удобрений на агрохимические показатели дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, урожайность, показатели качества и биохимического состава растений озимой ржи сорта Фалёнская 4, выраженные в виде регрессионных уравнений и пригодные для прогнозирования изменения показателей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Длительное применение минеральных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве оказывает влияние в первую очередь на изменение содержания в ней подвижных форм фосфора и калия. Установлено влияние на изменение pH_{KCl} , содержания гумуса и подвижного калия исходного уровня показателей.

Установлено, что содержание подвижного фосфора в почве достигло минимального уровня, в то время как содержание подвижного калия продолжает уменьшаться. В условиях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы с высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия установлена агрономическая, экономическая и энергетическая окупаемость возделывания озимой ржи сорта Фалёнская 4 при применении азотных удобрений в дозах 30-60 кг/га д.в. Установлено что при дозе азотных удобрений до 60 кг/га д.в. (при дополнительном внесении калийных удобрений до 90 кг/га д.в.) возможно получение зерна не ниже второго класса качества, обеспечение высокого сбора белка и критических аминокислот. Получены регрессионные модели изменения показателей, обладающие хорошей и удовлетворительной точностью прогноза.

Методология и методы исследований. Анализы почвенных и растительных проб, наблюдения за растениями, расчёты выноса элементов питания, баланса гумуса, экономической и энергетической эффективности проведены согласно общепринятым методикам. Для оценки существенности влияния минеральных удобрений на изучаемые показатели проводили корреляционно-регрессионный анализ по методу наименьших квадратов по В.Н. Перегудову (Перегудов, 1976). Статистическая и графическая обработка полученных результатов проведена с помощью программ STATISTICA10 и Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности количественного изменения параметров дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, урожайности, показателей качества и содержания элементов питания в растениях озимой ржи сорта Фалёнская 4 под действием различных доз и соотношений минеральных удобрений, выраженные в регрессионных уравнениях. Корреляционные связи между показателями и прогнозные модели их изменения с хорошей и удовлетворительной точностью прогноза.

2. Изменение основных агрохимических параметров дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при длительном (40 лет) внесении различных доз и

соотношений минеральных удобрений. Минимальный уровень содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Среднего Предуралья. Изменение физико-химических показателей, содержания гумуса и подвижного калия в почве в зависимости от исходных значений.

3. Положительное влияние на урожайность озимой ржи азотных удобрений при высоком содержании в почве подвижных форм фосфора и калия. Отсутствие эффективности фосфорных удобрений и азотных в дозе больше 60 кг/га. При внесении 90 кг/га азота урожайность получена на уровне 2,95 т/га, наибольшая окупаемость получена при применении 30 кг/га азота (16,7 кг/кг).

4. Получение зерна озимой ржи не ниже второго класса качества при дозах азотных удобрений 30-60 кг/га, сбор суммы критических аминокислот при данных дозах на уровне 22,9-24,0 кг/га.

5. Оптимальное содержание азота в надземной массе озимой ржи в условиях длительного стационарного опыта. Избыточное содержание фосфора и калия в фазы выхода в трубку и колошения.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные материалы по диссертации было доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Молодёжная наука 2022: технологии, инновации» (Пермь, 2022); Всероссийской научно-практической конференции «Молодёжная наука 2023: технологии, инновации» (Пермь, 2023); Всероссийской научно-практической конференции «Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации» (Пермь, 2023); Всероссийской научной конференции с международным участием «Развитие современных систем земледелия и животноводства, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей среды» (с. Лобаново, 2023); Международной конференции «Агротехнологии XXI века: Стратегии развития, технологии, инновации» (Пермь, 2024); Международной конференции «Современное состояние и стратегия развития Географической сети опытов с удобрениями» (Москва, 2024). По теме исследования опубликовано 7 печатных работ, из них 3 – входящих в перечень

ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённых ВАК Минобрнауки России.

Организация исследований и личный вклад соискателя. Соискателем сформулирована научная гипотеза, предложена общая концепция работы, определены направление, цели и задачи, перечень сопутствующих исследований. Автором работы проведена систематизация и обобщение данных полученных им в ходе проведения научных исследований, а также данных по агрохимическим показателям почвы опытного участка до закладки полевого опыта (получены в 1978 и 1980 годах С. И. Поповой). Автором выполнены отбор почвенных и растительных образцов, большая часть аналитических исследований, математическая обработка полученных данных методом корреляционно-регрессионного анализа.

Работа выполнена в период обучения автора в очной аспирантуре по специальности 06.01.04 – Агрохимия (сельскохозяйственные науки) в 2019-2023 гг. Исследования проведены в соответствии с тематическим планом научных исследований кафедры агрохимии ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 216 страницах компьютерного текста, состоит из введения, обзора литературы, методической части, шести результативных глав, заключения, предложений производству, списка литературы и приложений. Работа включает в себя 28 таблиц, 20 рисунков, 47 формул, 21 приложение. Список литературы состоит из 201 источника, в том числе 22 – на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю кандидату сельскохозяйственных наук Олехову В.Р. Автор благодарит за помощь в проведении исследований и ценные советы главного научного сотрудника Завьялову Н.Е., ведущего научного сотрудника Васбиеву М.Т., коллектив аналитической лаборатории, лаборатории агротехнологий, лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве «Пермского НИИСХ» – филиала ПФИЦ УрО РАН, доцента Мудрых Н.М. и других сотрудников и студентов кафедры агрохимии и почвоведения Пермского ГАТУ.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1 Влияние длительного применения минеральных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы

Дерново-подзолистые почвы различного гранулометрического состава занимают обширные площади среди пахотных почв России. В Пермском крае среди всех пахотных почв дерново-подзолистые тяжело- и среднесуглинистые разной степени оподзоливания занимают около 69 % (Косолапова, Попова, 2012).

Основными лимитирующими агрохимическими факторами при выращивании сельскохозяйственных культур в зоне дерново-подзолистых почв являются повышенная кислотность, низкое содержание гумуса и доступных для растений элементов питания (Косолапова, Попова, 2012; Пасынков и др., 2016; Кайгородов, Пискунова, 2017; Чеботарев и др., 2019). Основным средством получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур в таких условиях становится использование минеральных удобрений, систематическое применение которых способно существенно повлиять на улучшение или ухудшение агрохимических свойств дерново-подзолистых почв и, следовательно, это влияние необходимо изучать не в краткосрочных, а в длительных стационарных опытах (Титова и др., 2013; Пасынков и др., 2016; Лыскова, 2017; Абашев и др., 2018; Попов и др., 2018; Сычев и др., 2018а; Гамзиков, 2016; Гамзиков, Анкудович, 2018; Мудрых и др., 2019; Конова и др., 2020; Вострухин, 2014; Studnicki et al., 2021).

При изучении научной литературы нами было установлено, что большинство учёных выделяют среди важнейших агрохимических свойств следующие: степень кислотности (pH_{KCl}), гидролитическую кислотность (H_g , ммоль(экв) на 100 г почвы), сумму поглощённых оснований (S , ммоль(экв) на 100 г почвы), содержание гумуса (%), содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5 , мг/кг) и калия (K_2O , мг/кг) (Сычев, 2003; Шафран, Прошкин, 2008;

Пасынков и др., 2016; Абашев и др., 2018; Белоус и др., 2018; Косолапова и др., 2018; Гамзиков, Анкудович, 2018; Васбиева, 2021a).

Общеизвестно, что большинство минеральных удобрений являются физиологически кислыми. В связи с этим их применение в большинстве случаев вызывает повышение степени кислотности и гидролитической кислотности дерново-подзолистых почв (Лукин, 2009; Косолапова и др., 2016, 2018; Абашев и др., 2018; Попов и др., 2018; Панкратенкова И.В., 2019; Конова и др., 2020; Прудникова и др., 2020; Васбиева, 2021a; Мерзлая, 2021). Многие авторы указывают на то, что при длительном использовании дерново-подзолистых почв без применения удобрений показатель pH_{KCl} также снижается (Лукин, 2009; Бельченко, 2012; Лыскова, 2017; Конова и др., 2020; Мерзлая и др., 2020), в исследованиях других авторов такой закономерности не прослеживается (Малявко и др., 2010; Кирпичников, Бижан, 2019; Понкратенкова и др., 2019; Чеботарев и др., 2019; Прудникова и др., 2020; Афанасьев, Мерзлая 2021). Величина гидролитической кислотности при этом может, как повышаться (Бельченко, 2012) так и оставаться на исходном уровне (Лыскова, 2017; Кирпичников, Бижан, 2019; Прудникова и др., 2020).

В исследованиях А.И. Косолаповой (2018) на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в вариантах без удобрений и с минеральной системой удобрения (NPK экв. 20 т/га навоза в год) происходило уменьшение pH_{KCl} с 5,4-5,5 до 4,9-5,0 за 5 ротаций севооборота. Гидролитическая кислотность увеличивалась относительно исходных значений на 0,7-1,4 ммоль(экв)/100 г.

Р.А. Афанасьев и Г.Е. Мерзлая (2021), обобщая данные за 5 ротаций длительного стационарного опыта на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве указывает, что значение pH_{KCl} снизилось при применении минеральной системы удобрений с 6,0 до 5,2, в то время как при возделывании культур севооборота без применения удобрений осталась на исходном уровне – 5,0 единиц.

В первую очередь среди минеральных удобрений на подкисление почвы оказывают влияние азотные удобрения (Иванова, 1988; Пасынков и др., 2016;

Абашев и др., 2018). Применение фосфорных и калийных удобрений в одних исследованиях не оказывает влияния на pH (Мерзлая и др., 2012; Абашев и др., 2018) в других оказывает (Мерзлая, 2010; Махалов, Гувеннов., 2015).

А.В. Пасынков и др. (2016) на основании своих исследований указывают, что повышение степени кислотности при применении возрастающих доз азотных удобрений идёт линейно, а величина гидролитической кислотности увеличивается по полиному второй степени.

Г.Е. Мерзлой (2010) приводятся данные об изменении pH_{KCl} за ротацию севооборота от азотных удобрений с 5,2 до 5,0, фосфорных – с 5,0 до 5,1, калийных – с 5,7 до 5,3, полного минерального удобрения – с 5,1 до 4,9.

Показатель суммы поглощённых оснований в результате применения минеральных удобрений по данным ряда авторов может как увеличиваться (Митрофанова, 2012; Косолапова и др., 2016; Васбиева, 2021a), так и уменьшаться (Митрофанова, 2010; Семендяева, 2010; Бельченко, 2012; Пасынков и др., 2016; Абашев и др., 2018; Кирпичников, Бижан, 2019). Повышение значения показателя может быть обусловлено внесением фосфорных и калийных удобрений, а также низким исходным уровнем (Митрофанова, 2012). Без применения минеральных удобрений величина показателя может уменьшаться (Семендяева, 2010; Бельченко, 2012) или оставаться на исходном уровне (Кирпичников, Бижан, 2019; Васбиева, 2021a)

По данным С.А. Бельченко (2012) сумма поглощённых оснований снизилась в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при использовании $N_{80}P_{25}K_{66}$ за 12 лет исследований с 7,4 до 5,1 ммоль(экв)/100 г, в варианте без применения удобрений 6,8 до 4,2 ммоль(экв)/100 г. Автор связывает данную закономерность с выносом элементов питания с урожаем и потерями из корнеобитаемого слоя. Н.А. Кирпичников и С.П. Бижан (2019) приводят аналогичные данные для дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы: при применении НК сумма поглощённых оснований снизилась за 11 ротаций севооборота с 7,2 до 5,5 ммоль(экв)/100 г, в варианте без применения удобрений при этом изменение величины показателя не отмечалось.

На дерново-подзолистых тяжелосуглинистой почве по результатам исследований М.Т. Васбиевой (2021a) сумма поглощенных оснований увеличилась с 18,1 до 19,3 ммоль(экв)/100 г при длительном (более 40 лет) внесении полного минерального удобрения при $НСР_{05} = 1,3$. Снижение до показателя до 17,5 ммоль(экв)/100 г в варианте без применения удобрений было математически не доказуемым.

Гумус представляет собой часть органического вещества почвы, состоящий из совокупности специфических и неспецифических органических веществ, за исключением соединений, входящих в состав живых организмов и их остатков. Его особая роль заключается среди прочего в том, что он является источником азота для питания растений, поэтому в почве необходимо поддерживать его оптимальный уровень (Лыков и др., 2004; Завьялова, 2014; Белоус и др., 2018). На изменение содержания гумуса под влиянием минеральных удобрений в научной литературе имеются различные взгляды. Большинство авторов, тем не менее, сходятся во мнении, что применение минеральных удобрений стабилизирует его содержание или препятствует потерям органического вещества при правильно организованном севообороте (Иванова, 1988; Башков, 2000; Наумова и др., 2012; Завьялова, 2014; Косолапова и др., 2016; Сычев и др., 2018б; Гамзиков Г.П., 2018; Завьялова и др., 2023; de Cárcer et al., 2019; Studnicki et al., 2021). В результатах исследований других авторов отмечается, что при систематическом применении минеральных удобрений содержание гумуса в почве, особенно лёгкого гранулометрического состава, может снижаться (Мерзлая и др., 2012; Абашев и др., 2018; Понкратькова и др., 2019).

А.И. Косолапова и соавторы (2016) указывают, что при изучении возрастающих доз минеральных удобрений на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве внесение NPK в дозах 60-150 кг/га стабилизировало содержание гумуса на уровне 2,08-2,17 %. Г.П. Гамзиков и Ю.Н. Анкудович (2018) объясняют стабилизирующее действие минеральных удобрений на гумус за счёт большего, чем без применения удобрений, накопления пожнивных корневых остатков и биомассы почвенных организмов.

В.Д. Абашев и соавторы (2018) отмечают, что при длительном применении минеральных удобрений на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве содержание гумуса снизилось с 1,53 % до 1,4 %, объясняя данную закономерность тем, что при внесении минеральных удобрений усиливается минерализация органического вещества, потери которого не восполняются поступлением и гумификацией пожнивно-корневых остатков.

При изучении вопроса по изменению содержания гумуса при возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений исследователи, наоборот, принимают в большинстве случаев одну точку зрения – о снижении в таких условиях содержания гумуса (Иванова, 1988; Михайлова, 2008; Мерзлая и др., 2012; Ямалтдинова и др., 2016; Абашев и др., 2018; Гамзиков Г.П., 2018; Васбиева, 2019; Понкратенкова и др., 2019; Косолапова и др., 2018; Володина и др., 2020; Конова и др., 2020).

В исследованиях Г.Е. Мерзлой (2012), проведённых на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, указывается что содержание органического углерода за 4 ротации севооборота снизилось в варианте без применения удобрений с 1,40 до 1,01 %.

В.Г. Сычев и соавторы (2018б), обобщая данные Географической сети опытов показал, что с утяжелением гранулометрического состава темпы снижения содержания органического вещества снижаются.

В научной литературе представлена и иная точка зрения. Н.Б. Наумова и соавторы (2012) отмечают, что при длительном (год закладки опыта 1948) возделывании культур в севообороте на дерново-подзолистой почве на Нарымской государственной селекционной станции содержание органического углерода увеличилось в варианте без применения удобрений с 0,9 % до $1,12 \pm 0,13$ % за счёт заправки соломы и возделывания культур в зернотравяном севообороте, насыщенном бобовыми культурами. В работе Л.И. Ермаковой (2019) этими же приёмами объясняется стабилизация содержания гумуса за 14 лет на дерново-подзолистой супесчаной почве. В.А. Романенков (2019), описывая подобную закономерность, выдвигает предположение, что это увеличение может быть

следствием возвращения органического вещества почвы в исходное, характерное для данной почвенной разности состояние. При обобщении данных длительных стационарных опытов ГЕОСЕТИ, проведённых В.Г. Сычевым и соавторами (2020), по некоторым опытам также может быть отмечена данная закономерность, однако в большинстве опытов содержание органического углерода снижается.

Содержание подвижного фосфора в дерново-подзолистых почвах зависит от ряда свойства, среди которых основными являются величина обменной кислотности и минеральный состав (Митрофанова, 2016; Лыскова, 2017; Чеботарев и др., 2022). При применении фосфорных минеральных удобрений в почве происходит накопление его подвижных форм (Башков и др., 2017; Митрофанова, 2017; Абашев и др., 2018; Васбиева, 2021, Васбиева и др. 2021). Действие азотных и калийных удобрений на изменение показателя по результатам исследований ученых может проявляться (Иванова, 1988; Варламова, Нефедьева, 2014; Пасынков и др., 2016; Мезенцева и др., 2022), или не проявляться (Лыскова, 2017; Гамзиков Г.П., 2018; Мерзлая, 2021). При возделывании культур севооборота без применения удобрений содержание подвижного фосфора может снижаться (Лапа, Ивахненко, 2012; Чеботарев и др., 2018; Мезенцева и др., 2022) или не изменяться (Завьялова и др., 2014), при низком исходном содержании может происходить наоборот накопление фосфора в почве (Пасынков и др., 2016; Абашев и др., 2018).

Накопление подвижного фосфора в почве происходит даже при повышении степени кислотности (Варламова, Нефедьева, 2014; Митрофанова, 2016; Лыскова, 2017;). Однако некоторые исследователи связывают повышенное накопление данного элемента именно с уменьшением степени кислотности (Сычев, Кирпичников, 2009; Шафран и др., 2021; Чеботарев и др., 2022).

Повышение содержания подвижного фосфора в почве происходит даже при изначально высокой её обеспеченности (Косолапова и др., 2016). Неоднозначным вопросом является эффективность повышенных доз фосфорных удобрений для повышения уровня подвижного фосфора: ряд исследователей приводит данные о том, что с повышением доз эффективность снижается (Афанасьев, Мерзлая,

2013а; Косолапова и др., 2016; Пасынков и др., 2016; Шафран, 2021), в исследованиях других такой тенденции не отмечается (Попов и др., 2018).

Е.М. Митрофанова (2016) и А.И. Косолапова и др. (2018) приводят данные о том, что в варианте без применения удобрений и низкой обеспеченности подвижным фосфором (40-62 мг/кг) за 5 ротаций содержание элемента не изменилось, при средней – снизилось на 25 мг/кг за 3 ротации севооборота.

Содержание подвижного калия в почве зависит от минералогического и гранулометрического состава почвы (Воробьёв, 2016; Rawat et al., 2016; Никитина, 2018). Пополнение подвижных форм этого элемента может происходить за счёт необменных форм, однако при длительном отрицательном балансе интенсивность этого процесса снижается (Иванова, 1988; Михайлова, 2008; Никитина, 2018). Так, по данным Л.В. Никитиной (2018), ежегодная мобилизация калия из необменной формы на дерново-подзолистой супесчаной почве при возделывании культур без применения удобрений с 1 по 7 ротацию севооборота снизилось с 75 кг/га до 27 кг/га. Снижение темпов мобилизации уменьшается при утяжелении гранулометрического состава почвы, как указывает В.А. Воробьёв (2016), за счёт большего содержания необменных форм калия.

Основным фактором увеличения содержания подвижного калия в почве является применение калийных удобрений (Абашев и др., 2018; Гамзиков Г.П., 2018; Косолапова и др., 2018). Однако ряд авторов указывает также на влияние других минеральных удобрений, в первую очередь азотных, а также фосфорных (Иванова, 1988; Воробьёв, 2016).

Л.В. Никитина (2018) указывает, что повышение содержания калия на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава происходило только при дозе калия более 90 кг/га. На этот уровень доз указывают также и другие авторы (Иванова, 1988; Косолапова и др., 2018).

Снижения содержания подвижного калия при возделывании культур севооборота без применения удобрений отмечается многими авторами (Иванова, 1988; Афанасьев, Мерзлая, 2013б; Воробьёв, 2016; Мезенцева и др., 2022; Чеботарев и др., 2022), однако в исследованиях других авторов это не

прослеживается (Лыскова, 2017). К снижению содержания калия может приводить одностороннее применение азотных удобрений и их сочетаний с фосфорными (Башков, 2000; Пасынков и др., 2016; Мезенцева и др., 2022).

Падение содержание обменного калия при активном выносе культурами севооборота происходит до определённого уровня, который по данным Никитиной Л.В. (2018) устанавливается на тяжёлых дерново-подзолистых почвах в течении 8 лет, уменьшение составляет 25 %, значения устанавливаются на уровне 70-110 мг/кг. На аналогичную закономерность для лёгких дерново-подзолистых почв указывает С.М. Лукин (2009).

Так же, как и в отношении фосфорных удобрений, в отношении калийных некоторые авторы отмечают снижение эффективности увеличения ~~показателя~~ подвижного калия при повышении доз (Воробьёв, 2016; Пасынков и др., 2016; Косолапова и др., 2018; Попов и др., 2018; Шафран, 2021).

Многие исследователи отмечают, что снижение содержания фосфора происходит медленнее чем калия (Иванова, 1988; Афанасьев, Мерзлая, 2013а; Гамзиков Г.П., 2018; Митрофанова, 2016; Косолапова и др., 2018; Сычёв В.Г., 2018), в исследованиях других такой закономерности не отмечается (Конова и др., 2020).

Таким образом, применение минеральных удобрений оказывает разнонаправленное действие на изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы. Применение удобрений негативно влияет на физико-химические свойства, увеличивая степень кислотности и величину гидролитической кислотности, закономерности изменения показателя суммы обменных оснований при этом нечёткие. Систематическое применение фосфорных и калийных удобрений увеличивает содержание подвижных их форм. Применение полных доз минеральных удобрений стабилизирует содержание гумуса почвы. При возделывании культур без применения удобрений происходит снижение содержания подвижных соединений фосфора и калия, изменение физико-химических свойств носит не ярко выраженный характер, чаще всего отмечается снижение содержания гумуса.

1.2 Влияние минеральных удобрений на урожайность озимой ржи

Формирование урожайности – это сложный динамический процесс, зависящий в первую очередь от агротехнических и почвенно-климатических факторов. На низко плодородных дерново-подзолистых почвах научно обоснованное внесение удобрений является одним из важнейших методов повышения урожайности зерновых культур (Макшакова, 2014; Мурыгин и др., 2016; Белоус и др., 2018; Володина и др., 2019; Попов и др., 2020; Полетаев и др., 2022). Многие авторы, отмечают что происходящее глобальное изменение климата с региональными проявлениями (повышение среднесуточных температур и в первую очередь зимних, увеличение количества лет с аномальными погодными условиями, удлинение безморозного периода) способствуют уточнению некоторых агротехнических приемов возделывания сельскохозяйственных культур (Усков, Державин, 2008; Елисеев, 2010; Ермакова и др., 2013; Косолапова и др., 2013; Логинов, Хитриков, 2018; Ползиков, 2022).

Озимая рожь обладает рядом характеристик, обеспечивающих её высокую продуктивность в Нечерноземной зоне: устойчивость к кислотности, засухе, высокая степень перезимовки, стабильная продуктивность при разных условиях вегетации (Кедрова и др., 2012; Сысуев и др., 2015; Нуждина и др., 2016; Лыскова, 2017; Абашев и др., 2018).

В работах многих авторов отмечается, что ввиду низкой обеспеченности растений доступным растениям азотом наибольшую эффективность по влиянию на урожайность озимой ржи среди минеральных удобрений на дерново-подзолистых почвах показывают азотные удобрения (Башков, 2000; Завалин, Пасынков, 2007; Сычев и др., 2009; Абашев и др., 2014; 2018; Макшакова, 2014; Анкудович, 2015; Мурыгин, 2017; Попов и др., 2018, 2020; Рысев и др., 2018; Понкратенкова и др., 2019; Шпанев, Фесенко, 2019; Studnicki et al., 2021; Полетаев и др., 2022).

В исследованиях Ф.А. Попова и соавторов (2020) в условиях влажного и холодного июня и влажного июля 2018 г. наибольшее влияние на урожайность

озимой ржи оказывали азотные и фосфорные удобрения. В 2019 г., когда июнь и июль были засушливыми, наибольшее влияние оказало внесение азота, влияние фосфора снизилось. В оба года наименьшая урожайность была в вариантах без применения удобрений и с применением одних калийных удобрений. Наибольшая прибавка была отмечена авторами при применении полного минерального удобрения. Самая высокая окупаемость 1 кг д.в. удобрений зерном (в среднем за 2 года 42,5 кг) получена в варианте N₆₀.

И.Г. Юлушев (2019) приводит сведения, что для почв Кировской области, в пахотном горизонте которых низкое содержание подвижного алюминия, отмечается увеличение урожайности озимой ржи с 2,94 т/га в контроле до 4,39 т/га при внесении одних азотных удобрений. При совместном внесении азота с фосфором урожайность увеличивалась до 4,55 т/га, при внесении полного минерального удобрений до 4,61 т/га.

Ю.Н. Анкудович (2015) указывает, что на дерново-подзолистой супесчаной почве длительного стационарного полевого опыта СибНИИСХиТ в зависимости от погодных условий периода вегетации урожайность озимой ржи определялась применением азотных удобрений на 28-46 %, в то время как фосфорными и калийными на 5,3-13,8 и 1,6-3,2 % соответственно.

Для озимой ржи в условиях Нечерноземной зоны применение одних фосфорных и калийных удобрений является малоэффективным приёмом, однако для фосфора эффективность выше, чем для калия (Гусева, 1972; Иванова, 1988; Попов и др., 2020; Рысев и др., 2018). Эффективность фосфорных удобрений зависит от количества доступных растениям фосфатов в почве и доз азотных и калийных удобрений, а также извести (Иванова, 1988; Сычев, Кирпичников, 2009; Шафран, 2015). Эффективность калийных удобрений зачастую проявляется на озимой ржи только при совместном их внесении с азотными и фосфорными или при низкой обеспеченности почвы калием (Шафран и др., 2012; Попов и др., 2018; Андриюшина и др., 2022). Внесение одних фосфорно-калийных удобрений по данным Географической сети опытов повышает урожайность озимой ржи на 0,2-1,3 ц/га (Рысев и др., 2018).

Ф.А. Попов и соавторы (2020) указывают, что при изучении влияния доз и соотношений минеральных удобрений на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах Кировской области, прибавка от внесения фосфорных и калийных удобрений в дозе 60 кг/га на озимой ржи по годам исследований составила 0,89-1,11 и 0,22-0,67 т/га. При совместном внесении РК прибавка составила 1,04-2,19 т/га. Окупаемость минеральных удобрений зерном при этом составляла 14,8-18,5, 3,7-11,2 и 8,7-18,2 кг зерна на 1 кг д.в. соответственно. При повышении доз указанных удобрений величина прибавки увеличивалась, однако окупаемость удобрений зерном снижалась

Несмотря на высокую эффективность одностороннего применения азотных удобрений более эффективными они становятся при достаточной обеспеченности растений фосфором и калием, в таком случае говорят о положительном влиянии полного минерального удобрения (Башков, 2000; Мёрзлая Г.Е., 2012; Абашев, Светлакова, 2015; Пасынков и др., 2016; Рысев и др., 2018; Конова и др., 2020; Studnicki et al., 2021; Umarov, Azizov 2021).

По данным Г.Е. Мерзлой (2012) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при длительном (4 ротации севооборота) внесении минеральных удобрений отмечается, что урожайность озимой ржи увеличивается с 20-21 ц к.е./га в варианте без применения удобрений до 29-36 ц к.е./га при внесении одних азотных удобрений (доза 90 кг/га д.в.). Несмотря на то, что фосфорные и калийные удобрения по отдельности дают меньшую прибавку (урожайность 24 и 21-25 ц к.е./га соответственно), совместное их внесение с азотными существенно повышает урожайность до 34-44 ц к.е./га.

М.Н. Рысев и соавторы, (2018), анализируя данные Географической сети опытов, приводит сведения о том, что добавление к фону $P_{40}K_{40}$ доз азота от 20 до 60 кг/га даёт прибавку зерна в зависимости от гранулометрического состава от 1,1-1,8 ц/га до 5,4-8,2 ц/га на дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России.

В.Д. Абашев и Е.В. Светлакова (2015) отмечают, что для Кировской области характерно увеличение урожайности озимой ржи при длительном применении различных доз и соотношений минеральных удобрений в 5-7 ротациях

севооборота с 1,94-2,84 т/га в варианте без применения удобрений до 4,32-4,93 т/га при применении (NPK)₁₅₀.

Важным вопросом в научной дискуссии является влияние повышенных доз минеральных удобрений. Многие исследователи отмечают, что с увеличением доз минерального удобрения продуктивность культур повышается, однако прибавка при этом снижается, то есть действие удобрений носит затухающий характер (Белоус и др., 2014; Пасынков и др., 2016; Рысев и др., 2018; Сычёв В.Г., 2018). Другие приводят данные о том, что высокие дозы вызывают снижение урожайности озимой, ржи (Сычев и др., 2009; Loide, 2015; Косолапова и др., 2016; Белоус и др., 2017).

По результатам исследований, проведённых И.Н. Белоусом и др. (2014) с линейно возрастающими дозами $N_{70-140-210}P_{30-60-90}K_{60-120-180}$, в среднем за 4 года урожайность озимой ржи возрастала в ряду 1,44-1,82-1,97. Прибавка от первой дозы относительно контроля составила 0,87 т/га, и при увеличении доз уменьшалась относительно предыдущей дозы с 0,38 до 0,15 т/га. В условиях, когда рожь возделывалась без применения пестицидов, закономерность при тех же дозах была иной. Урожайность составила по вариантам в среднем за 7 лет исследований 1,39-2,03-1,79 т/га, а изменение урожайности от возрастающих доз относительно предыдущей 0,79, 0,64 и минус 0,24 (Белоус и др., 2017).

По результатам исследований ФАНЦ Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, наибольшая урожайность озимой ржи сорта Фалёнская 4 достигается при средних и высоких (от 90-150 кг/га) дозах полного минерального удобрения, и может достигать 5 т/га, при этом в благоприятные годы повышение происходит линейно (Лыскова, 2017; Абашев и др., 2018, 2020; Попов и др., 2018).

Важным условием эффективности использования минеральных удобрений в условиях рыночной экономики современной России является окупаемость их применения, как агрономическая, так и экономическая. Окупаемость применения минеральных удобрений зерном снижается с повышением доз (Пасынков и др., 2016; Белоус и др., 2018; Абашев и др., 2020; Чухина и др., 2020). Однако вопрос уровня доз, с которых начинается снижение, остаётся достаточно дискуссионным.

В.Г. Сычёв (2018), обобщая результаты длительных опытов ГЕОСЕТИ, указывают, что максимальная агрономическая окупаемость на дерново-подзолистых суглинистых почвах достигается при применении NPK в дозе 90 кг/га (18 кг/кг д.в. удобрений). И.В. Лыскова (2017) указывает, что максимальная окупаемость 1 кг д.в. удобрений зерном озимой ржи происходит при внесении одних азотных удобрений. В.Д. Абашев и др. (2020) приводит данные о максимальной агрономической (10,6 кг зерна / 1 кг удобрений) и экономической (рентабельность 76 %) при дозе (NPK)₃₀. М.Н. Рысев и др. (2018) указывают, что окупаемость зерном 1 кг азота снижается, начиная с дозы 120 кг/га.

Некоторые авторы указывают на то, что наиболее рентабельное производство озимой ржи отмечается при её возделывании без применения удобрений или при невысоких дозах азотных удобрений (Максимов и др., 2020; Szuleta et al., 2023).

В исследованиях В.А. Максимова и др. (2020) показано, что на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве при возделывании озимой ржи без удобрений, и при подкормках N₄₅ в кущение и N₁₅ в колошение получена одинаковая, или в зависимости от сортов более высокая, рентабельность: 84 и 88 % на сорте Татьяна, 60 и 75 % на сорте Московская 15. При использовании в основное внесение 150 кг/га азофоски, рентабельность по вышеназванным сортам снижается на 15-24 %, но при использовании двух подкормок устанавливается на уровне 74 и 56 %. Себестоимость зерна при применении двух подкормок снижается, за счёт увеличения урожайности.

При определении эффективности минеральных удобрений на урожайность озимой ржи необходимо также обращать внимание на другие условия произрастания культуры, в первую очередь это погодные условия периода вегетации и агрохимические свойства почвы (Иванова, 1988; Михайлова, 2008; Муратов, Гилязов, 2015; Уткина и др., 2015; Фесенко и др., 2020). Эффективность минеральных удобрений повышается в условиях достаточного увлажнения (Иванова, 1988; Чухина и др., 2020), однако в условиях засухи или, наоборот, избытка влаги высокие дозы минеральных удобрений оказывают негативное

влияние на величину урожая (Белоус и др., 2018). По данным M. Studnicki et al. (2021) на песчаных почвах Польши сбалансированное применение полного минерального удобрения способствует повышению урожайности и в засушливые периоды.

По данным М. А. Фесенко и соавторов (2020), гидротермические условия вегетации могут определять до 59 % урожайности озимой ржи, притом, что уровень питания – только до 21 %.

С.Л. Елисеев и Т.С. Вершинина (2017) приводят данные о том, что в Центральной части Пермского края для получения наиболее высокой и устойчивой при различных погодных условиях урожайности зерна озимой ржи необходимо в период от посева до окончания вегетации осенью суммы среднесуточных температур в диапазоне 450-500 °С.

Таким образом, урожайность озимой ржи в условиях Нечернозёмной зоны определяется погодными условиями периода вегетации и применением минеральных удобрений. Среди минеральных удобрений основное влияние оказывают азотные, они обеспечивают наибольшую прибавку урожайности, экономическую и агрономическую окупаемость. Действие фосфорных и калийных удобрений проявляется в меньшей степени. Наиболее эффективно применения полного минерального удобрения, так как действие азотных удобрений усиливается за счёт применения фосфорных и калийных. Однако, чем выше доза минеральных удобрений, тем сильнее снижается его окупаемость зерном.

1.3 Влияние минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой ржи

Важным вопросом при возделывании озимой ржи является получение урожая не только определённой величины, но и соответствующего качества для дальнейшего использования его в переработке на продовольственные и другие нужды. В зерне озимой ржи в зависимости от условий и сорта может содержаться 9-17 % белка, 52-63 % крахмала, 1,6-1,9 % жира, при этом белок озимой ржи более сбалансирован по аминокислотному составу, чем белок других зерновых

культур, за счёт повышенного содержания лизина, треонина, фенилаланина и аргинина (Кондратенко и др., 2015). Вышеуказанные характеристики определяют то, что озимая рожь может использоваться для переработки по большому числу направлений – выпечка хлеба, производство крахмала, спирта, биотоплива, кормов и т.д. (Сысуев и др., 2014; Андреев и др., 2014; Исмагилов и др., 2016; Нуждина и др., 2016; Šeremešić et al., 2019)

Многие авторы отмечают, что показатели качества озимой ржи зависят как от сортовых особенностей, так и от условий выращивания (Кондратенко и др., 2015; Лыскова, 2017; Ненайденко, Ильин, 2017; Kunkulberga et al., 2017). Среди основных показателей качества зерна озимой ржи исследователи выделяют содержание сырого белка, натуру и активность фермента альфа-амилазы (показатель «число падения») (Пасынков, Пасынкова, 2011; Нуждина и др., 2016; Лыскова, 2017; Попов и др., 2018; Козлова и др., 2017). Не менее важными показателями для переработки зерна озимой ржи на продовольственные цели являются содержание крахмала, зольность, белизна муки, аминокислотный состав (Кондратенко и др., 2015; Ненайденко, Ильин, 2017).

Сорт Фалёнская 4 относится в первую очередь к продовольственным сортам. Однако отмечается, что данный сорт может быть использован на кормовые цели и в крахмальной промышленности (Сысуев и др., 2011; Андреев и др., 2014; Возделывание озимой ..., 2021).

Содержание белка – одна из основных характеристик биологической ценности зерна. Около 92 % белка поступает в организм человека за счёт зерновых культур – либо напрямую, либо опосредованно через скармливание зерновых скоту (Кондратенко и др., 2015). Среди показателей качества зерна озимой ржи содержание сырого белка в наименьшей степени зависит от погодных условий и в наибольшей от применяемых удобрений, прежде всего азотных (Башков, 2000; Нурлыгаянов, 2003; И.Н. Белоус и др., 2017; Иванова, 1988; Пасынков, Пасынкова, 2011; Чухина, 2014; Пасынков и др., 2016; Лыскова, 2017; Ненайденко, Ильин, 2017; Максимов, Золотарева, 2019; Darby et al., 2019).

Л.А. Михайлова (2008) и И.В. Лыскова (2017) указывают, что немаловажным фактором увеличения содержания белка может быть высокая степень обеспеченности растений фосфором. Некоторые исследователи указывают, что азотные удобрения могут не влиять на содержание белка в зерне ржи, и определяющим фактором является генотип растений (Сычев и др., 2009; Пономарева, Пономарев, 2019).

Аминокислотный состав озимой ржи определяется в первую очередь видовыми особенностями и не изменяется от условий выращивания (Ненайденко, Ильин, 2017). С другой стороны, при увеличении содержания белка происходит увеличение общего выхода аминокислот (Белоус и др., 2017). Однако аминокислотный состав зерна ржи сбалансирован лучше, чем у пшеницы и ячменя (Андреев и др., 2014). К основным (критическим) аминокислотам относятся лизин, метионин и триптофан, которые лимитируют использование других аминокислот для синтеза молекул белка. Количественно в зерне озимой ржи их меньше, чем в других озимых культурах. По данным Д.В. Маркевича и др. (2013), в сортах, возделываемых в Республике Беларусь, в озимых тритикале и пшенице их 7,75 и 7,03 г/кг, в то время как в зерне ржи 6,75 г/кг. Важным параметром в оценке аминокислотного состава является учёт содержания и выхода с урожаем продукцией критических аминокислот – лизина, метионина и триптофана, которые лимитируют использование других аминокислот для синтеза молекул белка (Маркевич и др., 2013).

Масса 1000 зёрен представляет собой характеристику массы зерновки, и варьирование этого показателя определяется генетическими особенностями сорта (Иванова, 1988; Пасынков, Пасынкова, 2011; Козлова и др., 2017; Ненайденко, Ильин, 2017; Попов и др., 2018). Данный показатель характеризует общую крупность зерна, посевные качества и выход продукции при переработке, является показателем устойчивости зерна к условиям среды (Аниськов, Сафонова, 2020).

Ф.А. Попов и соавторы (2018) указывают, что величина показателя по результатам исследований, проведённых в Кировской области, не зависела от доз

минеральных удобрений. На аналогичные результаты указывает Ю.П. Жуков и др. (2011). Г.Н. Ненайденко и Л.И. Ильин (2017), А.В. Пасынков и др. (2016) и И.Н. Белоус и др. (2017) отмечают закономерность повышения данного показателя от действия минеральных удобрений. По данным Т.И. Ивановой (1988) при избыточной влажности (ГТК 2,5-2,7) в период налива и созревания зерна формируется плохо выполненное зерно, что в свою очередь приводит к снижению урожая. В таком случае азотные удобрения снижают массу 1000 зёрен, а калийные, наоборот, повышают.

Натура – это один из ориентировочных показателей мукомольных качеств зерна. Данный показатель по результатам исследований многих авторов несущественно изменяется под действием минеральных удобрений, достигает наибольших значений в засушливые годы, зависит от выполненности зерна и массы 1000 зёрен (Жуков и др., 2011; Абашев и др., 2014; Чухина, 2014). У сорта Фалёнская 4 находится на уровне 650-713 г/л в зависимости от условий вегетационного периода (Лыскова, 2017; Попов и др., 2018; Козлова и др., 2017). В свою очередь, И.Н. Белоус и др. (2017) отмечают существенное увеличение натуры зерна озимой ржи с 654 г/л в варианте без удобрений до 680-687 г/л в варианте $N_{140}P_{60}K_{120}$. А.А. Завалин и А.В. Пасынков (2007) указывают на снижение натуры зерна под действием азотных удобрений.

Крахмал является запасующим веществом, содержание которого в зерне озимой ржи составляет около 60 %. Зёрна крахмала у ржи самые крупные среди зерновых, что в совокупности с высоким содержанием обуславливает возможность использования ржи как сырья для производства крахмала (Сысуев и др., 2011; Андреев и др., 2014; Литвяк и др., 2018). В.А. Сысуев и др. (2011) отмечают, что для производства крахмала наиболее пригодно зерно с содержанием крахмала не менее 58 % и белка не более 13 %.

К.П. Кирин с соавторами (2022) указывают, что на содержание крахмала в зерне ржи в первую очередь оказывают влияние генотипические особенности сорта и только во вторую почвенно-климатические условия. В свою очередь, И.Н. Белоус и др. (2014) указывают, что высокие дозы полного минерального

удобрения увеличивали содержание крахмала с 59,7 % в варианте без удобрений до 62,3 % при $N_{210}P_{90}K_{180}$. В.А. Максимов и Р.И. Золотарева (2019) также выявили повышение содержания крахмала в зерне озимой ржи при применении минеральных удобрений, однако указывают, что эффективность этого применения зависит от сорта. Так, применение азофоски в дозе 1,5 ц/га увеличивало содержание крахмала по сравнению с вариантом без применения удобрений у сорта Татьяна с 43,8 до 49,7 %, а у сорта Рада с 47 до 48,4 %. А.С. Башков (2000), А.А. Завалин и А.В. Пасынков (2007), наоборот, отмечают, что внесение азотных удобрений приводило к снижению содержания крахмала в зерне озимой ржи, а фосфорно-калийных – к увеличению (Башков, 2000).

Количество крахмала, степень его синтеза и способность к клейстеризации определяют хлебопекарные свойства ржаной муки. Степень синтеза крахмала выражается через показатель «числа падения» (ЧП), который характеризует активность фермента альфа-амилазы. Чем выше активность фермента, тем сильнее происходит расщепление в зерне крахмала до сахаров, что говорит об активизации ростовых процессов в зерне (Нурлыгаянов, 2003; Лыскова и др., 2014; Шляхтина и др., 2018; Järvan et al., 2018).

В научной литературе имеются сведения о том, что на величину данного показателя минеральные удобрения не оказывают влияния (Сычев и др., 2009; Жуков и др., 2011; Усова и др., 2012; Чухина, 2014), однако оказывают влияние погодные условия в период созревания – налива зерна (Пасынков, Пасынкова, 2011; Лыскова и др., 2014; Белоус и др., 2017; Домаш и др., 2017; Козлова и др., 2017; Шляхтина и др., 2018; Пономарева, Пономарев, 2019; Linina et al., 2019). С другой стороны, результаты некоторых исследований показывают, что применение минеральных удобрений может оказывать разнонаправленное влияние на активность альфа-амилазы (Иванова, 1988; Коромыслова, 1995; Завалин, Пасынков, 2007; Абашев и др., 2014; Пасынков и др., 2016; Попов и др., 2018; Darby et al., 2019).

И.В. Лыскова и др. (2014) указывают, что при благоприятных (2011 г.) и засушливых (2013 г.) условиях последних периодов вегетации озимой ржи

показатель ЧП у сорта Фалёнская 4 находился в интервале 206-224 сек., что соответствует I классу качества. В то время как в условиях повышенного количества выпавших осадков и пониженной температуры (2012 г.) ЧП снижалось до 168 сек, что соответствует II классу. В исследованиях О.В. Чухиной (2014) показано, что возрастающие дозы полного минерального удобрения не оказывали влияние на «Число падения», несмотря на то, что в различных погодных условиях оно варьировало от 140 до 287 с.

В исследованиях В.В. Коромысловой (1995) показано, что показатель числа падения в зерне озимой ржи снижается под действием азотных удобрений и известкования, закономерность описывается уравнением регрессии 1-0,5 степени и имеет относительно высокий коэффициент корреляции между фактическими и теоретическими данными ($r=0,881$). В.Д. Абашев и др. (2014) указывает на аналогичную закономерность для азотных удобрений.

В свою очередь Ф.А. Попов и соавторы (2018) приводят данные о том, что при внесении полного минерального удобрения в дозе 60 кг/га д.в. показатель ЧП устанавливается на уровне 231 сек., при этом в зерне, полученном в варианте без применения удобрений, ЧП было равно 193 сек. Увеличение дозы полного минерального удобрения до 150 кг/га д.в. не оказало влияния на изменение значения показателя.

Показатели качества зерна зачастую связаны между собой. А.В. Пасынков и Е.Н. Пасынкова (2011) указывают, что, чем выше содержание белка и масса 1000 зёрен, тем ниже показатель числа падения. В исследованиях М.Л. Пономаревой и С.Н. Пономарева (2019) установлено обратное. В исследованиях Р.Р. Исмагилова и др. (2016) показано, что большое количество побегов озимой ржи может объяснять высокое варьирование показателей качества, ввиду неравномерного питания и созревания: число падения в зерне может снижаться от первого побега до шестого с 201 до 130 с. M. Järvan et al. (2018) и A. Linina et al. (2019) отмечает тесную связь между содержанием белка и крахмала в озимой ржи ($r = -0,60$ и $-0,94$).

А.В. Пасынков и Е.Н. Пасынкова (2011, 2017) на основании своих исследований указывает, что показатель «Числа падения» снижается при увеличении содержания в зерне белка от минимальных значений, однако при достижении содержания белка 11 %, при дальнейшем его накоплении «Число падения» начинает увеличиваться. При увеличении массы 1000 зёрен более 27 г между этим показателем и «Числом падения» устанавливалась положительная зависимость, в то время как при массе 1000 зёрен в диапазоне 24-27 г и содержании белка 7,5-11,5 % зависимость была отрицательной. На подобную зависимость, характерную для ржи, возделываемой в Латвии, указывает и А. Linina et al. (2019).

Химический состав вегетирующих растений характеризует степень обеспеченности растения тем или иным элементом питания, что оказывает влияние на процесс формирования урожайности и показателей качества сельскохозяйственных культур (Магницкий, 1964; Ринькис, Ноллендорф, 1982; Церлинг, 1990; Горшкова, 1996; Елькина, 2008, 2011; Ермохин, Ли, 2010; Ельников, Рогова, 2016; Bangroo et al., 2010; Osvalde, 2011). Данные о химическом составе растений более полноценно характеризуют уровень минерального питания, чем содержание элементов питания в почве (Горшкова, 1996; Ельников, Рогова, 2016). Обеспеченность растений элементами питания зависит от концентрации их в питательной среде, от влияния факторов внешней среды и от способности к поглощению самих растений (Ринькис, Ноллендорф, 1982; Формирование урожая..., 1984). М.А. Горшкова (1996) указывает, что при низких уровнях питания на химический состав растений оказывают наибольшее влияние свойства почв. Уровень оптимального содержания элементов питания, в свою очередь, является физиологической характеристикой данного вида и сорта и слабо зависит от внешних условий (Церлинг, 1990; Горшкова, 1996, Ли, 2009).

Важной характеристикой минерального питания является не только содержание элементов в растении, но и соотношение их между собой (Ринькис, Ноллендорф, 1982; Елькина, 2011; Бирюкова и др., 2013; Bangroo et al., 2010). М.А. Горшкова (1996) отмечает, что наибольший дисбаланс элементов питания

чаще наблюдается на почвах подзолистого типа с низким содержанием гумуса и элементов питания в почве.

Взаимосвязь концентраций и соотношений элементов питания с урожайностью и качеством показана в ряде работ. Содержание азота в большей степени и фосфора в меньшей степени лимитировало урожайность яровой пшеницы в Эфиопии, что было показано Abebe et al. (2018) с помощью диагностики (метод DRIS) и подтверждено вегетационными опытами с исключением этих элементов. О.А. Бирюкова и др. (2014) установили, что на содержание белка и урожайность озимой пшеницы на черноземе обыкновенном оказывают влияние не только содержание в растениях азота, но соотношения N:P и N:K. При возделывании сорго на аналогичной почве установлена достоверная корреляционная связь выхода зерна с Fe, Si, P, Al, K и Cl (Ельников и др., 2003). На подзолистых почвах республики Коми Г.Я. Елькина (2011) установила, что продуктивность овса зависела от соотношений Mn/P ($r=-0,78$), Al/P ($r=-0,94$) и некоторых других. В.В. Церлинг и др. (1982) указывает на высокую положительную связь между урожайностью и содержанием элементов питания в фазы выхода в трубку и колошения.

Для озимой ржи подобных работ существенно меньше. В исследованиях М.А. Ли (2009), Ю.И. Ермохина и М.А. Ли (2010) обнаружена высокая теснота связи ($r=0,70-0,82$) между содержанием азота и фосфора в листьях растений озимой ржи в фазы выхода в трубку и колошения и урожайностью сухого вещества озимой ржи. Полученные авторами регрессионные уравнения показывают, что связь между накоплением элементов питания нелинейная. Также исследователи установили, что содержание элементов питания в листьях зависело от соответствующих видов минеральных удобрений. На зависимость продуктивности растений от содержания в растениях азота и фосфора указывает также М.А. Горшкова (1996) и В.В. Коромыслова (1995).

Таким образом, основное влияние на показатели качества зерна озимой ржи оказывают погодные условия. При благоприятных погодных условиях, к которым в первую очередь относится количество осадков в период налива-созревания

зерна, может проявляться позитивное действие минеральных удобрений. Содержание белка и, как следствие, выход критических аминокислот увеличивается при внесении азотных удобрений. Показатели массы 1000 зёрен, натуре, «Числа падения» и содержание крахмала в зерне озимой ржи может увеличиваться под действием полного минерального удобрения, однако в научной литературе достаточно мало уделяется внимания действию N, P и K по отдельности на эти показатели.

Заключение по обзору литературы

Многочисленные исследования, проведённые в научных учреждениях Нечерноземной зоны России, указывают на то, что применение минеральных удобрений оказывает достоверное влияние на агрохимические свойства дерново-подзолистых почв, урожайность и показатели качества зерна озимой ржи.

В силу того, что исследуемые почвы сформированы в таёжно-лесной зоне и имеют низкое содержание гумуса, основное влияние на повышение урожайности ржи оказывают азотные удобрения и полное минеральное удобрение, в том числе за счёт низкой изначальной обеспеченности почв элементами питания.

Однако длительное применение минеральных удобрений может, наряду с улучшением агрохимических свойств, вызывать их ухудшение. Негативные последствия, как и позитивные, проявляются только при длительном систематическом применении удобрений.

Озимая рожь ценная, высокопродуктивная культура, характеризующаяся показателями качества, которые определяют её многостороннее использование. Выбор систем минеральных удобрений, их доз и соотношений должен учитывать риски критических изменений почвенного плодородия, цели, а также возможности производителей сельскохозяйственной продукции.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика полевого опыта

Исследования проводили в длительном стационарном опыте «Изучение влияния доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность полевых культур», заложенном в 1978 и 1980 гг. на базе «Пермского НИИСХ» – филиала ПФИЦ УрО РАН под руководством С.И. Поповой. В разные годы ответственными исполнителями опыта являлись Ф.М. Зиганьшина, П.А. Лейних, А.И. Косолапова.

Опыт заложен по сокращённой схеме 1/9 полного факториального эксперимента (6 x 6 x 6). Схема опыта предусматривает изучение 6 градаций доз азотных (N), фосфорных (P) и калийных (K) удобрений – от 0 до 5 в условных обозначениях количества единичных доз (30 кг/га д.в.). Перечень вариантов в кодированном виде и их расшифровка представлены в таблице 1, схематический план опыта в приложении А. Первая цифра обозначает количество единичных доз азота, вторая – фосфора, третья – калия.

Таблица 1 – Схема опыта 1/9 полного факториального эксперимента 6х6х6

Вариант	Обозначение в кодированном виде	Вариант	Обозначение в кодированном виде
Без удобрений	000	N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	411
K ₉₀	003	N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	414
P ₉₀	030	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	441
P ₉₀ K ₉₀	033	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	444
N ₉₀	300	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	222
N ₉₀ K ₉₀	303	N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	225
N ₉₀ P ₉₀	330	N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	252
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	333	N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	255
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	111	N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	522
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	114	N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	525
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	141	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	552
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	144	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	555

Повторность вариантов в опыте двукратная, расположение делянок блоками, общая площадь делянки составляет 120 м², учётная площадь – 72 м².

Исследования в опыте проводятся в полевом парозернопропашном севообороте со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1 г.п., клевер 2 г.п., ячмень, овёс. Начиная с 2013 года, солому в опыте запахивают.

Минеральные удобрения согласно схемы опыта вносились каждый год во всех ротациях севооборота под все культуры, кроме клевера 1 и 2 г.п. и чистого пара. В годы исследований использовали карбамид, суперфосфат простой и калий хлористый.

Исследования проведены в шестой ротации севооборота на озимой ржи сорта Фалёнская 4, которая выращивалась в 2018-2019 и 2020-2021 гг.

Под озимую рожь половинную дозу азотных удобрений вносили перед посевом 29.08.2018 и 26.08.2020 под предпосевную культивацию, вторую половину в ранневесеннюю подкормку 26.04.2019 и 22.04.2021. Фосфор и калий в полных дозах вносили под предпосевную культивацию. Все удобрения вносили вручную. Посев проводили 31.08.2018 и 29.08.2020, норма высева составила 6 млн. всхожих семян на гектар. Учёт урожайности проводили прямым методом 24.08.2019 и 26.07.2021.

Агротехника в опыте – общепринятая для Центральной зоны Предуралья.

Основной метод математической обработки в факториальном опыте – корреляционно-регрессионный анализ, основанный на теории метода наименьших квадратов (Проведение многофакторных..., 1976). В.Н. Перегудов (1976, 1978) предлагает для использования 2 типа уравнений 0,5-1 и 1-2 степеней, которые в общем виде выглядят так, как представлено в формулах 1-2 и на рисунке 1. В тексте диссертации приведены регрессионные уравнения с наилучшими статистическими показателями. Все полученные уравнения и их статистические показатели приведены в приложениях.

$$y = a + b_1 \times N^{0,5} + b_2 \times N + b_3 \times P^{0,5} + b_4 \times P + b_5 \times K^{0,5} + b_6 \times K + b_7 \times NP^{0,5} + b_8 \times NK^{0,5} + b_9 \times PK^{0,5} (R^2; \varepsilon, \%) \quad (1)$$

$$y = a + b_1 \times N + b_2 \times N^2 + b_3 \times P + b_4 \times P^2 + b_5 \times K + b_6 \times K^2 + b_7 \times NP + b_8 \times NK + b_9 \times PK (R^2; \varepsilon, \%) \quad (2)$$

где:

y – зависимая переменная (показатель);

a – свободный член, характеризующий значение показателя на контрольном варианте;

b_1 - b_9 – коэффициенты регрессии, характеризующие действия видов и сочетаний минеральных удобрений;

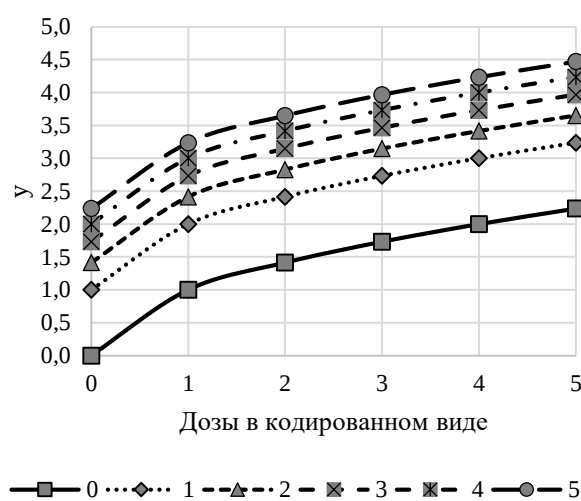
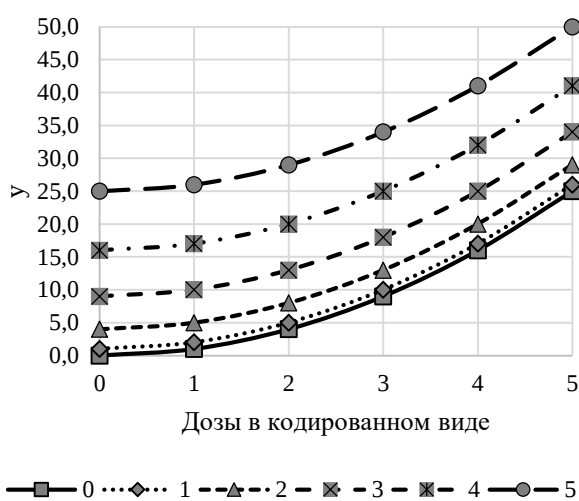
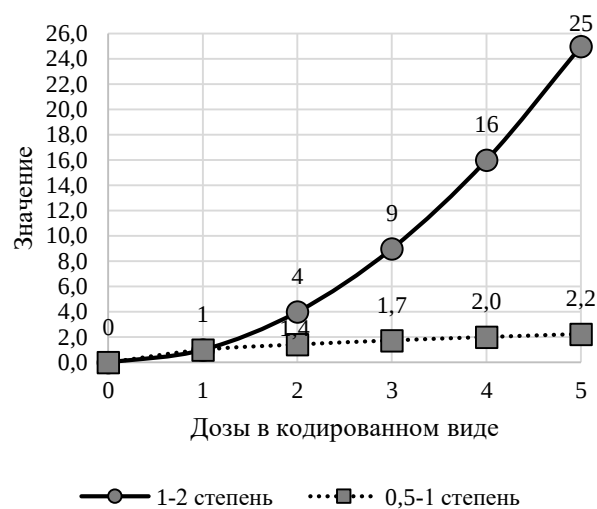
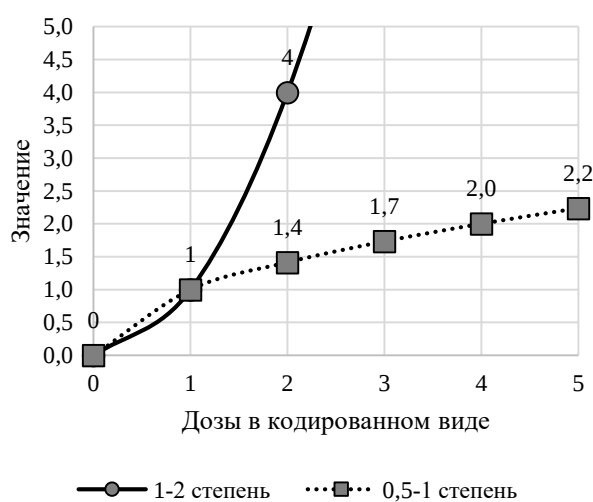
N, P, K – дозы азота, фосфора, калия и их сочетаний в кодированном виде;

R^2 – множественный коэффициент детерминации;

$\varepsilon, \%$ – относительная ошибка аппроксимации, характеризующая точность регрессионной модели.

Достоверное влияние минеральных удобрений на показатели определяли по включению в регрессионное уравнение коэффициентов регрессии, соответствующих изучаемым видам и соотношениям удобрений после проверки их на значимость ($p < 0,05$). Коэффициент детерминации показывает какая доля изменения показателя по вариантам может быть объяснена действием попавших в уравнение удобрений.

Относительная ошибка аппроксимации – это среднее относительное отклонение расчётных значений от фактических, которое выражается в процентах. Считается, что точность прогнозной модели можно считать хорошей если ошибка меньше 5 % и удовлетворительной, если данный показатель не превышает 10-15 %.



а, б – уравнения вида $y = x^2$ и $y = x^{0,5}$ в разных масштабах,
в – уравнение вида $y = x_1^2 + x_2^2$, г – уравнение вида $y = x_1^{0,5} + x_2^{0,5}$

Рисунок 1 – Общий вид уравнений 0,5 и 2 степени

2.2 Методика сопутствующих исследований

Объектами исследований являлись дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва длительного стационарного опыта и озимая рожь сорта Фалёнская 4.

В ходе исследований отбирали почвенные образцы в слое 0-20 см со всех делянок опыта в конце 5 ротации севооборота. Лабораторные исследования проводили по общепринятым методикам и ГОСТам:

1. Приготовление солевой вытяжки и определение её pH по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85);

2. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91, с 2022 года ГОСТ 26212-21);

3. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена (ГОСТ 27821-2020);

4. Определение содержание гумуса по И.В. Тюрину в модификации Б.А. Никитина с титриметрическим окончанием (Методы определения..., 2010);

5. Определение содержания подвижного фосфора и калия по Кирсанову в модификации ЦИНАО. Фосфор определяли фотоколориметрически с реактивом по Труогу и окрашиванием SnCl_2 . Калий определяли методом пламенной спектрофотометрии;

6. Определение ёмкости катионного обмена и степени насыщенности почв основаниями расчётным методом.

В течение вегетации озимой ржи отбирали зелёную массу в фазы выхода в трубку (даты отбора 15.05.2019 и 17.05.2021) и колошения (даты отбора 05.06.2019 и 04.06.2021) для определения влияния минеральных удобрений на накопление надземной массы и элементов питания в ней. Растения отбирали со всех делянок с площади 0,5 м². Содержание валовых форм азота, фосфора и калия определяли методом мокрого озоления по Гинзбург из одной навески (Практикум по агрохимии, 2001). После озоления азот определяли фотометрически индофинольным методом, фосфор фотометрический с реактивом по Труогу и окрашиванием SnCl_2 , калий методом пламенной фотометрии.

Учёт урожайности производили сплошным методом с помощью комбайна САМПО-2. В урожае определяли засорённость по ГОСТ 30483-97 и влажность зерна по ГОСТ 13586.5-2015.

Зерно озимой ржи для определения показателей качества и биохимического состава отбирали с каждой делянки опыта при учёте урожайности. В условиях 2019 года, в связи с прорастанием зерна на корню из-за обильных осадков, технологические показатели качества определяли выборочно в шести вариантах, представляющих собой блок азотных удобрений. Лабораторные исследования проводили согласно следующим методикам и ГОСТам:

1. Определение сырого белка по ГОСТ 10846-91;
2. Определение натуры в микропурке объёмом 10 см³ по ГОСТ 10840-217;
3. Определение массы 1000 зёрен по ГОСТ 10842-89
4. Определение числа падения методом Хагберга-Пертена по ГОСТ ISO 3093-2016;
5. Определение крахмала по ГОСТ 10845-98;
6. Определение золы и содержания критических аминокислот (лизин, метионин, триптофан) методом спектроскопии в ближней инфракрасной области на приборе SpectraStar XT.

Расчёт баланса гумуса проводили по балансу азота по методу А.М. Лыкова (Донских, 1989). Сущность метода состоит в том, что в процессе минерализации гумуса образуются минеральные соединения азота, которые используются растениями. По выносу растениями азота можно судить о расходе гумуса из почвы. Экономическую и энергетическую оценку проводили в соответствии с учебным пособием «Агро- и зооэнергетическая оценка...» (2001) с использованием нормативных данных и технологических карт, актуальных на момент проведения расчетов в ООО «Предуралье».

Математическую обработку результатов проводили с помощью корреляционно-регрессионного анализа по В.Н. Перегудову (1976) с помощью программы STATISTICA10. Статистическую и графическую обработку проводили с помощью программ Microsoft Excel и STATISTICA10.

2.3 Почвенно-агрохимическая характеристика участка опыта

Почва опытного участка дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая на покровных отложениях. Почвенный разрез заложен П.А. Лейнихом в 2002 году на расстоянии 2 км от села Лобаново и в 0,5 км от юго-западной границы сада на контрольном варианте в средней части пологого склона северо-западной экспозиции (Лейних, 2005).

Слой Апах, 0-25 см – Пахотный, слабоувлажнённый, светло-серый с буроватым оттенком, тяжелосуглинистый, пылевато-мелкокомковатый,

уплотненный, сильно пронизан корнями, в нижней части не перепревшие органические остатки, переход в нижележащий горизонт ясный.

Гор. A_2B_1 , 25-31 см – Переходный к иллювиальному горизонту, увлажненный, светло-буровато-белесый, тяжелосуглинистый, плотный, неоднородный по структуре, плитчато-ореховатый, с кремнеземистой присыпкой на поверхности структурных агрегатов. Встречаются мелкие зерна ортштейна, угли, сильно перепревшие органические остатки. По трещинам и ходам корней видны слабо окрашенные натеки гумуса. Переход в горизонт B_1 постепенный.

Гор. B_1 , 31-50 см – Переходный к иллювиальному горизонту, палево-бурый, влажный, тяжелосуглинистый, плотный, мелко-ореховатый. В верхней части обильная кремнеземистая присыпка, особенно хорошо прослеживается по излому структурных агрегатов, переход ясный.

Гор. B_2 , 50-99 см – Иллювиальный, влажный, бурый, глинистый, плотный, крупно-ореховатый. Четко прослеживается иллювиальность в виде глянцеватости. Переход постепенный.

Гор. B_2C , 99-146 см – Переходный к материнской породе, влажный, светлее горизонта B_2 , глинистый, плотный, крупноореховато-призматический. Переход в горизонт C постепенный.

Гор. C , 146 и более см – Материнская порода, бурая, вязкая, бесструктурная, бескарбонатная покровная глина.

Профиль почвы глубокий, горизонты хорошо выражены. В горизонте A_2B на поверхности агрегатов прослеживается оподзоленность в виде кремнистой присыпки.

При закладке полевого опыта в 1978 и 1980 гг. дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва обладала характеристиками, представленными в таблице 2. Группировка почв приведена в соответствии с методическими указаниями «Методические указания..., 2003.

Таблица 2 – Статистические характеристика агрохимических показателей дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы до закладки полевого опыта (1 закладка – 1978 г., 2 закладка – 1980 г.), N=24

Показатель / закладка опыта		X	Med	Min	Max	Sd	V, %
1		2	3	4	5	6	7
pH _{KCl}	1 закладка	5,6	5,5	5,0	6,6	0,4	7,4
	2 закладка	5,9	5,8	5,3	6,7	0,3	5,7
	Среднее	5,7	5,7	5,4	6,2	0,2	3,8
Нг	1 закладка	2,08	2,18	0,41	3,47	0,73	34,9
	2 закладка	2,68	2,74	1,09	3,66	0,61	22,7
	Среднее	2,38	2,40	1,63	3,13	0,39	16,3
S	1 закладка	20,1	20,0	15,8	25,2	2,0	9,7
	2 закладка	18,67	18,3	15,4	23,4	1,7	9,3
	Среднее	19,4	19,1	17,1	22,8	1,4	7,1
ЕКО	1 закладка	22,2	22,1	18,4	26,8	1,6	7,3
	2 закладка	21,4	20,9	18,8	25,3	1,6	7,3
	Среднее	21,8	21,6	19,5	25,0	1,3	5,8
V	1 закладка	90,5	90,2	84,4	98,3	3,5	4,0
	2 закладка	87,4	86,9	81,9	95,0	3,1	3,5
	Среднее	89,0	89,0	85,5	92,2	1,9	2,2
Гумус	1 закладка	1,82	1,82	1,59	2,19	0,18	9,7
	2 закладка	2,15	2,16	1,86	2,38	0,13	5,9
	Среднее	1,98	1,95	1,84	2,21	0,10	5,2
P ₂ O ₅	1 закладка	162	165	91	251	45	27,7
	2 закладка	202	199	135	288	45	22,3
	Среднее	182	183	126	247	35	19,5
K ₂ O	1 закладка	179	174	94	244	30	17,0
	2 закладка	142	137	107	182	19	13,3
	Среднее	161	153	128	213	20	12,6

Примечание – X – среднее значения, Med – медиана, Min – минимальное значение, Max – максимальное значение, Sd – стандартное отклонение, V, % – коэффициент вариации

– pH_{KCl} на обеих закладках изменялась в широких диапазонах от среднекислой до нейтральной степени кислотности (5,0-6,7), в среднем по опыту – близкая к нейтральной;

– Гидролитическая кислотность изменялась от 0,41 до 3,66 ммоль(экв)/100 г. Степень варьирования показателя в первой закладке являлась

существенной. Гидролитическая кислотность в среднем по первой закладке была на 0,6 ммоль(экв)/100 г ниже, чем во второй;

- Сумма поглощённых оснований по закладкам изменялась от повышенной до высокой, без достоверных различий между закладками;

- Ёмкость катионного обмена изменялась в диапазоне от умеренно низкой до средней, степень насыщенности почв основаниями – от высокой до очень высокой. Достоверных различий между закладками не было.

- По содержанию гумуса почва относилась к слабогумусированным (1,6-2,4%), первая закладка обладала более низким изначальным содержанием гумуса (средние значения 1,82 и 2,15);

- Степень обеспеченности подвижным фосфором была различной по закладкам: в первой закладке она изменялась от средней до очень высокой, во второй закладке от повышенной до очень высокой. Степень варьирования содержания подвижного фосфора в первой закладке была существенной. Первая закладка отличалась меньшим средним по опыту содержанием элемента;

- Степень обеспеченности подвижным калием по закладкам опыта находилась в диапазоне от средней до высокой. Первая закладка отличалась большим в среднем по опыту содержанием элемента.

2.4 Агроклиматическая характеристика региона и вегетационных периодов исследования

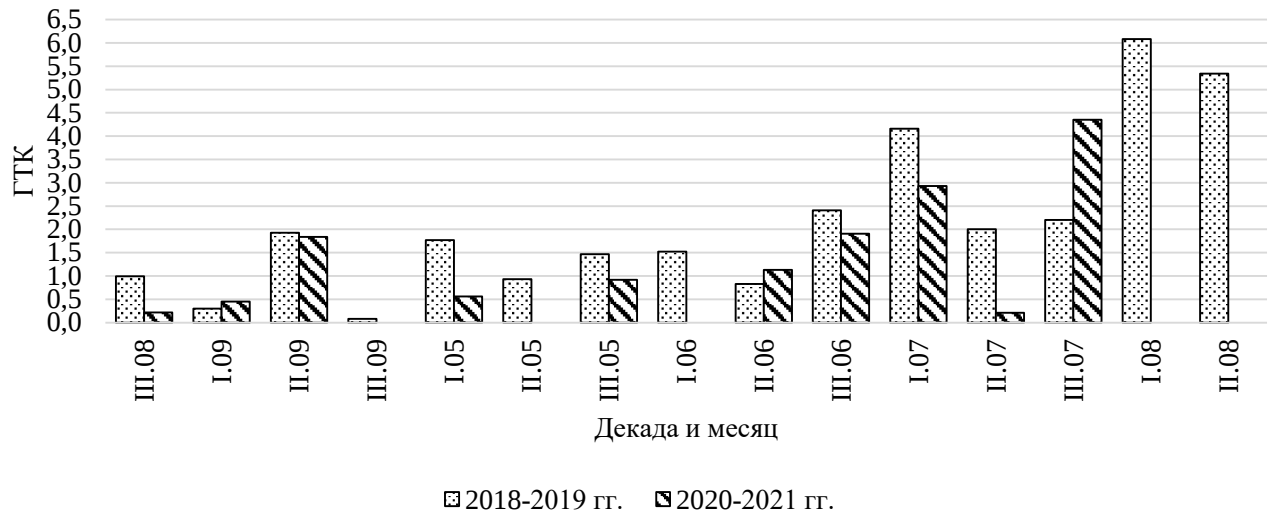
Территория Пермского края характеризуется континентальным климатом с холодной и продолжительной снежной зимой, и коротким теплым летом. Среднегодовая температура составляет минус 1,5 °С. Среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца (января) – минус 15,7 °С, теплого (июль) – +18,1 °С. Вегетационный период с температурой выше +5 °С составляет 151 день. Безморозный период составляет 120 дней. Последний заморозок на почве наблюдается 11-17 июня, первый 29 августа – 2 сентября. Сумма среднесуточных эффективных температур составляет 1800-1900 °С. Сумма осадков за год составляет 473 мм, продолжительность периода с устойчивым

снежным покровом 165 дней. Образование устойчивого снежного покрова 3 ноября. Сход снега 10-12 апреля. Высота снежного покрова 56 см. Запас продуктивной влаги в метровом слое почвы 160 мм. В зимние и весенние месяцы на территории преобладают юго-западные ветра, с мая по октябрь ветры западного направления, этот период отличается наибольшим количеством осадков (Агроклиматический справочник ..., 1959).

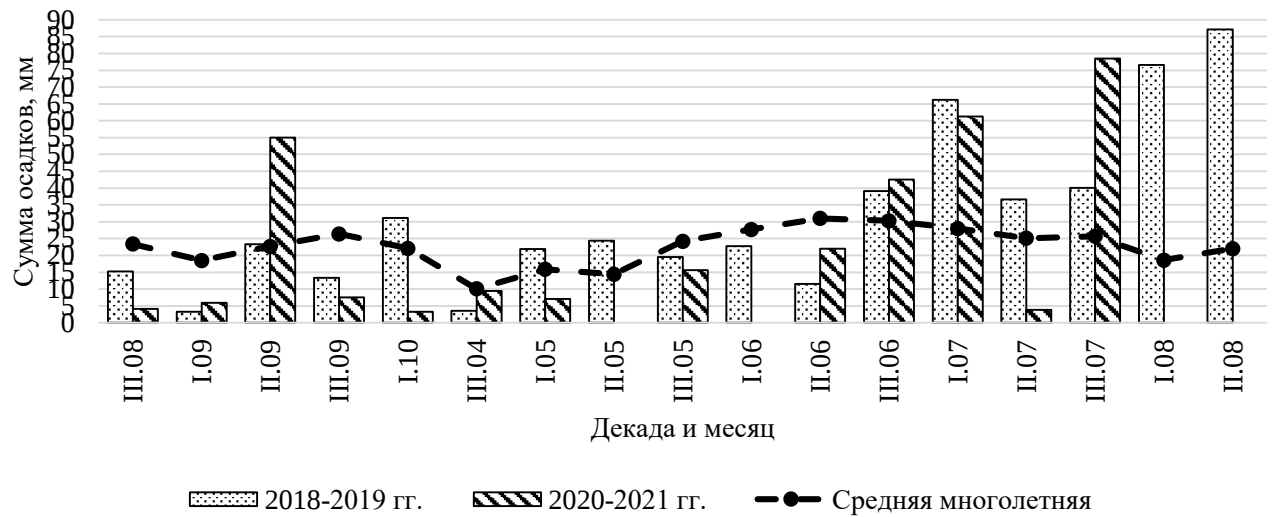
Влагообеспеченность территории характеризует гидротермический коэффициент (ГТК), который в районе г. Перми в вегетационный период составляет 1,4-1,8, что соответствует переувлажненной зоне и указывает на промывной тип водного режима почв.

Условия климата позволяют выращивать различные культуры, а продуктивность этих культур определяется биоклиматическим потенциалом (БКП), который представляет собой степень доступности для растений питательных веществ, находящихся в почве на конкретной территории, а также даётся общая оценка тепла и влаги на этой территории. Территория Пермского района относится к территории с удовлетворительными условиями биологической продуктивности при естественном увлажнении (при соотношении благоприятным для развития растений соотношением ресурсов тепла и влаги) (Ермакова и др., 2010). Среди средних многолетних значений БКП территория Пермского района так же относится к зоне с удовлетворительными агрометеорологическими условиями и уменьшается с юга на север. Биоклиматический потенциал позволяет так же оценить условия на протяжении определённой фазы развития растения, в критические периоды по поступлению влаги, тепла и солнечной энергии. По данным Л.Н. Ермаковой (2010) Пермский район, относится к территории благоприятной для возделывания как озимых, так и яровых культур.

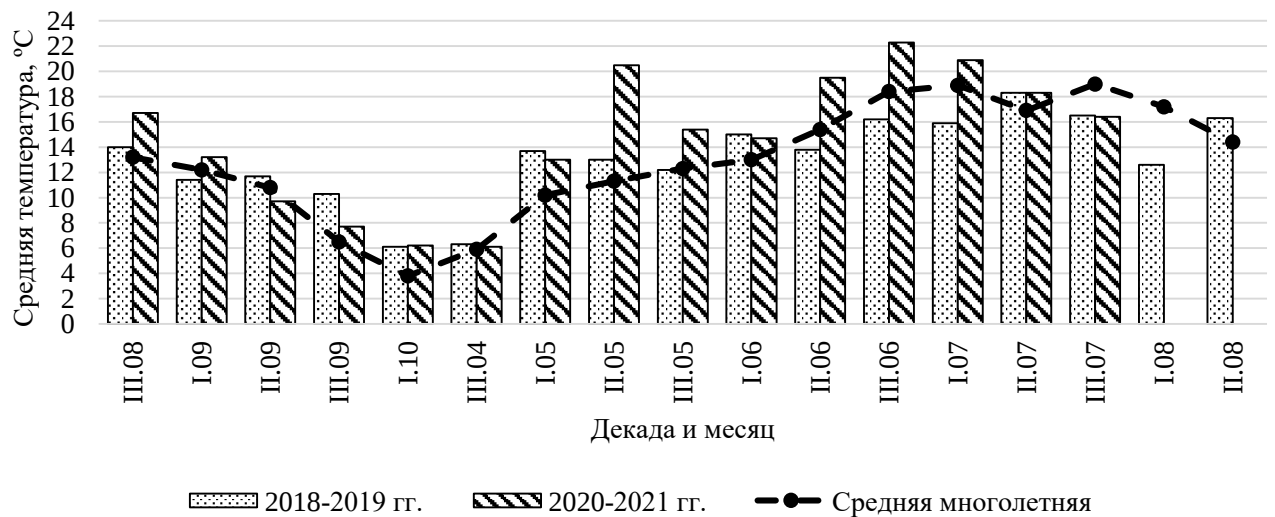
На урожайность озимой ржи большое значение оказывают погодные условия. В годы проведения исследований погодные условия в период вегетации были различны. Гидротермические условия вегетационных периодов представлены на рисунке 2 и в приложении В.



а



б



в

а – ГТК, б – сумма осадков, в – средняя температура

Рисунок 2 – Погодные условия вегетационных периодов исследования

В 2018 году в третьей декаде августа, как и в первой и второй декаде сентября температура была на уровне средне многолетних значений: отклонение составило 0,8-0,9 °С. В третьей декаде сентября и в первой декаде октября установилась более тёплая погода, чем по средне многолетним данным – температура воздуха превышала средне многолетние значения на 2,3-3,8 °С. Количество осадков в летне-осенний период вегетации озимой ржи 2018 года отличался следующими особенностями: в первую декаду октября количество осадков превышало средне многолетние значения на 40,7 %, во вторую декаду сентября количество осадков было на средне многолетнем уровне, в остальные декады наблюдался недостаток влаги (17,8-65 % от средне многолетних значений).

Весенний период вегетации озимой ржи в 2019 году также был неоднороден по погодным условиям. В конце апреля и мая температура воздуха находилась на уровне средне многолетних значений при недостатке осадков на уровне 34,6 и 80,6 % от средне многолетних значений. Первая и вторая декады мая характеризовались повышенной температурой и повышенным количеством осадков: температура была на 3,2-1,7 °С, а количество осадков на 37,7 и 69 % выше средне многолетних значений.

В среднем за весь летний период 2019 года температура была ниже средне многолетних значений на 1,1 °С. Тем не менее по декадам было так же отмечено и превышение многолетних данных: в первой декаде июня на 2 °С, во второй декаде июля на 1,4 °С, во второй декаде августа на 1,9 °С. В остальные декады наблюдалось снижение температуры воздуха относительно средне многолетних данных на 1,6-4,6 °С. Количество осадков в первую и вторую декаду июня составило 82,3 и 37,1 % от средне многолетних данных. Начиная с третьей декады июня и до конца вегетации (второй декады августа) количество выпавших осадков было выше средне многолетних значений – от 129 до 411 % от многолетних данных. ГТК в этот период в среднем составил 3,7 и изменялся от 2,0 до 6,1.

Летне-осенний период вегетации 2020-2021 гг. исследования можно охарактеризовать как сухой и тёплый – в среднем с третьей декаду августа по

первую декаду октября количество осадков составило 67,0 % от среднегодовы́х данных, температура воздуха в среднем была на 1,4 °C выше нормы. Только во вторую декаду сентября количество осадков превышало среднегодовы́е значения на 142,3 %, а по температуре воздуха наблюдали снижение температуры на 1,1 °C относительно нормы.

Весь весенний период 2021 года характеризовался как сухой и избыточно тёплый. Наиболее близкие к среднегодовы́м данным значения количества осадков и средней температуры были характерны для третьей декады апреля (93,1 % осадков и +0,2 °C от нормы). Стоит отметить что во вторую декаду мая, когда у растений наблюдалась фаза выхода в трубку осадков не было вовсе, а температура воздуха превышала среднегодовы́ю на 9,2 °C.

Летний период вегетации озимой ржи в 2021 году так же был сухой и тёплый. Исключением стала третья декада июля, когда температура воздуха была на 2,6 °C ниже нормы. В среднем по остальным декадам июня, июля и августа температура воздуха была выше среднегодовы́х значений на 2,6 °C. Количество выпавших осадков было неравномерным в летний период. Так, например, в первую декаду июня осадков не было, во вторую декаду июля выпало 15,1 % осадков от среднегодовы́х значений. С другой стороны осадки в периоды с превышением среднегодовы́ей нормы имели ливневый характер. Так, в третью декаду июня общее количество осадков за декаду выпало за 2 дня (25 мм 24.06 и 17,5 мм 26.06), в первую декаду июня основное количество (49 из 61,3 мм) выпало 04.07, в третью декаду 54 мм выпало с 21.07 по 23.07 (35 мм выпало 22.07) и 25 мм выпало уже после учёта урожайности культуры (30-31 июля).

Таким образом, годы исследования существенно различались по погодным условиям. Основной особенностью вегетационного периода 2018-2019 гг. является обильное количество осадков с третьей декады июня до уборки, из-за чего во многих вариантах опыта наблюдалось полегание растений. Вегетационный период 2020-2021 гг. отличался сильно засушливыми условиями в первую и вторую декаду мая во время выхода в трубку и в летний период в целом,

большим количеством осадков ливневого характера в некоторые декады. За оба года исследований сумма эффективных температур за летне-осенний период вегетации была выше средне многолетних данных на 88,6-43,9 °С. Суммы эффективных температур за весенне-летний период и вегетационный период в целом находились на уровне средне многолетних значений.

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

3.1 Влияние длительного применения минеральных удобрений на физико-химические свойства почвы

Возделывание сельскохозяйственных культур в севообороте в течении 40 лет приводило к подкислению почвы (таблица 3). В варианте без применения удобрений снижение составило 0,4-0,3 ед. pH, в среднем по двум закладкам величина показателя уменьшилась с 5,7 до 5,3 pH. На схожие тенденции для варианта без удобрений указывают другие авторы, как для лёгких (Лукин, 2009; Кузьменко, 2010; Лапа, Ивахненко, 2012), так и для более тяжёлых (Абашев и др., 2018; Лизиметрические исследования..., 2020) по гранулометрическому составу дерново-подзолистых почв. Данная закономерность может быть объяснена выносом катионов кальция и магния из корнеобитаемого слоя и отчуждением их с урожаем.

При применении различных доз и сочетаний минеральных удобрений в среднем по опыту pH снизилось на 0,7 единиц по обеим закладкам, в среднем по двум закладкам с 5,7 до 5,1. Стоит отметить, что в среднем по вариантам с применением удобрений снижение произошло более заметное, чем при возделывании без удобрений. Наибольшее снижение (больше 1,0 ед. pH) происходило в вариантах с применением максимальных доз азотных удобрений $N_{150}P_{60}K_{60}$, $N_{150}P_{60}K_{150}$, $N_{150}P_{150}K_{150}$.

До закладки опыта коэффициенты вариации pH_{KCl} по первой и второй закладкам составляли 7,4 и 5,8 % соответственно. Интересно отметить, что после пятой ротаций 8-польного севооборота коэффициент вариации по второй закладке снизился до 3,8, в то время как по первой закладке он остался на исходном уровне. Можно предположить, что влияние минеральных удобрений на двух закладках будет иметь различный характер.

Таблица 3 – Изменение показателя pH_{KCl} за пять ротаций севооборота

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1*	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	5,5	5,1	-0,4	5,9	5,5	-0,3	5,7	5,3	-0,4
K ₉₀	5,4	5,8	0,4	6,3	5,7	-0,6	5,9	5,8	-0,1
P ₉₀	5,6	5,0	-0,6	6,1	5,5	-0,6	5,9	5,3	-0,6
P ₉₀ K ₉₀	5,1	5,4	0,3	6,6	5,3	-1,3	5,9	5,4	-0,5
N ₉₀	5,2	4,9	-0,3	5,7	5,2	-0,5	5,5	5,1	-0,4
N ₉₀ K ₉₀	5,0	4,9	-0,1	6,3	5,4	-0,9	5,7	5,2	-0,5
N ₉₀ P ₉₀	5,1	4,8	-0,3	5,7	5,1	-0,6	5,4	5,0	-0,4
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	5,8	4,8	-1,0	5,7	5,0	-0,7	5,8	4,9	-0,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	5,1	5,4	0,3	5,8	5,4	-0,4	5,5	5,4	-0,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	5,6	4,8	-0,9	5,6	5,3	-0,3	5,6	5,1	-0,5
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	5,9	5,0	-0,9	5,5	5,0	-0,5	5,7	5,0	-0,7
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	6,6	5,6	-1,0	5,8	5,2	-0,6	6,2	5,4	-0,8
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	5,3	4,9	-0,4	5,8	5,2	-0,6	5,6	5,1	-0,5
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	5,2	4,5	-0,7	5,6	5,3	-0,3	5,4	4,9	-0,5
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	5,8	4,5	-1,3	5,6	5,0	-0,6	5,7	4,8	-0,9
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	5,3	5,4	0,1	6,0	5,2	-0,8	5,7	5,3	-0,4
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	5,6	4,8	-0,8	5,8	5,3	-0,5	5,7	5,1	-0,6
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	5,7	4,6	-1,1	5,3	5,1	-0,2	5,5	4,9	-0,6
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	5,4	4,9	-0,5	6,7	5,4	-1,3	6,1	5,2	-0,9
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	5,6	4,6	-1,0	5,8	5,2	-0,6	5,7	4,9	-0,8
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	5,5	4,4	-1,1	6,2	5,2	-1,0	5,9	4,8	-1,1
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	6,5	5,2	-1,3	5,9	5,1	-0,8	6,2	5,2	-1,1
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	5,5	4,5	-1,0	5,7	4,9	-0,8	5,6	4,7	-0,9
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	6,1	4,8	-1,3	5,6	4,9	-0,7	5,9	4,9	-1,0
Среднее	5,6	4,9	-0,7	5,9	5,2	-0,7	5,7	5,1	-0,6
V, %	7,4	7,5	—	5,8	3,8	—	3,9	4,9	—

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

Регрессионные уравнения и их статистические характеристики, описывающие изменение показателя за 5 ротаций 8-польного севооборота, представлены в формулах 3-5 и приложении Г. Стоит отметить, что отдельно по закладкам и в среднем, уравнения, наиболее лучшим образом описывающие закономерность действия удобрений, имели форму 0,5-1 степени. По всем трём уравнениям можно проследить первостепенный вклад азотных удобрений увеличение степени кислотности. Низкий коэффициент детерминации для

уравнения по первой закладке опыта может быть объяснён тем, что, как указано выше, в этой закладке коэффициент вариации показателя не изменился и остался на исходном уровне. Некоторое нивелирование негативного эффекта от применения азотных удобрений могло происходить за счёт внесения калийных удобрений, как показывает уравнение 4, однако с увеличением доз этого элемента и доз фосфорных удобрений эффект затухал. Изменение рН по делянкам опыта лишь на 49% может быть объяснено действием азотных удобрений. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$pH_{KCl} (1 \text{ закладка}) = 5,33 - 0,281 \times N^{0,5} (R^2=0,33; \varepsilon=4,8 \%) \quad (3)$$

$$pH_{KCl} (2 \text{ закладка}) = 5,44 - 0,152 \times N^{0,5} + 0,125 \times K^{0,5} - 0,086 \times PK^{0,5} \quad (4) \\ (R^2=0,68; \varepsilon=1,7 \%)$$

$$pH_{KCl} (\text{среднее}) = 5,44 - 0,234 \times N^{0,5} (R^2=0,49; \varepsilon=2,9 \%) \quad (5)$$

где: pH_{KCl} – pH_{KCl} по двум закладкам опыта и в среднем;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

5,33, 5,44, 5,44 – теоретическое значение pH_{KCl} в варианте без применения удобрений;

0,281...0,234 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

На рисунке 3 представлен график снижения величины pH_{KCl} под действием азотных удобрений, построенный на основании регрессионного уравнения 5. Наибольшее снижение величины показателя (около 0,2 единиц рН) происходило при длительном внесении единичной дозы азотного удобрения (750 кг/га за 40 лет), с увеличением дозы эффект постепенно затухал.

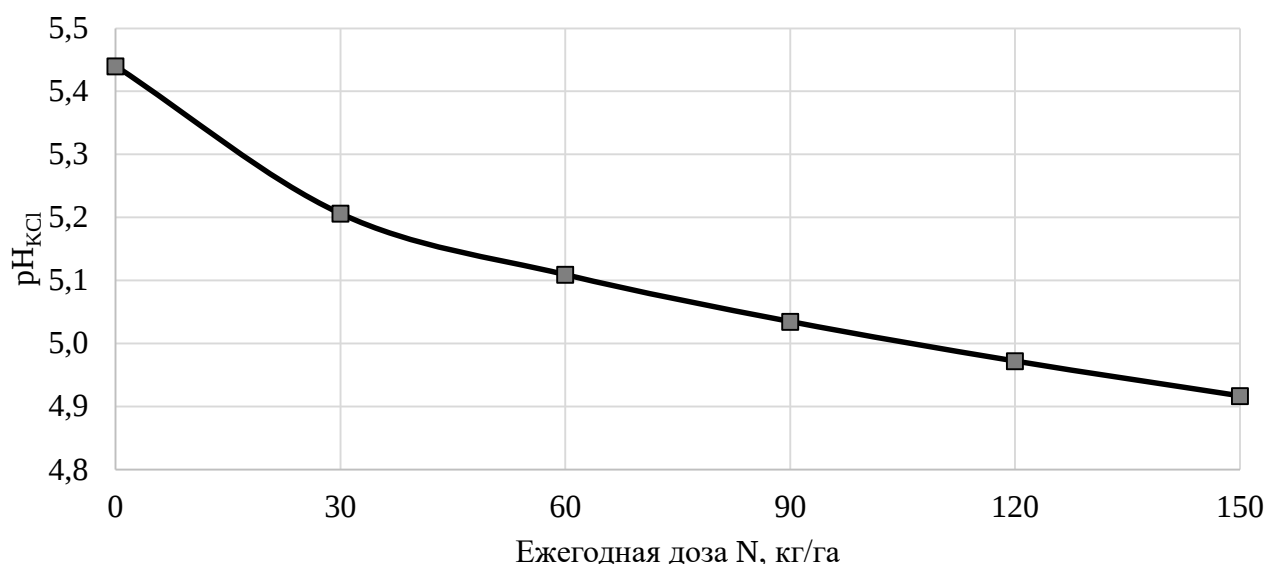


Рисунок 3 – Влияние доз азотных удобрений на pH_{KCl} (расчётные данные)

Аналогичные результаты были получены на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве Т.И. Ивановой (1988), А.В. Пасынковым и др. (2016), В.Д. Абашевым и др. (2018). Математически доказуемое влияние на снижение показателя pH_{KCl} отмечается авторами под действием азотных удобрений. По результатам исследований А.В. Пасынкова и соавторов (2016) качество регрессионного уравнения, выражаемое коэффициентом детерминации, находилось на условно «среднем» уровне ($R^2=0,51-0,63$), как и в наших исследованиях. В исследованиях Т.И. Ивановой (1988) отмечается линейный характер связи изменения pH_{KCl} под действием удобрений, в то время как по результатам наших исследований установлен нелинейный тип связи.

Указанные ранее особенности (неизменность коэффициента вариации, разные по коэффициенту детерминации уравнения) позволяют предположить, что на изменение pH_{KCl} в опыте оказывают влияние некоторые неучтённые факторы. Изменение степени кислотности происходило в зависимости от применяемых доз азотных удобрений и от исходного уровня pH_{KCl}, что можно продемонстрировать трёхмерной картой линии изменения pH в зависимости от доз N (подгонка по методу наименьших квадратов) (рисунок 4).

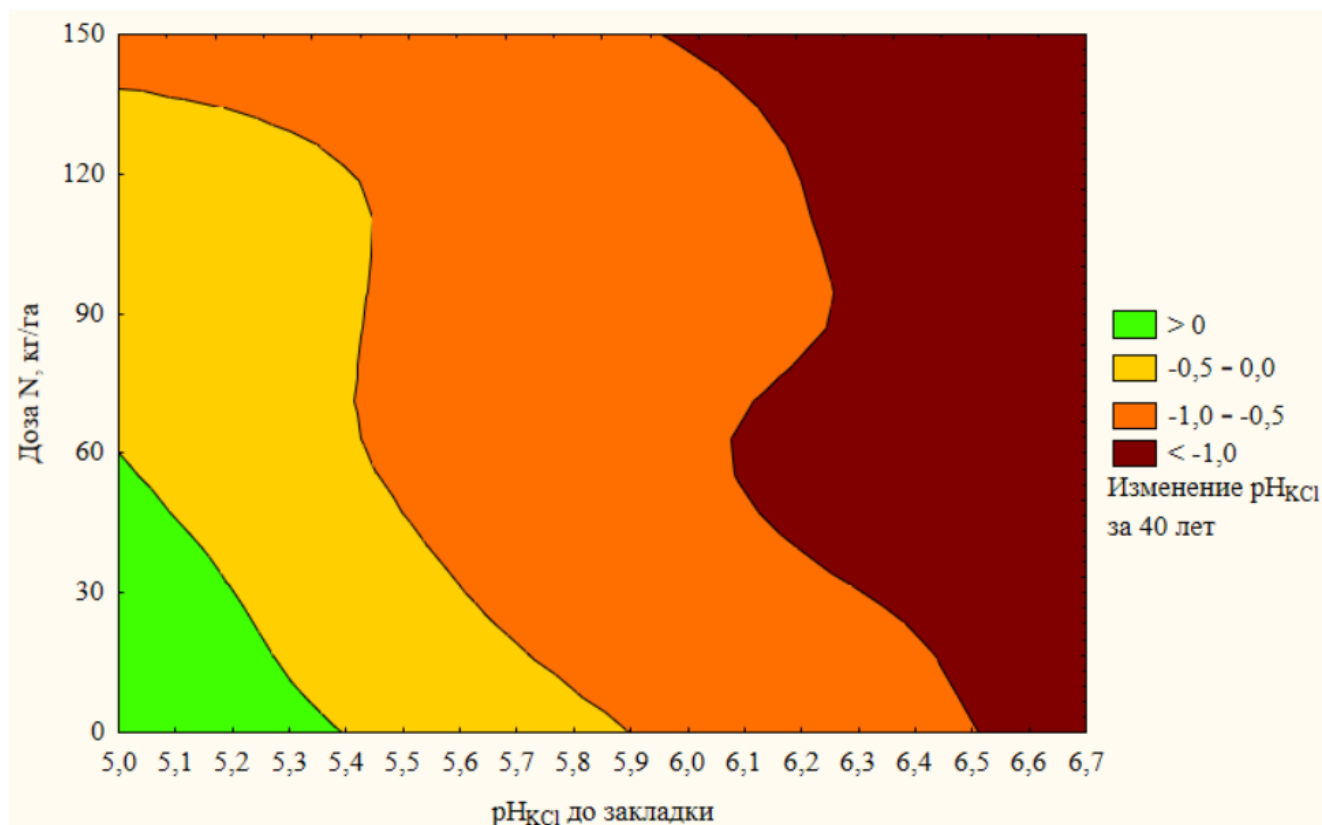


Рисунок 4 – Графическая прогнозная модель уровня изменения pH_{KCl} к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз азотных удобрений (N=48; R²=0,61; ε=8,5 %)

Графический материал иллюстрирует высокую (множественный коэффициент корреляции $r_{\text{множ}}=0,78$) тесноту связи изменения pH_{KCl} за 40 лет проведения полевого опыта с дозами азотных удобрений и величиной показателя до закладки. Интересно отметить, что при построении карты линий коэффициент детерминации получен выше, чем в полученном регрессионном уравнении 5, что подтверждает предположение о влиянии на изменение pH_{KCl} исходной вариабельности показателя.

Наибольшее повышение степени кислотности было характерно для вариантов, исходные значения pH на которых находились в диапазоне от 5,9 до 6,7 даже без внесения азотных удобрений. При исходном значении pH_{KCl} 5,0 до дозы азота 60 кг/га д.в. произошло увеличение показателя. Выявленная закономерность может быть объяснена высокой буферностью тяжелых по гранулометрическому составу дерново-подзолистых почв, степень кислотности в которых повышаясь до определённого уровня прекращает изменяться и

фиксируется на типичных для естественного состояния в данной местности значениях.

Графическая модель позволяет прогнозировать на удовлетворительном уровне ($\varepsilon < 10-15\%$) изменения pH_{KCl} в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при различных дозах азотного удобрения и исходного уровня pH . Например, при исходном уровне pH_{KCl} 5,0, который является средневзвешенным значением по Пермскому краю (Кайгородов, Пискунова, 2017), при применении дозы азотных удобрений 30-60 кг/га д.в. не должно происходить подкисление реакции почвенного раствора.

Закономерности изменения гидролитической кислотности в длительном опыте имели более сложный характер, чем закономерности изменения pH_{KCl} (таблица 4). В варианте без применения удобрений в первой закладке произошло увеличение показателя, в то время как во второй закладке значение показателя уменьшалось. Данная особенность может быть связана как с ошибками при анализе почвенных проб до закладки опыта, так и с уже упомянутой выше пестротой почвенного плодородия. В среднем по двум закладкам можно отметить некоторое увеличение величины гидролитической кислотности. Стоит также отметить, что в научной литературе нами не было обнаружено результатов исследований, в которых гидролитическая кислотность снижалась в варианте без удобрений. В связи с этим наиболее вероятной закономерностью будет как раз повышение величины показателя при длительном возделывании без удобрений при низких исходных значениях и отсутствие изменения при высоких.

Рассматривая влияние различных доз и соотношений минеральных удобрений на изменение показателя, следует отметить следующие закономерности. В среднем по первой закладке величина показателя увеличилась на 0,3 ммоль(экв)/100 г. Наибольшее увеличение происходило в вариантах с высокими дозами минеральных удобрений (дозы $N_{150}P_{150}K_{150}$ и $N_{120}P_{120}K_{30}$) и в вариантах с низкими значениями показателя до закладки опыта (при дозах $N_{30}P_{120}K_{120}$ и $N_{150}P_{60}K_{150}$ увеличение произошло с 0,4 до 1,8-1,5 ммоль(экв)/100 г). Во второй закладке опыта в среднем по вариантам с применением удобрений

произошло повышение гидролитической кислотности на 0,4 ммоль(экв)/100 г. Закономерности изменения показателя в этой закладке более ярко выражены: при суммарных дозах NPK 360-450 кг/га д.в. гидролитическая кислотность увеличилась на 0,9-1,5 ммоль(экв)/100 г относительно исходных данных.

Таблица 4 – Изменение показателя гидролитической кислотности за пять ротаций севооборота, ммоль(экв)/100 г

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	1,6	2,5	0,9	2,5	2,1	-0,4	2,0	2,3	0,3
K ₉₀	2,3	1,1	-1,2	2,0	1,7	-0,3	2,1	1,4	-0,7
P ₉₀	1,8	2,2	0,4	2,2	2,2	0,0	2,0	2,2	0,2
P ₉₀ K ₉₀	2,8	2,4	-0,4	1,1	2,7	1,6	2,0	2,6	0,6
N ₉₀	2,6	2,3	-0,3	3,0	2,6	-0,4	2,8	2,5	-0,3
N ₉₀ K ₉₀	3,0	2,2	-0,8	3,0	2,3	-0,7	3,0	2,2	-0,8
N ₉₀ P ₉₀	2,6	2,1	-0,5	2,8	2,9	0,1	2,7	2,5	-0,2
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	1,8	2,6	0,8	2,7	3,3	0,6	2,2	3,0	0,8
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	3,5	1,5	-2,0	2,8	2,3	-0,5	3,2	1,9	-1,3
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,2	2,4	0,2	3,4	2,8	-0,6	2,8	2,6	-0,2
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	1,8	2,2	0,4	3,4	2,9	-0,5	2,6	2,5	-0,1
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	0,4	1,8	1,4	3,1	2,7	-0,4	1,7	2,3	0,6
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	2,4	2,4	0,0	2,7	3,3	0,6	2,5	2,8	0,3
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,6	3,1	0,5	2,4	3,0	0,6	2,5	3,1	0,6
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	1,6	2,9	1,3	3,4	3,6	0,2	2,5	3,3	0,8
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	1,8	2,4	0,6	2,5	3,4	0,9	2,2	2,9	0,7
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,9	2,4	0,5	2,7	3,0	0,3	2,3	2,7	0,4
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	1,6	2,7	1,1	3,7	3,9	0,2	2,6	3,3	0,7
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,6	2,2	-0,4	1,5	2,9	1,4	2,0	2,6	0,6
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,2	2,8	0,6	2,7	3,8	1,1	2,5	3,3	0,8
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	2,6	3,2	0,6	2,1	3,6	1,5	2,4	3,4	1,0
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,4	1,7	1,3	2,9	4,0	1,1	1,6	2,9	1,3
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,5	3,2	0,7	3,1	4,4	1,3	2,8	3,8	1,0
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	1,3	2,7	1,4	3,1	4,3	1,2	2,2	3,5	1,3
Среднее	2,1	2,4	0,3	2,7	3,1	0,4	2,4	2,7	0,3
V, %	35,2	21,5	–	22,5	23,1	–	16,8	20,2	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

Анализируя усреднённые данные, можно отметить следующую закономерность: варианты в опыте можно разделить на три условные группы. Первая группа (варианты без удобрений – $N_{30}P_{120}K_{30}$, изменение в среднем с 2,5 до закладки до 2,3 ммоль(экв)/100 г на момент отбора образцов), где изменение величины показателя имеет неявный характер; вторая группа (варианты $N_{30}P_{120}K_{120}$ – $N_{60}P_{150}K_{150}$, до закладки в среднем 2,3, в конце 5 ротации 2,9 ммоль(экв)/100 г), где происходило однозначное увеличение величины гидролитической кислотности и третья группа (варианты $N_{150}P_{60}K_{60}$ – $N_{150}P_{150}K_{150}$, до закладки 2,3, в конце 5 ротации 3,3 ммоль(экв)/100 г), где вносились максимальные в опыте дозы азотных удобрений и отмечено наибольшее увеличение показателя. Указанную закономерность подтверждает коэффициент линейной корреляции между общей ежегодной дозой вносимых удобрений и величиной показателя, который составил 0,76 (достоверен при $N=24$ и $p<0,05$). Необходимо также отметить сильное варьирование ($V>20\%$) показателя по обоим закладкам опыта как до закладки опыта, так и в конце 5 ротации, что может быть косвенным свидетельством значительного влияния исходной неоднородности, как это уже было отмечено для pH_{KCl} .

Результаты регрессионного анализа представлены в формулах 6-8, рисунке 5 и приложении Д. Определяющую роль в увеличении гидролитической кислотности играли азотные удобрения, суммарное действие фосфорных и калийных удобрений было несколько меньше. Полученные данные подтверждают сделанное выше предположении о существенном влиянии общей ежегодной дозы минеральных удобрений. Низкий коэффициент детерминации, полученный для уравнения, характеризующего действие удобрений в первой закладке, связан в первую очередь с высокой неоднородностью исходной почвы, что также было описано выше. Наилучшая форма уравнения – форма 0,5-1 степени. Действием удобрений может быть объяснено 71% изменения показателя по опыту. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации удовлетворительная для формул 7 и 8, для формулы 6 – неудовлетворительная.

$$H_{г(1 \text{ закладка})} = 2,00 + 0,149 \times N \quad (R^2=0,26; \varepsilon=17,5 \%) \quad (6)$$

$$H_{г(2 \text{ закладка})} = 1,98 + 0,240 \times N + 0,235 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,83; \varepsilon=7,8 \%) \quad (7)$$

$$H_{г(\text{среднее})} = 1,95 + 0,185 \times N + 0,154 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,70; \varepsilon=9,8 \%) \quad (8)$$

где: H_g – гидролитическая кислотность по двум закладкам опыта и в среднем, ммоль(экв)/100 г;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

2,00, 1,98, 1,95 – теоретическое значение H_g в варианте без применения удобрений;

0,149...0,154 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

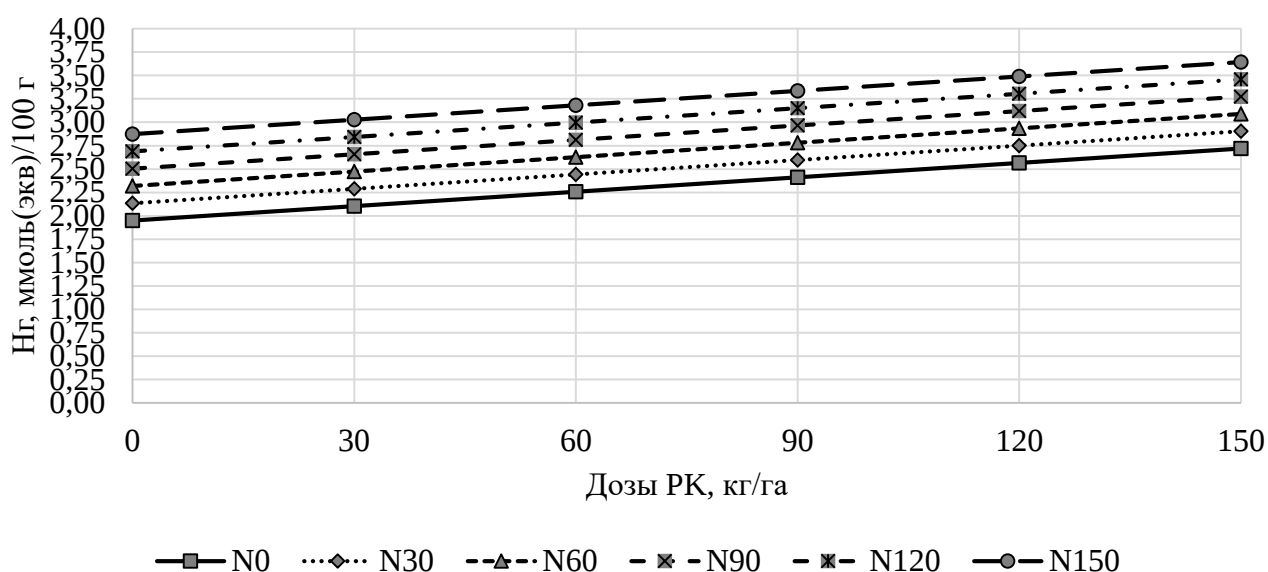


Рисунок 5 – Влияние доз NPK на гидролитическую кислотность (расчётные данные)

Аналогичные результаты по повышению величины гидролитической кислотности под действием азотных и фосфорных удобрений были получены В.В. Окорковым и соавторами (2013, 2021) для серых лесных почв Верхневолжья, однако в отличие от результатов, полученных нами, главенствующая роль отводится именно фосфорным удобрениям. В свою очередь для чернозёма

оподзоленного, для которого было также характерно увеличение гидролитической кислотности под действием азотных удобрений, на существенную роль фосфорных не указано (Иванина, 2012; Плотников, 2019). В работах А.В. Пасынкова и др. (2016) и Т.И. Ивановой (1988) показано, что увеличение гидролитической кислотности дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в факториальных опытах произошло за счёт применения азотных удобрений (0,18 и 0,13 ммоль(экв)/100 г и от единичной ежегодной дозы). Интересно отметить, что в исследованиях А.В. Пасынкова коэффициент детерминации регрессионного уравнения для H_g получился выше, чем для pH_{KCl} (0,67 и 0,51 соответственно), что также прослеживается по результатам наших исследований (0,71 и 0,49).

Трёхмерная карта линий изменения гидролитической кислотности в зависимости от доз азотного удобрения и исходного уровня показателя имела несколько отличные от аналогичной карты линий для pH_{KCl} закономерности (рисунок 6). Коэффициент детерминации для полученной прогнозной модели составил 0,56, в то время как для регрессионного уравнения, описывающего действие удобрений, он составил 0,70. При использовании для построения графика возрастающих доз фосфорных, калийных удобрений и суммарной дозы NPK в зависимости от исходного уровня H_g коэффициенты детерминации составили 0,51, 0,42 и 0,65 соответственно. В связи с этим мы считаем, что исходный уровень показателя оказывал на его изменение за 40 лет меньшее влияние, чем дозы минеральных удобрений.

Графическая прогнозная модель показывает, что при исходном уровне H_g до 1,5 ммоль(экв)/100 г вне зависимости от дозы величина показателя увеличивалась за 40 лет более чем на 1 ммоль(экв)/100 г. Снижение показателя происходило при возделывании культур без применения удобрений и исходном уровне показателя от 2,0 ммоль(экв)/100 г и выше. Наибольшее снижение возможно при величине H_g от 3,5 до 4,0 ммоль(экв)/100 г и дозе азота до 30 кг/га д.в. Прогнозная способность модели удовлетворительная ($\epsilon < 10-15\%$).

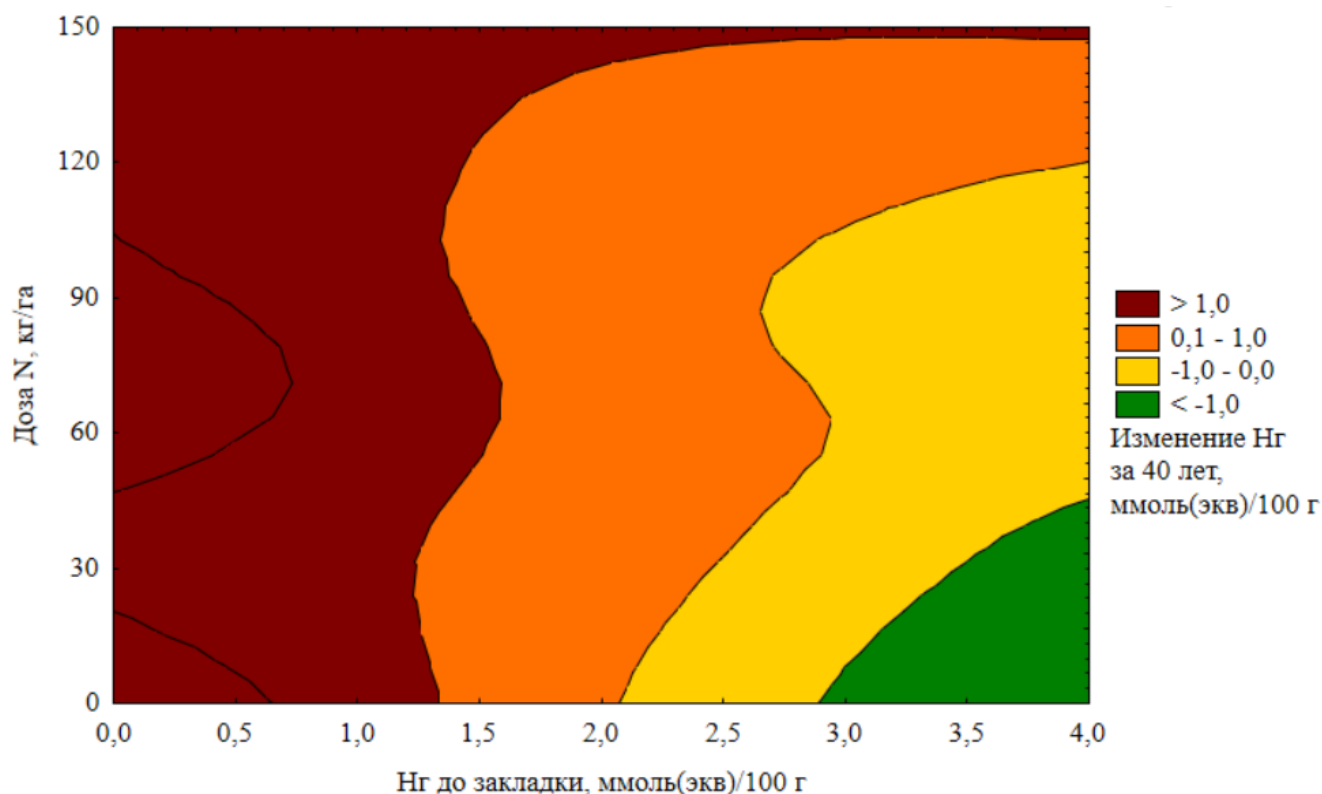


Рисунок 6 – Графическая прогнозная модель уровня изменения Нг к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз азотных удобрений ($N=48$; $R^2=0,56$; $\varepsilon=9,9\%$)

Сумма поглощённых оснований за пять ротаций восьмипольного севооборота уменьшилась в варианте без применения удобрений (таблица 5). В первой закладке опыта снижение было более существенным, чем во второй, однако стоит отметить, что изначальная величина показателя в первой закладке была выше. Величина показателя зафиксировалась на уровне 18 ммоль(экв)/100 г. Ввиду того, что поглощённые в ППК основания в основном представлены катионами кальция и магния, уменьшение показателя может быть связано с вымыванием этих элементов из пахотного слоя и невосполняемым выносом сельскохозяйственными культурами, что показано в результатах исследований Н.В. Семендяевой (2010), С.А. Бельченко (2012), В.Н. Якименко (2019) и коллективной монографии «Лизиметрические исследования...» (2020).

Таблица 5 – Изменение суммы поглощённых оснований за пять ротаций севооборота, ммоль(экв)/100 г

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	20,2	18,0	-2,2	18,1	18,0	-0,1	19,2	18,0	-1,2
K ₉₀	22,3	22,7	0,4	23,4	21,0	-2,4	22,8	21,8	-1,0
P ₉₀	19,8	18,7	-1,1	21,9	18,8	-3,1	20,8	18,8	-2,0
P ₉₀ K ₉₀	18,7	22,2	3,5	20,6	17,1	-3,5	19,7	19,7	0,0
N ₉₀	19,3	19,4	0,1	17,4	18,1	0,7	18,3	18,7	0,4
N ₉₀ K ₉₀	17,7	17,6	-0,1	18,3	17,6	-0,7	18,0	17,6	-0,4
N ₉₀ P ₉₀	18,2	18,6	0,4	17,6	17,1	-0,5	17,9	17,9	0,0
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	20,3	19,4	-0,9	16,9	15,6	-1,3	18,6	17,5	-1,1
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	18,7	22,2	3,5	18,1	17,4	-0,7	18,4	19,8	1,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	19,3	19,3	0,0	19,4	17,1	-2,3	19,3	18,2	-1,1
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	20,3	19,9	-0,4	15,4	16,4	1,0	17,8	18,2	0,4
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	20,6	20,2	-0,4	17,6	18,3	0,7	19,1	19,2	0,1
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	19,8	17,4	-2,4	19,9	19,0	-0,9	19,8	18,2	-1,6
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	18,7	15,8	-2,9	17,6	17,8	0,2	18,2	16,8	-1,4
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	25,2	18,2	-7,0	19,6	18,5	-1,1	22,4	18,4	-4,0
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	21,3	22,4	1,1	18,4	16,7	-1,7	19,8	19,6	-0,2
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	21,2	18,5	-2,7	19,1	20,5	1,4	20,2	19,5	-0,7
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	20,8	17,7	-3,1	17,4	18,4	1,0	19,1	18,0	-1,1
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	21,3	20,6	-0,7	18,9	20,3	1,4	20,1	20,4	0,3
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	18,7	18,6	-0,1	19,6	18,5	-1,1	19,2	18,6	-0,6
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	15,8	12,7	-3,1	18,4	16,0	-2,4	17,1	14,3	-2,8
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	23,7	21,5	-2,2	17,6	15,0	-2,6	20,7	18,3	-2,4
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	19,7	16,6	-3,1	20,6	18,7	-1,9	20,2	17,7	-2,5
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	21,3	17,3	-4,0	16,9	17,7	0,8	19,1	17,5	-1,6
Среднее	20,1	19,0	-1,1	18,7	17,9	-0,8	19,4	18,4	-1,0
V, %	9,7	12,2	–	9,3	8,2	–	7,1	7,6	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

При применении минеральных удобрений в среднем по первой закладке величина показателя снизилась с 20,1 до 19,0 ммоль(экв)/100 г. Наибольшее снижение (на 7 ммоль(экв)/100 г) произошло в варианте N₁₂₀P₁₂₀K₃₀, однако стоит отметить, что в этом варианте отмечена наибольшая величина показателя до закладки опыта. В целом по закладке сложно выявить какую-либо четкую закономерность изменения суммы поглощённых оснований под действием удобрений.

Аналогичная закономерность характерна для второй закладки опыта и в среднем по двум закладкам: при применении минеральных удобрений происходило снижение величины показателя (на 0,8 и 1,0 ммоль(экв)/100 г), однако без видимой закономерности по влиянию отдельных видов и соотношений минеральных удобрений. Коэффициент вариации в отдельности по закладкам и в среднем по двум закладкам не изменялся. Слабая корреляционная связь установлена между текущей величиной показателя и исходными значениями ($r=-0,42$, достоверно при $p<0,05$).

Результаты регрессионного анализа зависимости суммы поглощённых оснований от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений представлены в формулах 9-11 и приложении Е. Стоит отметить несколько отличий данных регрессионных уравнений по сравнению с представленными ранее. Во-первых, влияние разных видов удобрений: если в уравнении 9 основное действие на снижение показателя оказывают азотные удобрения при некотором повышении за счёт внесения калийных удобрений, то для уравнения по второй закладке характерно положительное действие фосфорных удобрений, при негативном влиянии сочетания азотных и калийных. Во-вторых, форма уравнения, наилучшим образом описывающего зависимость величины показателя от действия минеральных удобрений: в первой закладке это форма 0,5-1 степени, во второй 1-2 степени. Третья особенность, характерная для всех трёх уравнений, это достаточно низкие коэффициенты детерминации (0,29-0,39). Данная особенность может быть связана с тем, что на изменение суммы поглощённых оснований в опыте сильное влияние оказывают иные факторы – например, потери кальция при вымывании (Лизиметрические исследования..., 2020).

$$S_{(1 \text{ закладка})} = 18,53 + 2,076 \times K^{0,5} - 1,160 \times NK^{0,5} \quad (R^2=0,29; \varepsilon=7,3 \%) \quad (9)$$

$$S_{(2 \text{ закладка})} = 19,11 - 1,153 \times P + 0,245 \times P^2 - 0,083 \times NK \quad (R^2=0,34; \varepsilon=5,3 \%) \quad (10)$$

$$S_{(\text{среднее})} = 18,37 + 1,285 \times K^{0,5} - 0,817 \times NK^{0,5} \quad (R^2=0,39; \varepsilon=4,5 \%) \quad (11)$$

где: S – сумма поглощённых оснований по двум закладкам опыта и в среднем, ммоль(экв)/100 г;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

18,53, 19,11 18,37 – теоретическое значение S в варианте без применения удобрений;

2,076...0,817 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для формулы 11, для формул 9 и 10 – удовлетворительная.

Визуальное представление регрессионного уравнения 11 представлено на рисунке 7. При применении одних калийных удобрений величина показателя увеличивалась, при применении возрастающих ежегодных доз азота этот эффект уменьшался, а начиная с ежегодной дозы азота 120 кг/га происходило снижение величины суммы поглощённых оснований.

В исследованиях А.В. Пасынкова и др. (2016) было установлено, что по прошествии пяти ротаций на снижение суммы поглощённых оснований оказывали влияние азотные удобрения, но коэффициент детерминации был даже ниже, полученного нами ($R^2=0,104$). Интересно отметить, что в данном исследовании для обменных форм кальция отмечается низкий коэффициент детерминации, для обменных форм магния достоверного уравнения не получено. Можно предположить, что в этом и заключается относительно низкое «качество» полученных нами уравнений, так как основную часть суммы поглощённых оснований составляют именно эти два катиона.

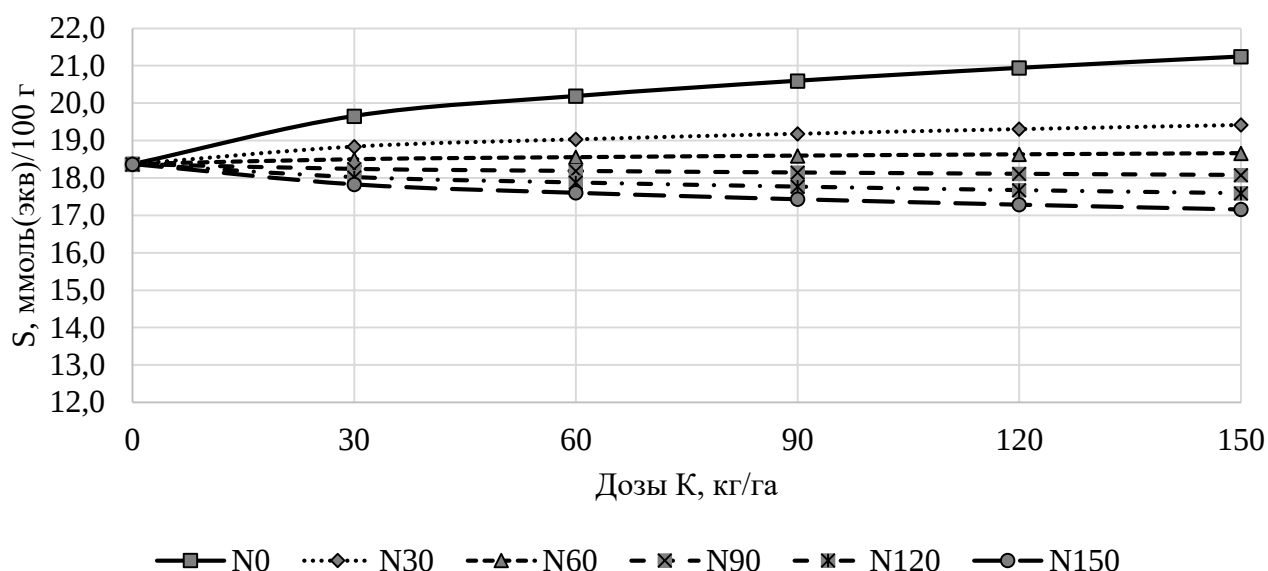


Рисунок 7 – Влияние возрастающих доз N и K на сумму поглощённых оснований (расчётные данные)

Данная закономерность подтверждается результатами лизиметрических опытов в Уральском НИИСХ (Екатеринбург): потери CaO и MgO с инфильтратом в варианте без удобрений составили 42,7 и 9,22 мг/кг, а в варианте с применением $N_{60}P_{60}K_{60}$ 37,2 и 7,04 мг/кг (Лизиметрические исследования..., 2020). Следовательно, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на сумму поглощённых оснований оказало не применение минеральных удобрений, а промывной тип водного режима почвы.

Ёмкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почв основаниями (V) за 40 лет проведения опыта снизились в варианте без применения удобрений на 0,9 ммоль(экв)/100 г и 1,7 % соответственно (таблица 6).

В среднем по вариантам с применением удобрений ЕКО снизилась с 21,8 до 21,2 ммоль(экв)/100 г, степень насыщенности с 89,0 до 87,0 %. Ввиду того, что значения ЕКО были получены расчётным путём на основании гидролитической кислотности и суммы поглощённых оснований, закономерности влияния на показатель изучаемых доз и соотношений удобрений не имеют явного характера. Наибольшее снижение степени насыщенности почв основаниями (на 5,4-7,1 %) происходило при максимальной дозе азотных удобрений (150 кг/га д.в. в год).

Таблица 6 – Изменение ёмкости катионного обмена и степени насыщенности почв основаниями за пять ротаций севооборота, в среднем по двум закладкам

Вариант	ЕКО, ммоль(экв)/100 г			V, %		
	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	21,2	20,3	-0,9	90,4	88,7	-1,7
K ₉₀	25,0	23,2	-1,8	91,5	94,0	2,6
P ₉₀	22,8	21,0	-1,9	91,3	89,5	-1,8
P ₉₀ K ₉₀	21,6	22,2	0,6	91,0	88,3	-2,6
N ₉₀	21,1	21,2	0,0	86,7	88,4	1,7
N ₉₀ K ₉₀	21,0	19,8	-1,2	85,7	88,8	3,1
N ₉₀ P ₉₀	20,6	20,3	-0,3	86,9	87,8	0,9
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	20,8	20,5	-0,4	89,1	85,4	-3,8
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	21,6	21,7	0,1	85,4	91,1	5,7
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	22,1	20,8	-1,4	87,4	87,4	0,0
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	20,4	20,7	0,2	86,9	87,6	0,7
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	20,8	21,5	0,7	91,7	89,5	-2,2
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	22,4	21,0	-1,4	88,7	86,6	-2,1
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	20,7	19,9	-0,8	87,9	84,6	-3,3
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	24,9	21,6	-3,3	89,6	85,0	-4,6
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	22,0	22,5	0,5	90,1	86,7	-3,4
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	22,4	22,2	-0,2	89,8	87,9	-1,9
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	21,7	21,3	-0,4	87,8	84,7	-3,0
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	22,1	23,0	0,9	91,0	88,9	-2,1
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	21,6	21,9	0,3	88,7	85,0	-3,7
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	19,4	17,7	-1,7	87,8	80,7	-7,1
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	22,3	21,1	-1,2	92,2	85,8	-6,4
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	22,9	21,4	-1,5	87,9	82,5	-5,4
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	21,3	21,0	-0,3	89,4	83,5	-5,9
Среднее	21,8	21,2	-0,6	89,0	87,0	-2,0
V, %	5,9	5,4	–	2,2	3,2	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

Проведенный регрессионный анализ показал, что основной вклад в снижение обоих показателей вносили азотные удобрения (формулы 12, 13, приложение Ж). Коэффициент регрессии уравнения для ЕКО был относительно низким, в то время как изменение степени насыщенности почв основаниями может быть на 65 % объяснено влиянием доз NPK. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для обоих регрессионных уравнений.

$$EKO = 21,45 - 0,112 \times N^2 + 0,107 \times NP \quad (R^2=0,35; \varepsilon=3,6 \%) \quad (12)$$

$$V = 90,85 - 1,089 \times N - 0,527 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,65; \varepsilon=1,6 \%) \quad (13)$$

где: ЕКО, V– значение ёмкости катионного обмена (ммоль(экв)/100 г) и степени насыщенности почв основаниями (%) в среднем по двум закладкам опыта;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

21,45, 90,85 – теоретическое значение ЕКО и V в варианте без применения удобрений;

0,112...0,527 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

Графическое представление формул 12 и 13 представлено на рисунке 8. При одностороннем применении азотных удобрений величина ЕКО снижалась. Фосфорные удобрения нивелировали этот эффект и в вариантах, где дозы фосфора были выше доз азота, приводили к увеличению величины показателя относительно контроля. Степень насыщенности почв основаниями уменьшалась как под действием фосфорно-калийных удобрений, так и (в большей степени) под действием азотных удобрений. Наибольшее снижение показателя происходило под действием полного минерального уравнивания.

Снижение степени насыщенности почв основаниями под действием азотных удобрений отмечено в работах А.В. Пасынкова и соавторов (2016) и Т.И. Ивановой (1988). На снижение ЕКО в варианте без удобрений и при применении NPK в дозе 120 кг/га относительно исходного уровня указывает Н.В. Семендяева (2010). В связи с тем, что оба показателя получены расчётным путём, закономерно, что полученные регрессионные уравнения схожи с теми, которые получены для Нг и S. Поэтому мы предполагаем, что основное влияние на изменение показателей оказывало вымывание из пахотного слоя катионов Ca и Mg (в большей степени

для ЕКО и в меньшей степени для V), что подтверждается коэффициентами детерминации регрессионных уравнений.

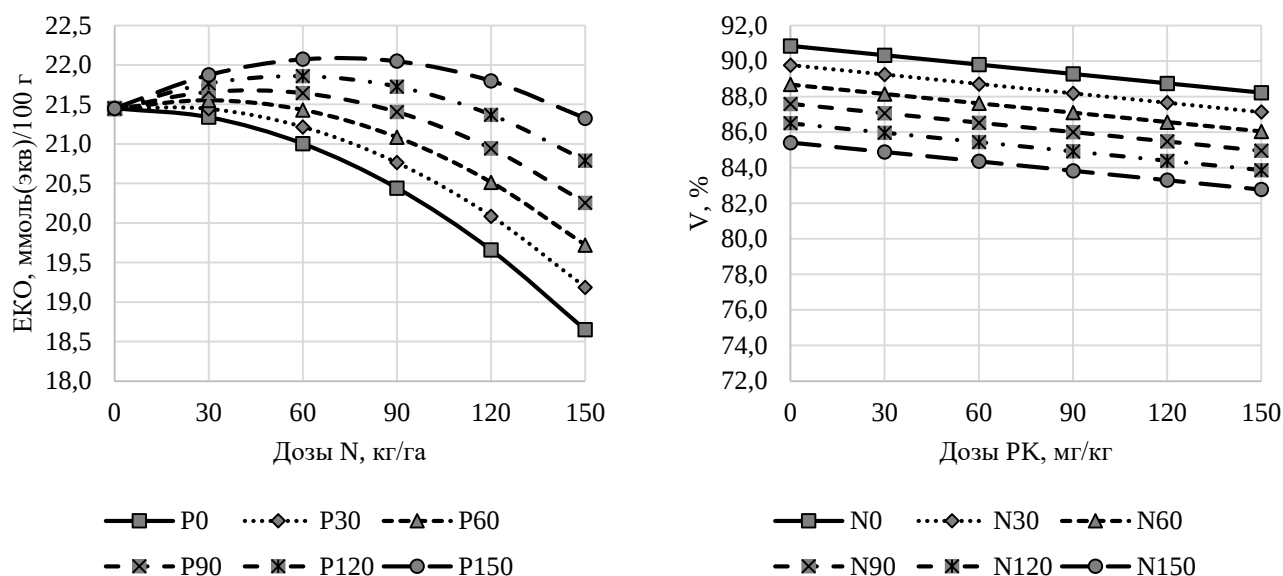


Рисунок 8 – Влияние возрастающих доз NPK на ёмкость катионного обмена и степень насыщенности почв основаниями (расчётные данные)

3.2 Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание гумуса в почве

Содержание гумуса в почве является важнейшим показателем, характеризующим устойчивость агроэкосистемы во времени и естественное плодородие почвы. Результаты, полученные нами, показывают, что в варианте без удобрений в первой закладке произошло значительное увеличение содержания гумуса за 40 лет исследований, в то время как для второй закладки был характерен обратный процесс (снижение содержания) (таблица 7). Интересно отметить, что среднее содержание гумуса по опыту за пять ротаций 8-польного севооборота в первой закладке также увеличилось, хотя во второй закладке, где изначальное содержание гумуса было выше, среднее значение по опыту не изменилось. Среди вариантов с минеральными удобрениями стоит отметить $N_{150}P_{150}K_{60}$ и $N_{150}P_{150}K_{150}$, в которых отмечается увеличение содержания гумуса как отдельно по закладкам, так и в среднем по двум закладкам на 0,14-0,22 %.

Таблица 7 – Изменение содержания гумуса за пять ротаций севооборота, %

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	1,61	2,03	0,42	2,15	1,98	-0,17	1,88	2,00	0,12
K ₉₀	1,62	2,01	0,39	2,20	2,25	0,05	1,91	2,13	0,22
P ₉₀	1,92	1,91	-0,01	1,98	2,05	0,07	1,95	1,98	0,03
P ₉₀ K ₉₀	1,84	1,85	0,01	2,14	2,12	-0,02	1,99	1,98	-0,01
N ₉₀	1,62	2,06	0,42	2,15	2,10	-0,05	1,89	2,08	0,19
N ₉₀ K ₉₀	1,73	1,95	0,22	2,15	2,09	-0,06	1,94	2,02	0,08
N ₉₀ P ₉₀	1,59	1,92	0,33	2,24	2,17	-0,07	1,92	2,04	0,12
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	2,13	2,05	-0,08	2,17	2,22	0,05	2,15	2,13	-0,02
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	1,71	1,74	0,02	2,00	2,21	0,21	1,85	1,97	0,12
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,19	1,89	-0,30	2,23	2,08	-0,15	2,21	1,99	-0,22
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	1,90	1,93	0,03	2,16	2,22	0,06	2,03	2,07	0,04
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	1,83	1,96	0,13	2,18	2,20	0,02	2,00	2,08	0,08
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	1,77	1,82	0,05	2,35	2,37	0,02	2,06	2,09	0,03
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	1,82	1,96	0,13	2,12	2,12	0,00	1,97	2,04	0,07
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,11	1,87	-0,24	2,15	2,27	0,12	2,13	2,07	-0,06
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	1,91	1,90	-0,01	2,06	2,14	0,08	1,98	2,02	0,04
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,82	1,91	0,09	2,11	2,28	0,17	1,97	2,09	0,12
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	1,63	1,97	0,34	2,18	2,19	0,01	1,90	2,08	0,18
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	1,65	1,84	0,19	2,13	2,18	0,05	1,89	2,01	0,12
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	1,84	1,95	0,11	2,26	2,25	-0,01	2,05	2,10	0,05
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	1,64	1,75	0,11	2,08	2,18	0,10	1,86	1,96	0,11
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	2,09	2,06	-0,04	2,30	2,31	0,01	2,20	2,18	-0,02
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	1,82	1,96	0,14	2,02	2,24	0,22	1,92	2,10	0,18
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	1,89	2,03	0,14	2,08	2,26	0,18	1,99	2,15	0,16
Среднее	1,82	1,93	0,11	2,15	2,19	0,04	1,99	2,06	0,07
V, %	9,7	4,6	–	4,2	4,1	–	5,2	2,9	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

В исследованиях Н.Е. Завьяловой и соавторов (2019, 2021) показано, что содержание гумуса в целинной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве злаково-разнотравного луга стабилизировалось на уровне 2,2 %, что авторы считают естественным уровнем для данного типа и разновидности почвы в центральном регионе Пермского края. По результатам наших исследований можно сделать предположение, что при изначально низком содержании гумуса (1,6-1,7 % в первой закладке) оно возрастает до близких к целинным почвам значений на

уровне 1,8-2,2 %. Например, в первой закладке в вариантах без применения удобрений и K_{90} содержание гумуса увеличилось с 1,61-1,62 % до 2,03-2,01 %, в то время как во второй закладке величина показателя в варианте без удобрений уменьшилась (с 2,15 до 1,98 %), а в варианте с внесением K_{90} осталась на исходном уровне (2,20 % до закладки и 2,25 % в конце пятой ротации). Данные закономерности были отмечены только для первой закладки опыта где выше коэффициент вариации исходных данных и, как уже было сказано, более низкое среднее содержание гумуса до закладки опыта.

Исследований, где отмечается повышение исходного низкого уровня содержания гумуса до естественных зональных значений, достаточно мало. Наиболее показательны в этом плане исследования В.А. Романенкова (2019), который указывает, что в длительном полевом опыте 4 ДАОС (Долгопрудной агрохимической опытной станции) после распашки лесного участка в течение первых 20 лет происходило падение запасов углерода почвы как в вариантах с внесением удобрений, так и в контрольном варианте. В дальнейшем наблюдалось восстановление запасов углерода во всех вариантах опыта, в том числе в контрольном варианте до исходного уровня. Автор считает, что снижение содержания углерода после распашки происходило за счёт последовательного уменьшения содержания его лабильных фракций, а восстановление было следствием накопления в пашне специфического органического вещества при постоянстве запасов лабильных фракций. Исследованиями Н.Е. Завьяловой (2014), установлено что минимальное содержание гумуса в дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах региона находится на уровне 1,34 %, что достаточно близко к исходным значениям в некоторых вариантах первой закладки опыта. В связи с этим мы считаем, что закономерности, отмеченные В.А. Романенковым, могут быть характерны и для данного опыта.

Результаты регрессионного анализа зависимости содержания гумуса от применяемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений представлены в формулах 14-16 и приложении 3. В первой закладке опыта достоверное влияние на изменение содержания гумуса оказывали фосфорные и

калийные удобрения. Во второй закладке опыта увеличение показателя происходило за счёт применения азотных и фосфорных удобрений. В среднем по двум закладкам достоверный коэффициент регрессии был получен только для калийных удобрений, однако стоит отметить, что по данному уравнению только 19 % изменения содержания гумуса можно объяснить действием калийных удобрений. В этом случае, несмотря на то, что уравнение получилось математически достоверным, использование его для однозначного вывода не представляется возможным. Поэтому мы считаем, что изменение содержания гумуса под действием изучаемых в опыте средств химизации стоит считать недоказанным. Несмотря на вышеуказанное, точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений, что на наш взгляд связано с невысокой изменчивостью показателя по вариантам опыта.

$$\text{Гумус}_{(1 \text{ закладка})} = 2,03 - 0,163 \times P^{0,5} + 0,062 \times P - 0,186 \times K^{0,5} + 0,094 \times K \quad (R^2=0,54; \varepsilon=2,40 \%) \quad (14)$$

$$\text{Гумус}_{(2 \text{ закладка})} = 2,12 + 0,031 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,30; \varepsilon=2,6 \%) \quad (15)$$

$$\text{Гумус}_{(\text{среднее})} = 2,03 + 0,003 \times K^2 \quad (R^2=0,19; \varepsilon=2,3 \%) \quad (16)$$

где: Гумус – содержание гумуса в среднем по двум закладкам опыта и в среднем, %;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

2,03, 2,21, 2,03 – теоретическое содержание гумуса в варианте без применения удобрений;

0,163...0,003 – коэффициент регрессии, характеризующий действие удобрений

Указанная выше закономерность подтверждается значениями коэффициентов корреляции по Пирсону и Спирмену (таблица 8). Между

изменением содержания гумуса и его исходным содержанием выявлена обратная связь, теснота связи по шкале Чеддока высокая. Стоит отдельно отметить, что $r_{\text{Пирсон}} > r_{\text{Спирмен}}$, что может указывать на линейный характер зависимости показателей.

Таблица 8 – Корреляционная связь изменения содержания гумуса с дозами минеральных удобрений и значениями показателя до закладки опыта (N=24, $p < 0,05$)

Показатель	Содержание гумуса до закладки опыта	Дозы минеральных удобрений			
		N	P	K	NPK
Изменение содержания гумуса за 5 ротаций севооборота	$r_{\text{Пирсон}}$				
	-0,82	0,06	-0,07	-0,18	-0,09
	$r_{\text{Спирмен}}$				
	-0,76	0,01	-0,16	-0,15	-0,16

А.М. Лыков и соавторы (2004) отмечают, что минеральные удобрения не оказывают существенного влияния на изменение содержания гумуса в почвах Нечернозёмной зоны, они стабилизируют его на одном уровне, что соответствует полученным нами данным. Аналогичные данные приводят В.В. Лапа и Н.Н. Ивахненко (2017), Г.П. Гамзиков (2018), В.Г. Сычев (2018), М. Studnicki et al. (2021), Н.Е. Завьялова (2022) и многие другие. Именно в связи с этим регрессионные уравнения, полученные нами в результате проведённых исследований, отличаются таким условно низким качеством. С.М. Лукин (2009) указывает, что на лёгких дерново-подзолистых почвах равновесное содержание гумуса устанавливается в течение 8-10 лет. В связи с этим, полученные нами данные могут быть свидетельством стабилизации содержания гумуса, что выражается в наличии во всех трех уравнениях разных удобрений и сочетаний, а также в отличающейся друг от друга закономерности их действия.

Одной из причин увеличения содержания гумуса может являться то, что с 2013 года солома с поля не отчуждалась. В таблице 9 представлен баланс гумуса в среднем по двум закладкам полевого опыта в среднем за 1-4 ротации и за 5 ротацию севооборота. Полученные данные показывают, что положительный

баланс гумуса в среднем за 1-4 ротации был получен только при внесении 120-150 кг/га азота (за исключением варианта $N_{120}P_{30}K_{120}$). Баланс гумуса при внесении указанных доз изменялся от -0,04 до 1,53 т/га, по остальным вариантам опыта он изменялся от -0,93 до -3,55 т/га. Данная закономерность связана с тем, что при внесении высоких доз азотных удобрений урожайность зерновых культур увеличивается незначительно. Начиная с пятой ротации севооборота солома с поля не отчуждается, что позволило получить положительный баланс гумуса по всем вариантам, представленным в опыте

Разница по минерализации гумуса в среднем за 1-4 ротации и 5 ротации связана с тем, что в первом случае учитывался вынос азота как основной, так и побочной продукции, а в балансе за пятую ротацию только вынос азота основной продукцией. По этой же причине при внесении азотных удобрений в дозе 150 кг/га минерализация гумуса не происходила – культурам севооборота было достаточно азота на формирование основной продукции за счёт внесения с удобрениями и минерализации почвенных запасов не происходило.

Таблица 9 – Баланс гумуса в среднем по двум закладкам полевого опыта, т/га

Вариант	В среднем за 1-4 ротации (1978-2009 и 1980-2011 гг.)						За 5 ротацию (2010-2017 и 2012-2019 гг.)					
	Минерализация	Солома		ПКО		Баланс	Минерализация	Солома		ПКО		Баланс
		выход	гумификация	выход	гумификация			выход	гумификация	выход	гумификация	
Без удобрений	6,0	15,2	–	20,7	3,3	-2,77	4,4	17,6	4,4	20,4	3,2	3,19
K ₉₀	6,8	16,3	–	21,1	3,3	-3,42	4,8	17,3	4,3	21,1	3,3	2,79
P ₉₀	6,2	16,2	–	20,9	3,3	-2,91	4,5	17,7	4,4	20,9	3,3	3,16
P ₉₀ K ₉₀	6,9	16,7	–	21,6	3,4	-3,55	5,0	18,6	4,6	21,5	3,4	3,01
N ₉₀	4,5	17,5	–	22,2	3,5	-1,00	1,9	18,5	4,6	21,5	3,4	6,10
N ₉₀ K ₉₀	4,4	17,3	–	22,1	3,4	-0,93	1,6	19,2	4,8	21,2	3,3	6,48
N ₉₀ P ₉₀	4,4	16,8	–	21,6	3,4	-1,03	1,7	18,8	4,7	21,3	3,3	6,31
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	4,5	18,0	–	22,3	3,5	-1,05	2,5	21,9	5,5	22,3	3,5	6,41
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6,6	17,7	–	21,7	3,4	-3,19	3,7	17,5	4,4	20,9	3,3	4,00
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	6,1	17,4	–	21,9	3,4	-2,70	3,6	16,3	4,1	21,1	3,3	3,79
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	6,6	17,3	–	22,5	3,5	-3,08	3,5	15,8	4,0	20,9	3,3	3,74
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	7,0	19,1	–	22,8	3,6	-3,42	3,7	16,8	4,2	21,3	3,3	3,88
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	2,5	16,2	–	21,5	3,3	0,85	0,9	22,0	5,5	21,4	3,3	8,00
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	3,4	17,9	–	21,8	3,4	-0,04	0,9	19,0	4,8	21,8	3,4	7,26
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,8	17,2	–	21,9	3,4	0,62	1,2	22,2	5,5	21,6	3,4	7,74
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	3,4	17,5	–	22,0	3,4	0,05	1,3	22,5	5,6	22,0	3,4	7,70
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	5,6	18,8	–	22,7	3,5	-2,09	3,3	19,4	4,8	22,4	3,5	5,01
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	5,4	17,1	–	22,3	3,5	-1,89	3,3	20,0	5,0	22,2	3,5	5,18
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	5,8	18,4	–	22,2	3,5	-2,33	2,9	18,5	4,6	21,3	3,3	5,05
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	6,0	18,9	–	22,4	3,5	-2,54	3,7	20,7	5,2	21,9	3,4	4,91
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	2,6	19,0	–	22,1	3,4	0,84	–	19,5	4,9	21,4	3,4	8,55
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	1,9	17,4	–	22,0	3,4	1,53	–	20,8	5,2	22,2	3,4	8,66
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,1	17,7	–	22,0	3,4	1,32	–	20,9	5,2	21,6	3,4	8,90
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,6	18,2	–	22,1	3,4	0,82	–	21,4	5,4	22,4	3,5	8,93

3.3 Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание подвижных форм фосфора и калия в почве

Содержание подвижного фосфора в почве является характеристикой того, насколько растения будут обеспечены этим важным элементом питания в течение срока вегетации. При длительном возделывании культур севооборота без применения минеральных удобрений в опыте было отмечено снижение содержания подвижного фосфора относительно исходных значений по обоим закладкам опыта (таблица 10). В среднем по двум закладкам снижение фосфора составило 18 % по сравнению с исходными значениями. Выявленная нами закономерность отмечается многими авторами как для лёгких (Малявко и др., 2010; Лапа, Ивахненко, 2012; Чеботарев и др., 2018; Мезенцева и др., 2022), так и для более тяжелых (Сычев, Кирпичников, 2009; Митрофанова, 2015) по гранулометрическому составу почв. Снижение на лёгких почвах, указанное в вышеобозначенных работах, составило 17-26 % за разный период времени (от 20 до 39 лет), на тяжёлых на 15-31 % (в первом случае за 20 лет, во втором случае срок не указан).

При внесении минеральных удобрений содержание подвижного фосфора в среднем по опыту увеличилось в первой закладке в 1,9 раз (с 158 до 307 мг/кг), во второй закладке в 1,5 раз (с 200 до 305 мг/кг). Увеличение произошло при внесении фосфорных удобрений. При дозе фосфорных удобрений 30 кг/га и различных дозах азота и калия содержание фосфора в почве возросло на 49-106 мг/кг в первой закладке и на 24-115 мг/кг во второй закладке. Наименьшее увеличение происходило при соотношении фосфора к азоту 1:4. Увеличение содержания подвижного фосфора в первой закладке произошло в вариантах, где фосфорные удобрения не вносили (например, в варианте $N_{90}K_{90}$ содержание увеличилось на 96 мг/кг), что может быть следствием аналитической ошибки при определении в почвенных образцах, отобранных до закладки опыта. Данный факт подтверждает то, что в этом же варианте во второй закладке опыта происходит снижение содержания фосфора.

Таблица 10 – Изменение содержания подвижных форм фосфора за 5 ротаций севооборота, мг/кг

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	251	197	-54	243	207	-35	247	202	-45
K ₉₀	139	153	14	235	260	25	187	206	20
P ₉₀	109	362	253	165	297	132	137	330	193
P ₉₀ K ₉₀	231	426	195	160	331	170	196	378	183
N ₉₀	139	135	-4	230	215	-15	184	175	-9
N ₉₀ K ₉₀	91	187	96	253	207	-46	172	197	25
N ₉₀ P ₉₀	131	325	194	230	344	114	181	335	154
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	149	299	150	215	327	113	182	313	131
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	91	167	76	170	242	72	131	205	74
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	109	215	106	160	274	115	134	245	110
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	189	367	178	145	325	181	167	346	179
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	181	405	224	170	378	208	176	392	216
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	189	238	49	182	226	43	186	232	46
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	181	245	64	215	239	24	198	242	44
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	161	384	223	135	391	256	148	388	239
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	169	367	198	198	357	159	184	362	178
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	91	236	145	160	253	93	126	244	119
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	159	228	69	200	245	45	179	237	57
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	199	456	257	288	395	107	243	425	182
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	201	382	181	265	388	123	233	385	152
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	179	257	78	242	338	96	211	298	87
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	131	283	152	145	234	89	138	259	120
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	201	397	196	278	397	120	239	397	158
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	214	553	339	170	354	184	192	453	262
Среднее	162	303	141	202	301	99	182	302	120
V, %	27,7	35,6	–	22,4	22,1	–	19,4	27,6	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

Наряду с вариантами без применения минеральных удобрений, тенденция к снижению содержания фосфора наблюдается в вариантах, где внесение азотных удобрений не сопровождается применением фосфорных. Как указывает Т.И. Иванова (1988), содержание подвижного фосфора является наиболее стабильным показателем почвенного плодородия и в меньшей степени изменяется при отсутствии фосфорных удобрений. Возможно, содержание подвижного фосфора на уровне 170-200 мг/кг в исследуемой почве будет являться минимальным

уровнем, ниже которого снижение даже при интенсивном использовании не происходит. Между исходным содержанием фосфора и изменением его за 5 ротаций севооборота во второй закладке обнаружена обратная умеренная связь ($r=-0,49$, достоверно при $p<0,05$), для первой закладки и для значений в среднем по двум закладкам такая связь не обнаружена. Варьирование признака как до закладки, так и после 40 лет проведения опыта сильное ($V>20\%$).

Результаты регрессионного анализа представлены в формулах 17-19 и приложении И. Достоверное увеличение содержания подвижного фосфора в почве произошло за счёт применения фосфорных удобрений. Применение азотных удобрений как совместно с фосфорными, так и отдельно снижало содержание элемента в почве. Действием минеральных удобрений можно объяснить 94 % изменения показателя в опыте. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации удовлетворительная для всех регрессионных уравнений.

$$P_2O_5 \text{ (1 закладка)} = 196,71 - 101,688 \times N^{0,5} + 40,431 \times N + 58,776 \times P \quad (17)$$

$$(R^2=0,89; \varepsilon=9,6 \%)$$

$$P_2O_5 \text{ (2 закладка)} = 192,14 + 3,496 \times N^2 + 35,484 \times P +$$

$$+15,020 \times K - 7,148 \times NK \quad (R^2=0,92; \varepsilon=5,3 \%) \quad (18)$$

$$P_2O_5 \text{ (средняя)} = 208,79 - 56,849 \times N^{0,5} + 22,039 \times N + 46,980 \times P \quad (19)$$

$$(R^2=0,94; \varepsilon=5,74 \%)$$

где: P_2O_5 – содержание подвижного фосфора по двум закладкам опыта и в среднем, мг/кг;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

196,71, 192,14, 208,79 – теоретическое содержание P_2O_5 в варианте без применения удобрений;

101,688...46,980 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

На рисунке 9 представлено рассчитанное по формуле 19 содержание подвижного фосфора при различных дозах фосфора и азота. Действие азотных удобрений по полученному регрессионному уравнению возможно рассматривать только до дозы 60 кг N/га, поскольку после этой дозы за счёт наличия в уравнении доказанного действия азота как в 0,5, так и в 1 степени, содержание подвижного фосфора в почве начинает возрастать.

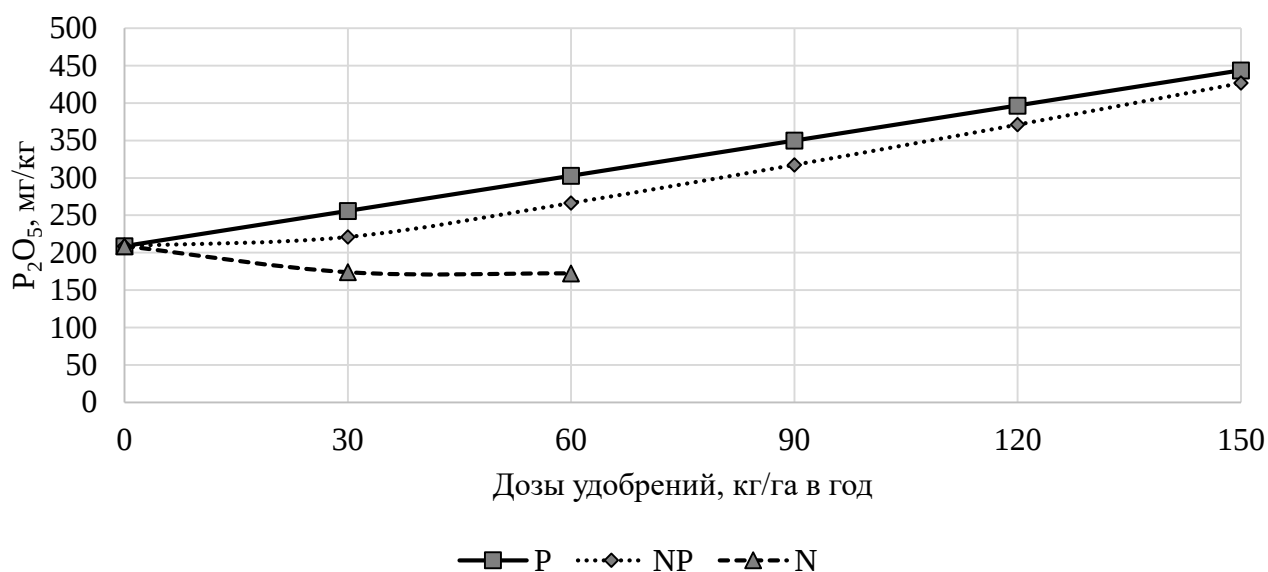


Рисунок 9 – Влияние доз фосфорных и азотных удобрений на содержание подвижного фосфора в почве (расчётные данные)

Увеличение содержание подвижного фосфора под действием фосфорных удобрений вполне закономерно и отражено в большом количестве научных работ, что показано в монографии В.Г. Сычева и Н.А. Кирпичникова (2009), где описаны результаты исследований, проведённых в рамках Географической сети опытов под руководством ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. В исследованиях Т.И. Ивановой (1989) показано, что увеличение содержания фосфора на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве происходило по полиному 1-2 степени, то есть при увеличении дозы фосфорных удобрений эффективность их возрастала. В исследованиях А.В. Пасынкова и др. (2016), наоборот, установлено затухающее (после 4 ротации севооборота) и линейное (после 5 и 6 ротаций) действие возрастающих доз, что получено и в результате проведённых нами исследований.

Снижение содержания подвижного фосфора при применении азотных удобрений отмечается в исследованиях Л.Д. Варламовой и В.В. Нефедьевой (2014), А.В. Пасынкова и др. (2016). Линейный вид регрессионного уравнения показывает, что при применении возрастающих доз фосфорных удобрений их эффективность по увеличению содержания подвижных форм элемента в почве не затухает, что также показано в исследованиях Ф.А. Попова и др. (2018).

При построении трёхмерной карты линий изменения содержания подвижного фосфора в зависимости от доз фосфорного удобрения и исходного уровня показателя коэффициент детерминации составил 0,56, что меньше, чем для регрессионного уравнения описывающего действие минеральных удобрений ($R^2=0,94$) (рисунок 10). Можно предположить, что изменение показателя по вариантам опыта зависело от исходного уровня показателя, в меньшей степени чем от действия удобрений.

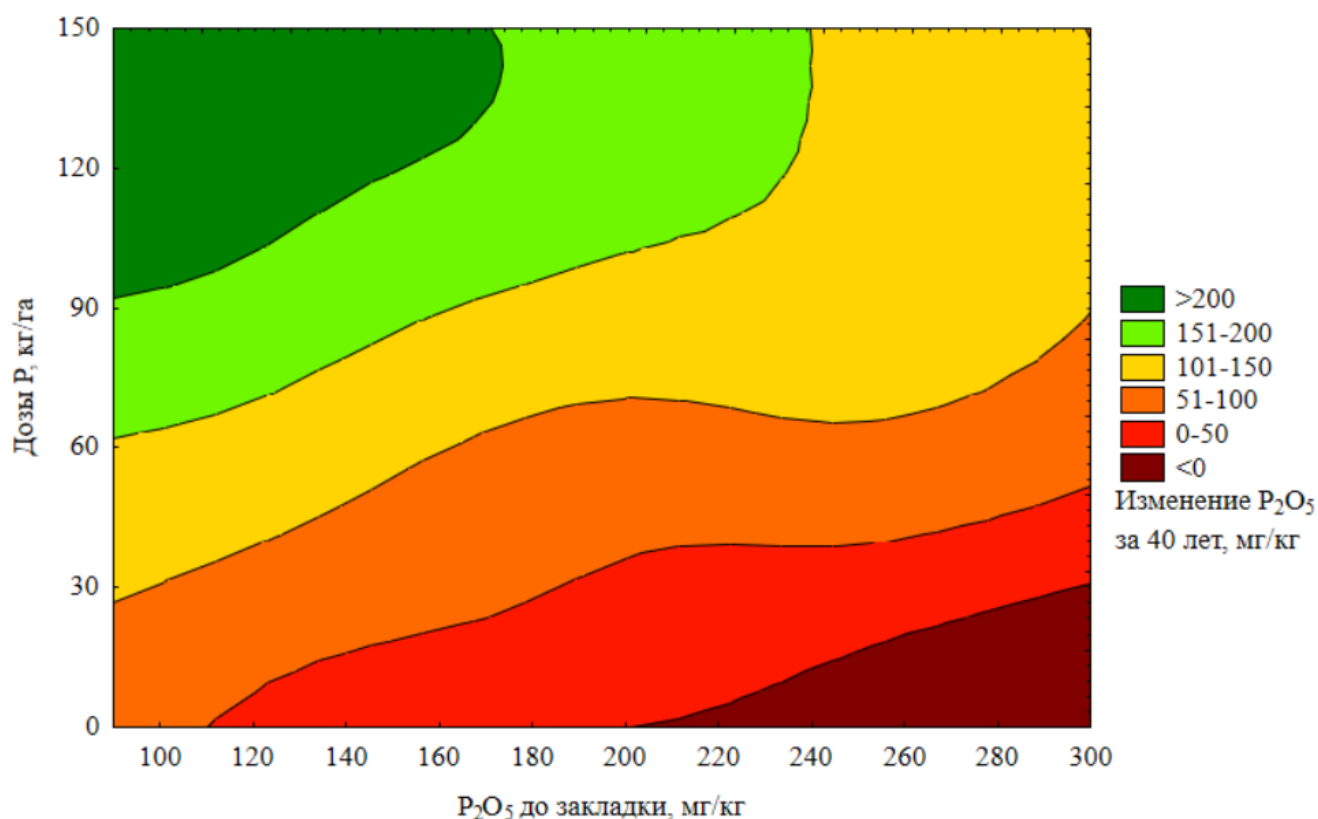


Рисунок 10 – Графическая прогнозная модель уровня изменения P_2O_5 к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз фосфорных удобрений ($N=48$; $R^2=0,56$; $\varepsilon=3,0\%$)

Снижение содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве происходило при исходном уровне от 220 до 300 мг/кг без применения фосфорных удобрений. Наибольшее увеличение содержания (>200 мг/кг) отмечается при исходном уровне 100-120 мг/кг и дозе фосфорных удобрений 90-150 кг/га д.в. Графическая модель позволяет прогнозировать изменение показателя на высоком уровне ($\varepsilon < 5\%$).

Снижение содержания подвижного калия в почве в варианте без применения удобрений происходило более интенсивно, чем подвижного фосфора: в среднем по опыту оно снизилось на 27 %, отдельно по закладкам на 35 и 16 % соответственно (таблица 11). Наибольшее снижение отмечено в вариантах с более высоким содержанием до закладки опыта. Снижение содержания калия при возделывании сельскохозяйственных культур без применения удобрений отмечается многими авторами (Иванова, 1988; Малявко и др., 2010; Афанасьев, Мерзлая, 2013б; Воробьев, 2016; Никитина, 2018; Якименко, 2019).

При применении удобрений содержание в среднем по всем делянкам увеличилось. В первой закладке увеличение составило 21 % (с 178 до 214 мг/кг), во второй – 50 % (с 140 до 209 мг/кг), в среднем по двум закладкам 33 % (с 159 до 212 мг/кг). По сравнению с содержанием фосфора, содержание калия было чаще подвержено стагнации на исходном уровне или снижению. Стагнация отмечается при низких дозах внесения калийных удобрений, например, в вариантах $N_{30}P_{30}K_{30}$, $N_{30}P_{120}K_{30}$, $N_{60}P_{60}K_{60}$ и некоторых других. Снижение на 16-18 % (26-27 мг/кг) отмечено в вариантах с применением азотных удобрений N_{90} (на 26 мг/кг) и $N_{90}P_{90}$ (на 27 мг/кг).

Интересно отметить, что о достижении минимального содержания подвижного калия говорить ещё рано: так, в варианте с применением N_{90} в первой закладке содержание элемента в почве достигло 140 мг/кг, в то время как во второй закладке, где исходное содержание было ниже, текущее содержание составляет 111 мг/кг. Достоверной связи между изменением содержания подвижного калия и его содержанием до закладки опыта не выявлено.

Коэффициент вариации по всем закладкам и в среднем по двум закладкам за 40 лет проведения опыта увеличился.

Таблица 11 – Изменение содержания подвижных форм калия за 5 ротаций севооборота, мг/кг

Вариант	I закладка			II закладка			Среднее		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без удобрений	219	142	-77	172	144	-28	196	143	-53
K ₉₀	168	235	67	135	266	131	152	251	99
P ₉₀	153	135	-18	150	155	5	152	145	-7
P ₉₀ K ₉₀	174	284	110	152	276	124	163	280	117
N ₉₀	168	140	-28	133	111	-22	150	126	-26
N ₉₀ K ₉₀	174	235	61	115	208	93	144	221	77
N ₉₀ P ₉₀	164	127	-37	122	104	-18	143	116	-27
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	206	240	34	153	217	64	179	229	50
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	174	140	-34	120	144	24	147	142	-5
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	176	250	74	135	215	79	156	233	77
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	226	204	-22	135	158	23	181	181	0
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	94	196	102	162	261	99	128	228	100
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	168	186	18	138	165	27	153	176	23
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	174	258	84	155	213	58	164	236	72
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	174	197	23	130	151	21	152	174	22
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	161	190	29	155	266	111	158	228	70
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	214	204	-10	162	196	34	188	200	12
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	161	225	64	128	229	101	144	227	83
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	161	209	48	135	187	52	148	198	50
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	184	247	63	122	287	165	153	267	114
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	216	213	-3	140	185	45	178	199	21
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	244	301	57	182	335	153	213	318	105
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	164	206	42	107	166	59	136	186	50
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	188	306	118	160	331	171	174	319	145
Среднее	179	211	32	142	207	65	161	209	48
V, %	17,0	24,0	–	13,3	30,9	–	12,6	26,3	–

Примечание – 1 – До закладки, 2 – Конец 5 ротации, 3 – Изменение, V, % – коэффициент вариации

Содержания подвижного калия в почве через 40 лет проведения опыта зависело от применения калийных и азотных удобрений (формулы 20-22, приложение К). Увеличение содержания элемента происходило за счёт внесения калийных удобрений, применение азотных удобрений вызывало снижение его

содержания. Действием минеральных удобрений может быть объяснено 79-88 % изменчивости показателя по вариантам опыта. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации удовлетворительная для всех регрессионных уравнений.

$$K_2O_{(1 \text{ закладка})} = 147,78 - 61,822 \times N^{0,5} + 27,274 \times N + 58,445 \times K^{0,5} \quad (R^2=0,79; \varepsilon=9,1 \%) \quad (20)$$

$$K_2O_{(2 \text{ закладка})} = 158,66 - 84,496 \times N^{0,5} + 31,865 \times N + 34,721 \times K \quad (R^2=0,89; \varepsilon=7,7 \%) \quad (21)$$

$$K_2O_{(\text{среднее})} = 158,66 - 84,496 \times N^{0,5} + 31,865 \times N + 34,721 \times K \quad (R^2=0,88; \varepsilon=9,0 \%) \quad (22)$$

где: K_2O – содержание подвижного калия по двум закладкам опыта и в среднем, мг/кг;

K , N – дозы калийных и азотных удобрений в кодированном виде – количество ежегодных единичных доз;

147,78, 158,66, 158,66 – теоретическое содержание K_2O в варианте без применения удобрений;

61,822...34,721 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

Визуальное представление формулы 22 показало, что, как и для подвижного фосфора, влияние на содержание подвижного калия азотных удобрений возможно рассматривать только до ежегодной дозы 60 кг/га (рисунок 11). При дальнейшем увеличении доз негативный эффект, полученный в регрессионном уравнении от $N^{0,5}$, нивелирует эффект, полученный от N , и содержание подвижного калия начинает увеличиваться. При рассмотрении равных доз азота и калия вышеуказанной закономерности не обнаружено. При применении максимальной ежегодной дозы калия 150 кг/га содержание калия в почве устанавливается на более высоком уровне, чем при совместном применении азота и калия в этой же дозе.

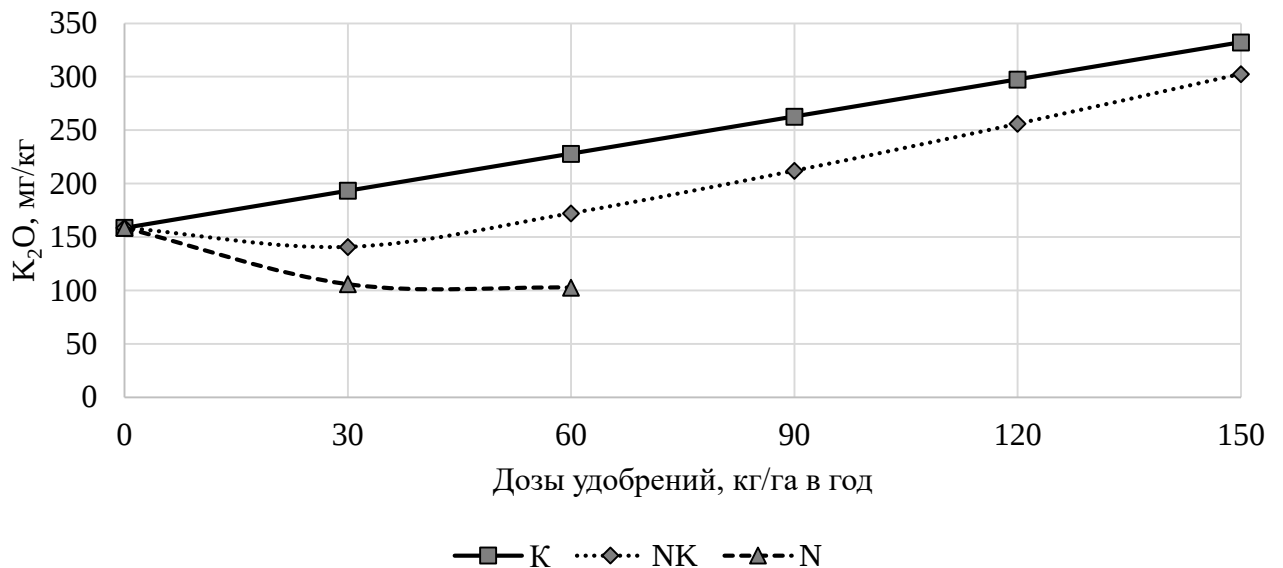


Рисунок 11 – Влияние доз азотных и калийных удобрений на содержание подвижного калия в почве (расчётные данные)

Увеличение содержания подвижного калия под действием калийных удобрений закономерно и описывается в работах большого числа авторов (Иванова, 1988; Афанасьев, Мерзлая, 2013; Лапа, Ивахненко, 2014; Пасынков и др., 2016; Якименко, 2019).

Снижение содержания калия в почве при применении азотных удобрений, установленное в результате наших исследований, также встречается в научных работах. В.В. Лапа и Н.Н. Ивахненко (2014) приводят следующие данные для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы: содержание калия изменилось за 23 года исследований при внесении $N_{78}P_{72}$ с 186 до 72 мг/кг, $N_{78}K_{119}$ с 208 до 231 мг/кг, $P_{72}K_{119}$ с 212 до 241 мг/кг. Авторы отмечают, что при совместном применении НК содержание калия в первые ротации снижалось до 163-180 мг/кг, в то время как при совместном применении РК содержание калия постепенно увеличивалось относительно исходных значений. А.В. Пасынков и др. (2016) приводят регрессионные уравнения, которые имеют более сложный характер, по которым, тем не менее, прослеживается негативное влияние азотных удобрений на содержание подвижного калия в почве. Т.И. Иванова (1988) указывает, что снижение содержания калия по регрессионному уравнению на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве произошло под действием фосфорных

удобрений, что также отмечают А.В. Пасынков и др. (2016). По результатам проведённых нами исследований такой закономерности не установлено.

Интересно отметить, что увеличение содержания подвижного калия в почве не может быть свидетельством положительного баланса калия в почве. В.Н. Якименко (2019) приводит следующие данные: стабилизация содержания подвижного калия на уровне целинного аналога происходит при дозе, рассчитанной на компенсацию 25 % выноса культурами. Соответственно, мы считаем, что поддержание содержания подвижного калия на исходном уровне является необходимой составляющей системы удобрения озимой ржи.

Доля изменчивости содержания подвижного калия по регрессионному уравнению, учитывающему дозы удобрений, и по прогнозной модели, учитывающей исходный уровень содержания калия, находились на относительно близком уровне: $R^2=0,88$ и $0,79$ соответственно (рисунок 12). Данная закономерность свидетельствует о том, что исходный уровень подвижного калия в почве оказывал существенное влияние на его изменение за 40 лет проведения полевого опыта.

Графическая модель позволяет прогнозировать изменение содержания подвижного калия в почве на удовлетворительном уровне ($\epsilon < 15\%$). Высокое значение относительной ошибки аппроксимации связано в первую очередь с особенностями расчёта данного показателя. Например, если фактическое изменение калия составляет 10 мг/кг, а расчётное -15 мг/кг, то ошибка составит 2,51, в случае если фактическое изменение составляет 102 мг/кг, а расчётное 128, то ошибка получается 0,26. По формуле расчёта разница между фактическим значением и расчётным делится фактическое значение и в случае приблизительно одинаковой разницы между фактическим и расчётным значением (25 и 26 мг/кг соответственно) это существенно определяет величину относительной ошибки.

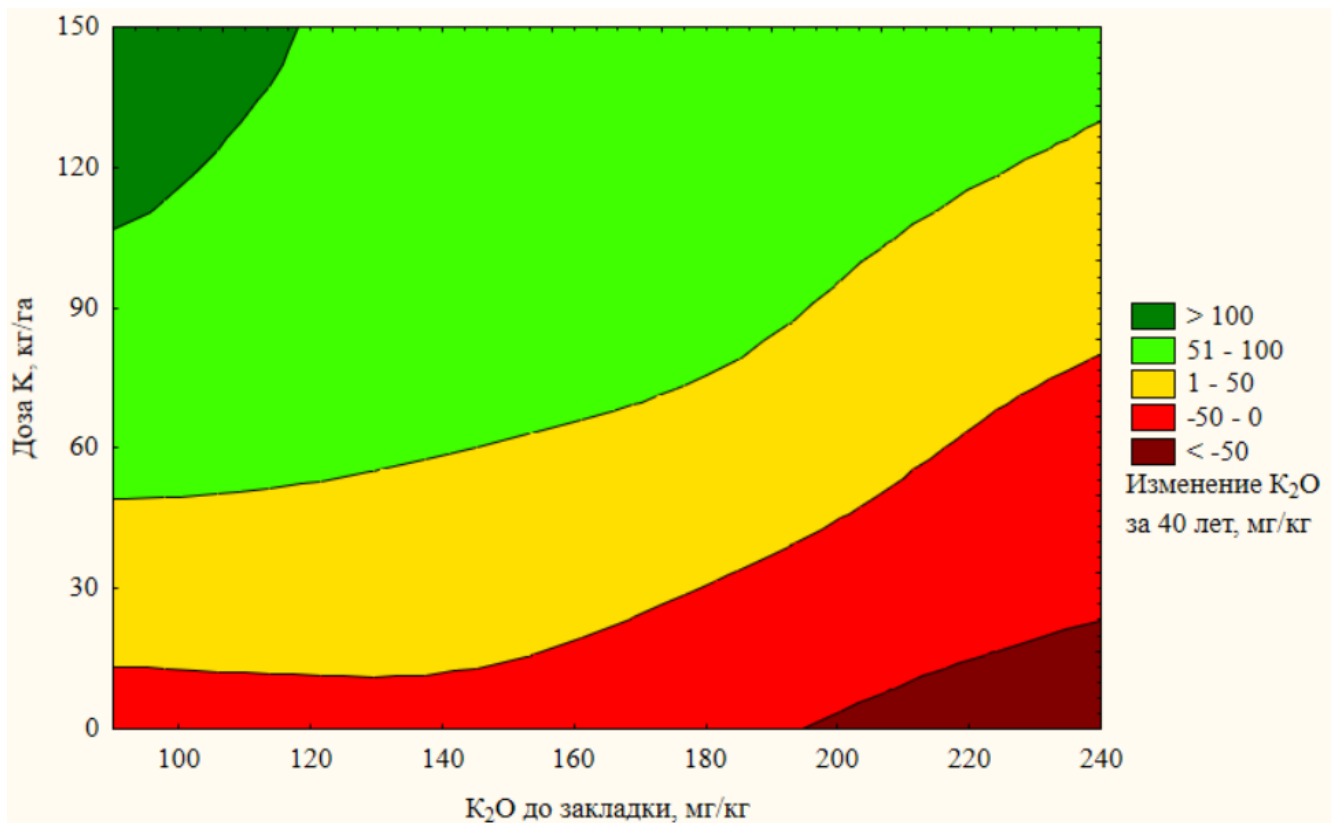


Рисунок 12 – Графическая прогнозная модель уровня изменения P_2O_5 к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз азотных удобрений ($N=48$; $R^2=0,79$; $\varepsilon=14,2\%$)

Полученная прогнозная модель подтверждает отмеченную ранее закономерность о снижении содержания подвижного калия в почве без применения калийных удобрений на любом уровне его исходного содержания в почве в рамках представленного в опыте диапазона. Наибольшее снижение отмечено при содержании в исходной почве 200-240 мг/кг калия, наибольшее увеличение получено при содержании калия на уровне 100 мг/кг при внесении калийных удобрений в дозе 120-150 кг/га д.в.

Заключение по главе 3

Длительное применение минеральных удобрений оказало существенное влияние на исследуемые агрохимические показатели дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы. Наибольшее влияние на физико-химические свойства почвы оказали азотные удобрения – под их действием произошло снижение $pH_{КС}$, увеличение гидролитической кислотности, снижение суммы поглощённых

оснований, ёмкости катионного обмена, степени насыщенности почв основаниями. Применение фосфорных и калийных удобрений повышало гидролитическую кислотность, сумму поглощённых оснований (только калийные), повышало ёмкость катионного обмена (только фосфорные удобрения), снижало степень насыщенности почв основаниями.

Отмечено сильное влияние на данную группу показателей их неоднородности до закладки опыта. Ухудшение физико-химических свойств произошло также в варианте без применения удобрений, что произошло из-за вымывания катионов кальция и магния из пахотного слоя и выноса их культурами севооборота. В связи с этим, были получены относительно невысокие коэффициенты детерминации регрессионных уравнений для всех показателей за исключением гидролитической кислотности.

Содержание гумуса не изменилось под действием минеральных удобрений, полученные в результате математической обработки регрессионные уравнения отличались разнонаправленностью и относительно низкими коэффициентами детерминации. Повышение содержания гумуса в первой закладке опыта произошло в вариантах, величина показателя в которых до закладки опыта была близка к минимальному содержанию гумуса в дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах района проведения исследований.

Содержание подвижных форм фосфора и калия в исследуемой почве повысилось при применении фосфорных и калийных удобрений соответственно. Некоторое понижение показателей произошло при применении азотных удобрений. Без применения минеральных удобрений содержание элементов снизилось.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМОЙ РЖИ СОРТА ФАЛЁНСКАЯ 4

Внесение минеральных удобрений оказало влияние на урожайность озимой ржи сорта Фалёнская 4, однако по годам исследований оно было различным (таблица 12).

Таблица 12 – Урожайность зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4 и окупаемость минеральных удобрений зерном

Вариант	2019 г.		2021 г.		Среднее за 2 года	
	У*	О	У	О	У	О
Без удобрений	2,37	–	1,75	–	2,06	–
K ₉₀	2,56	2,10	1,85	1,06	2,21	1,58
P ₉₀	2,68	3,38	1,69	–	2,19	1,35
P ₉₀ K ₉₀	2,56	1,03	1,75	–	2,15	0,49
N ₉₀	2,88	5,69	3,01	13,96	2,95	9,82
N ₉₀ K ₉₀	2,81	2,45	2,73	5,44	2,77	3,95
N ₉₀ P ₉₀	2,34	–	2,18	2,36	2,26	1,09
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	2,29	–	2,30	2,02	2,29	0,85
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	2,92	6,09	2,05	3,28	2,48	4,68
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,84	2,61	2,06	1,70	2,45	2,15
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,81	2,42	2,04	1,59	2,42	2,01
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	3,07	2,57	2,09	1,25	2,58	1,91
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	2,83	2,55	2,20	2,50	2,52	2,52
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,53	0,57	2,02	0,98	2,27	0,78
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,42	0,18	2,91	4,27	2,66	2,23
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	2,39	0,05	2,66	2,50	2,52	1,28
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	2,42	0,27	2,39	3,54	2,41	1,91
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	2,63	0,97	2,21	1,69	2,42	1,33
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,79	1,55	2,17	1,53	2,48	1,54
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,81	1,21	2,20	1,24	2,50	1,22
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	2,55	0,66	2,04	1,05	2,29	0,85
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	2,72	0,97	2,22	1,29	2,47	1,13
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,53	0,43	2,26	1,40	2,39	0,92
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,24	–	2,32	1,26	2,28	0,48
Среднее	2,62	1,89	2,21	2,66	2,42	2,00
V, %	8,6	–	15,3	–	8,3	–

*У – урожайность, т/га, О – окупаемость 1 кг д. в. зерном, кг /

В условиях 2019 года, когда уборка культуры проходила в условиях повышенного количества осадков, наибольшая величина урожайности получена в варианте $N_{30}P_{120}K_{120}$, относительно высокая – в вариантах $N_{30}P_{30}K_{30}$ и N_{90} . Наименьшая урожайность отмечена при применении полного минерального удобрения $N_{150}P_{150}K_{150}$ – на 0,14 т/га ниже, чем в варианте без применения удобрений. Урожайность ниже контроля также отмечена в вариантах $N_{90}P_{90}$ и $N_{90}P_{90}K_{90}$, на уровне варианта без применения удобрений урожайность оказалась при внесении $N_{120}P_{120}K_{120}$ и $N_{60}P_{60}K_{60}$. Таким образом, в гидротермических условиях 2019 года среди полных доз минерального удобрения наибольшая эффективность отмечена при использовании минимальной дозы NPK (по 30 кг/га д.в.), повышение доз вело к снижению эффективности удобрений. Агрономическая окупаемость применения 1 кг д. в. удобрений прибавкой зерна изменялась в относительно узком диапазоне и не превышала 3 кг по большинству вариантов, наибольшая отмечена в вариантах с применением N_{90} и $N_{30}P_{30}K_{30}$ (5,69 и 6,00 кг соответственно).

В условиях вегетационного периода 2021 года, для которого были характерны засушливые погодные условия, фазы развития культуры проходили быстрее, из-за чего уборка прошла раньше среднесезонных сроков. Если в 2019 году между максимальной урожайностью и урожайностью на контроле наблюдался разрыв 0,70 т/га, то в 2021 году этот разрыв увеличился до 1,26 т/га, что свидетельствует о серьёзном влиянии на урожайность погодных условий. Применение почти всех исследуемых доз и соотношений минеральных удобрений приводило к увеличению урожайности относительно контроля, за исключением вариантов с односторонним внесением фосфорных и сочетания фосфорных с калийными удобрениями в дозе 90 кг/га д.в. Наибольшая урожайность отмечена в вариантах с применением одних азотных удобрений в дозе 90 кг/га д.в. и $N_{120}P_{120}K_{30}$. Наименьшая урожайность отмечена в вариантах без применения удобрений, P_{90} и $P_{90}K_{90}$. Окупаемость 1 кг д. в. удобрений прибавкой зерна в условиях 2021 года была выше и изменялась по вариантам

опыта от 0,98 до 13,96 кг. Наименьшая окупаемость отмечена в варианте $N_{120}P_{30}K_{120}$, наибольшая – в варианте N_{90} .

В среднем за 2 года исследований выделился вариант N_{90} , в котором получена наибольшая урожайность и окупаемость применения 1 кг д. в. удобрений зерном (2,95 т/га и 9,82 кг соответственно). Наименьшая урожайность была получена при возделывании озимой ржи без применения удобрений, наименьшая окупаемость в вариантах $P_{90}K_{90}$ и $N_{150}P_{150}K_{150}$.

С использованием метода наименьших квадратов были получены следующие уравнения регрессии, описывающие эффекты от применения азотных, фосфорных и калийных удобрений (формулы 23-25, приложение Л). В условиях 2019 года достоверное влияние на урожайность оказывали азотные и фосфорные удобрения, как отдельно, так и при совместном применении. Действием указанных минеральных удобрений может быть объяснено 47 % изменчивости урожайности. В 2021 году только азотные удобрения оказали доказуемое влияние на урожайность, их влиянием может быть объяснено 57 % изменчивости урожайности. В среднем за два года исследований математически доказуемый эффект оказали азотные и фосфорные удобрения, основная роль в увеличении урожайности принадлежала азоту. Действием этих удобрений может быть объяснено 73 % изменчивости урожайности по вариантам. Математически доказуемого влияния калийных удобрений на урожайность озимой ржи сорта Фалёнская 4 при проведении исследований не выявлено. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для формулы 25, для формул 23 и 24 – удовлетворительная.

$$Y_{(2019)} = 2,59 + 0,020 \times N^2 + 0,027 \times P^2 - 0,057 \times NP \quad (R^2=0,47; \varepsilon=5,0 \%) \quad (23)$$

$$Y_{(2021)} = 1,72 + 0,450 \times N - 0,069 \times N^2 \quad (R^2=0,57; \varepsilon=6,7 \%) \quad (24)$$

$$Y_{19-21} = 2,15 + 0,644 \times N^{0,5} - 0,142 \times N - 0,295 \times P^{0,5} + 0,176 \times P - 0,145 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,73; \varepsilon=3,4 \%) \quad (25)$$

где: Y_{2019} , Y_{2021} , Y_{19-21} – урожайность зерна озимой ржи в 2019, 2021 годах и в среднем за 2019-2021 гг., т/га;

N , P – дозы азотных и фосфорных удобрений в кодированном виде – количество единичных доз;

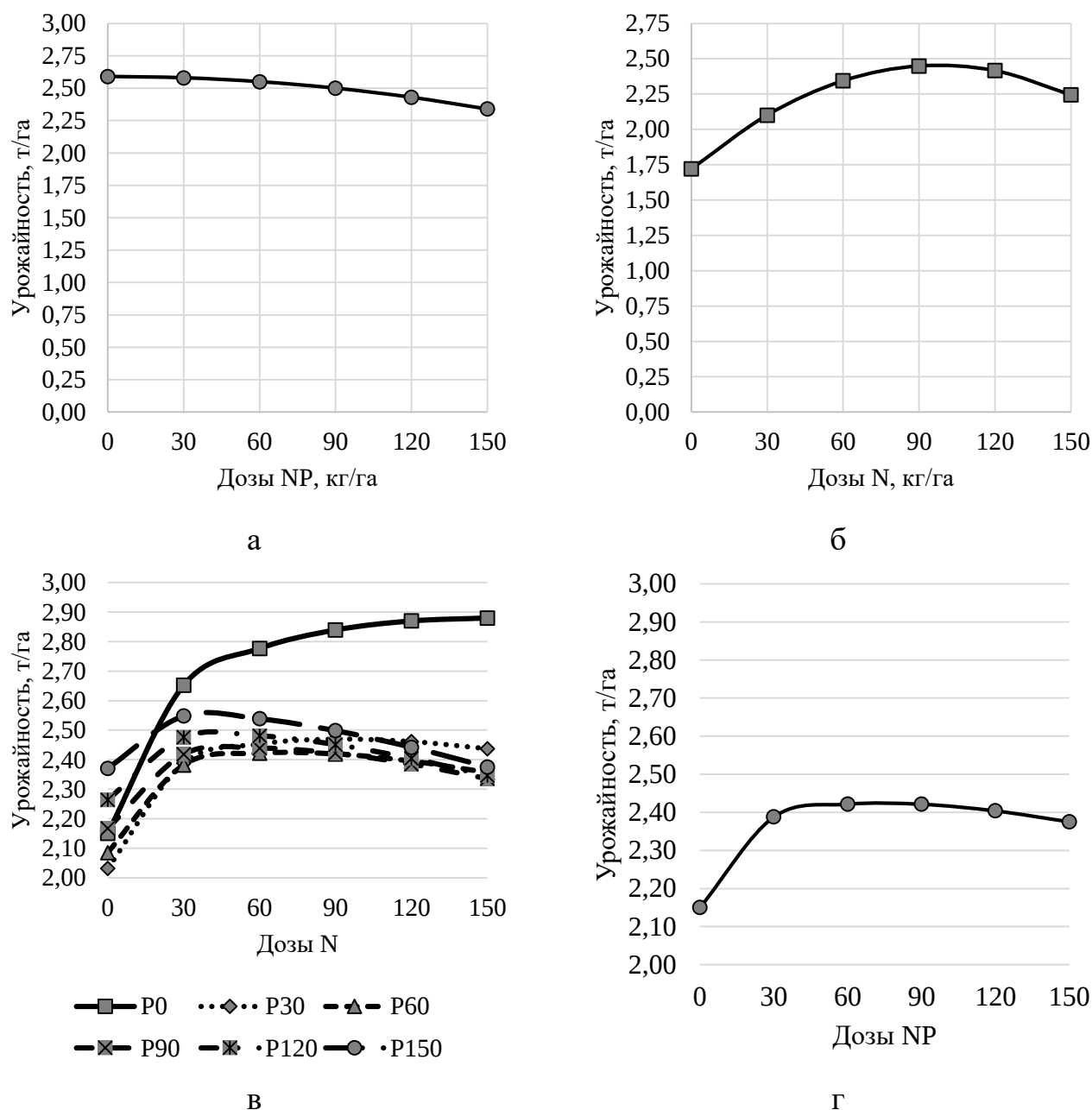
2,59; 1,72; 2,15 – теоретическая урожайность в варианте без применения удобрений;

0,020...0,145 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

На рисунке 13 представлена визуализация полученных уравнений. Стоит отметить, что при выборе для построения графика по уравнению 2019 года как вариантов с дозами азотных удобрений без применения фосфорных, так и вариантов с дозами фосфорных без применения азотных, урожайность возрастала линейно, что противоречило фактической динамике. Из чего был сделан вывод, что основное влияние на урожайность оказывали именно сочетания азотно-фосфорных удобрений. Полученное уравнение нивелировало действие дозы 30 кг/га д. в. и указало на постепенное снижение урожайности начиная с первой дозы азотно-фосфорных удобрений, что также не соотносится с фактическими данными. Такая низкая воспроизводимость фактических данных, по нашему мнению, связана со специфическими условиями избыточного увлажнения июля-августа 2019 года, из-за чего в том числе и получен относительно низкий коэффициент детерминации.

В 2021 г., в условиях которого доказуемый эффект оказали только азотные удобрения, эффективность их снижалась после дозы 90 кг/га д. в., однако в отличие от 2019 г., это снижение не происходило до уровня варианта без применения удобрений и ниже. Анализируя график, описывающий действие минеральных удобрений в среднем за два года, стоит отметить, что наибольший прирост урожайности был получен от азотных удобрений, применяемых в чистом виде, в то время как одностороннее применение фосфорных удобрений в дозах 30 и 60 кг/га вызывало снижение урожайности относительно контроля. Совместное

внесение азота и фосфора приводило к снижению урожайности, что также может быть объяснено специфическими погодными условиями периодов вегетации в годы исследований.



а – 2019 г, б – 2021 г., в, г – 2019-2021 гг.

Рисунок 13 – Влияние доз азотных и фосфорных удобрений на урожайность зерна озимой ржи (расчётные данные)

Как показано выше, повышенные дозы минерального удобрения оказывали негативное действие на урожайность озимой ржи. Данные закономерности

подтверждают результаты, полученные А.И. Косолаповой и др. (2013) по предыдущей ротации севооборота для возрастающих доз полного минерального удобрения. Снижение эффективности высоких доз удобрений относительно низких доз отмечено и в ряде других исследований (Сычев и др., 2009; Loide, 2015; Белоус и др., 2017).

Интересно отметить, что в схожей по почвенно-климатическим условиям Кировской области на среднесуглинистой почве учеными ФАНЦ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (Абашев и др., 2014, 2020; Попов и др., 2020) получена несколько иная закономерность. Исследователи отмечают главенствующую роль в увеличении урожайности озимой ржи азотных удобрений как в благоприятных, так и в неблагоприятных погодных условиях, чему соответствуют данные, полученные нами. Несмотря на то, что влияние повышенных доз азота имело затухающий характер, максимальная урожайность была получена при дозе NPK 150 кг/га д.в. В этих же статьях исследователи отмечают достоверное влияние фосфорных и калийных удобрений (в благоприятные годы) на урожайность зерна озимой ржи. Аналогичные результаты были получены А.М. Коновой и соавторами (2011) на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в Смоленской области.

По данным В.Г. Сычева и Н.А. Кирпичникова (2009) содержание в почве фосфора на уровне 100-150 мг/кг многими авторами признаётся оптимальным для возделывания зерновых культур. Содержание подвижного фосфора в опытах в Кировской области на момент пятой ротации севооборота находилось в диапазоне 85-180 мг/кг (варианты без удобрений и максимальная доза NPK) (Абашев и др., 2018), в Смоленской области – 120-150 мг/кг (в вариантах с максимальными дозами внесения фосфора) (Коновы и др., 2011). Как было показано в разделе 3.3, содержание элемента в нашем опыте на момент пятой ротации составило 202-453 мг/кг (контроль и максимальная доза NPK). В связи с этим, мы считаем одной из причин негативного влияния фосфорных удобрений может быть высокое содержание подвижного фосфора в почве.

Различия между данными, полученными нами, и данными, полученными в Кировской и Смоленской областях, могут быть также связаны с

гранулометрическим составом почвы. Исследования А.М. Коновой и др. (2011), В.Д. Абашева и др. (2014, 2020) были проведены на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах, в то время как наши исследования проведены на тяжелосуглинистой почве. Интересно отметить, что влияние фосфорных и калийных удобрений отмечается исследователями не в первых ротациях севооборота.

Одним из безусловных плюсов факториальных схем опытов является возможность расчёта с помощью регрессионных уравнений теоретической урожайности в вариантах, не представленных непосредственно в поле.

Влияние доз азотных и фосфорных удобрений на урожайность озимой ржи в условиях вегетационного периода 2018-2019 гг. представлено в таблице 13. Ввиду специфичности условий вегетационного периода при использовании регрессионного уравнения не удалось описать наблюдаемую в реальных условиях картину. Доза (NP)₃₀, при которой отмечалась наибольшая урожайность в опыте, не дала существенную прибавку по регрессионному уравнению. Мы связываем данную закономерность со спецификой вычислений коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов.

Таблица 13 – Урожайность и её изменение относительно контроля при применении возрастающих доз азотных удобрений, 2019 г. (расчётные данные)

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га	Изменение урожайности относительно контроля
(NP) ₀	2,59	—	—
(NP) ₃₀	2,58	—	-0,01
(NP) ₆₀	2,55	—	-0,04
(NP) ₉₀	2,50	—	-0,09
(NP) ₁₂₀	2,43	—	-0,16
(NP) ₁₅₀	2,34	—	-0,25

На основании расчётных данных определены показатели агрономической эффективности в 2021 г. (таблица 14). Возрастающие прибавки урожайности озимой ржи отмечены при повышении доз азота от 30 до 90 кг/га – от 0,38 до 0,72 т/га, дальнейшее увеличение доз приводило к снижению прибавок. Наибольшая

окупаемость азотных удобрений зерном получена в варианте N_{30} , каждое дальнейшее увеличение дозы на 30 кг/га приводило к снижению окупаемости на 2,3 кг зерна.

Таблица 14 – Урожайность, прибавка и окупаемость азотных удобрений зерном в 2021 г. (расчётные данные)

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га	Окупаемость 1 кг д.в. зерном, кг
N_0	1,72	—	—
N_{30}	2,10	0,38	12,7
N_{60}	2,34	0,62	10,4
N_{90}	2,45	0,73	8,1
N_{120}	2,42	0,70	5,8
N_{150}	2,25	0,53	3,5

В таблице 15 представлена расчётная урожайность озимой ржи в среднем за два года исследований (формула 25) по вариантам с применением одних азотных удобрений. Остальные расчётные варианты в основной части работы рассматривать считаем нецелесообразным, так как отклонения урожайности по ним относительно контроля либо меньше представленных в таблице, либо отрицательны (они представлены в приложении Л). По мере роста доз азотных удобрений от 30 до 150 кг/га происходит увеличение урожайности озимой ржи, прибавки варьируют от 0,50 до 0,73 т/га. Наибольшая окупаемость азотных удобрений зерном получена в варианте N_{30} . После дозы азота 60 кг/га урожайность практически перестает расти.

Таблица 15 – Урожайность, прибавка и окупаемость азотных удобрений зерном в среднем за 2 года исследований (расчётные данные)

Доза	Урожайность, т/га	Прибавка, т/га	Окупаемость 1 кг д. в. зерном, кг
N_0	2,15	—	—
N_{30}	2,65	0,50	16,7
N_{60}	2,78	0,63	10,5
N_{90}	2,84	0,69	7,7
N_{120}	2,87	0,72	6,0
N_{150}	2,88	0,73	4,9

Высокую окупаемость азотных удобрений в низких дозах отмечают многие исследователи (Завалин, Пасынков, 2007; Конова и др., 2011; Макшакова, 2014; Сычев и др., 2009; Абашев и др., 2014; Попов и др., 2020; Максимов и др., 2020; Szuleta et al., 2023). По результатам исследований Ф.А. Попова и др. (2020), окупаемость азотных удобрений в дозе 60 кг/га составила 67,3 кг/кг в благоприятный по погодным условиям и 17,5 кг/кг в менее благоприятный вегетационный период. В.Г. Сычев с соавторами (2009), анализируя результаты исследований, проведенных в рамках Географической сети опытов, приводит данные об окупаемости 1 кг азота на дерново-подзолистых почвах от 5,5 до 11,5 кг зерна (в среднем 8,4 кг) без указания доз удобрений. В среднем по таблице 15 окупаемость азотных удобрений прибавкой составила 9,2 кг, что в целом соотносится с результатами, полученными в опытах Геосети.

Урожайность формируется на протяжении всего периода вегетации культуры (Церлинг, 1990; Макарова, 1995). Поэтому причины наличия или отсутствия эффекта от действия тех или иных удобрений рационально искать не только на этапе учёта урожайности, но и в основные периоды развития культуры. Для этой цели был проведён учёт и отбор зелёной массы озимой ржи в наиболее важные с агрохимической точки зрения фазы ее развития, а именно в фазы выхода в трубку и колошения. Фаза выхода в трубку является критической по потребности растения в питательных веществах и влаге, в фазу колошения заканчивается потребление элементов питания растениями из почвы (Макарова, 1995; Возделывание озимой..., 2021; Волкова и др., 2022).

Урожайность надземной массы в фазу выхода в трубку изменялась по вариантам в диапазоне от 56,0 до 170,9 г/м² (в среднем 112,9), варьирование значений сильное ($V > 20\%$) (таблица 16). В фазу колошения варьирование урожайности зелёной массы по вариантам снизилось, минимальная урожайность составила 253,5 г/м², максимальная 484,1 г/м².

Таблица 16 – Урожайность надземной массы озимой ржи сорта Фалёнская 4 по фазам развития растений, г/м², 2019 и 2021 гг.

Вариант	Выход в трубку	Колошение
Без удобрений	76,4	288,5
K ₉₀	84,4	294,9
P ₉₀	72,3	271,9
P ₉₀ K ₉₀	119,2	313,0
N ₉₀	127,6	464,6
N ₉₀ K ₉₀	104,9	467,8
N ₉₀ P ₉₀	127,6	365,5
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	103,3	437,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	100,5	253,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	125,5	304,7
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	137,2	363,0
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	121,7	421,1
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	159,5	396,3
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	56,0	314,2
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	170,9	484,1
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	117,9	414,9
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	118,0	337,7
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	95,6	335,9
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	115,0	375,6
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	114,6	278,4
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	130,8	302,3
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	142,4	349,9
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	102,8	414,2
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	86,0	325,8
Среднее	112,9	357,3
V, %	23,7	18,7

Результаты регрессионного анализа зависимости урожайности надземной массы озимой ржи от применяемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений представлены в виде формул 26-27, на рисунке 14 и в приложении М. Урожайность в обе фазы развития повышалась при применении азотных удобрений, действие которых имело «затухающий» эффект. Совместное внесение азотных удобрений с калийными в фазу выхода в трубку приводило к снижению урожайности. Стоит отметить относительно низкий коэффициент детерминации в обоих уравнениях – действием минеральных удобрений можно объяснить только 29-35 % изменения урожайности по опыту. Точность прогнозной модели по

относительной ошибке аппроксимации удовлетворительная для формулы 27, для формулы 26 – не удовлетворительная. Коэффициент линейной корреляции между фактической урожайностью зерна и фактической урожайностью зелёной массы в фазу выхода в трубку составил 0,51, в фазу колошения – 0,67 (достоверно при $p < 0,05$).

$$Y_{\text{выход в трубку}} = 93,98 + 28,554 \times N^{0,5} - 9,930 \times NK^{0,5} \quad (R^2=0,29; \varepsilon=18,1 \%) \quad (26)$$

$$Y_{\text{колошение}} = 279,98 + 70,259 \times N - 10,725 \times N^2 \quad (R^2=0,35; \varepsilon=12,5 \%) \quad (27)$$

где: $Y_{\text{выход в трубку}}$, $Y_{\text{колошение}}$ – урожайность зелёной массы озимой ржи в фазы выхода в трубку и колошения, г/м²;

N, K – дозы азотных и калийных удобрений в кодированном виде – количество единичных доз;

93,98; 279,98 – теоретическая урожайность в варианте без применения удобрений;

28,554...10,725 – коэффициенты регрессии, характеризующие действие удобрений.

По результатам корреляционного анализа не выявлено математически доказуемых связей между агрохимическими показателями дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы и урожайностью, как зерна, так и надземной массы озимой ржи (таблица 17). Данная закономерность противоречит результатам исследований С.А. Шафрана и др. (2008), Е.М. Митрофановой (2011), В.Г. Сычева и С.А. Шафрана (2012), которые указывают на наличие корреляционных связей. Данные исследователи указывают в первую очередь на тесную связь урожайности и содержания подвижных форм фосфора и калия в почве. Отсутствие связи по результатам наших исследований может быть связано с высокой обеспеченностью почвы подвижными формами фосфора и калия, наблюдаемой в описываемом нами опыте.

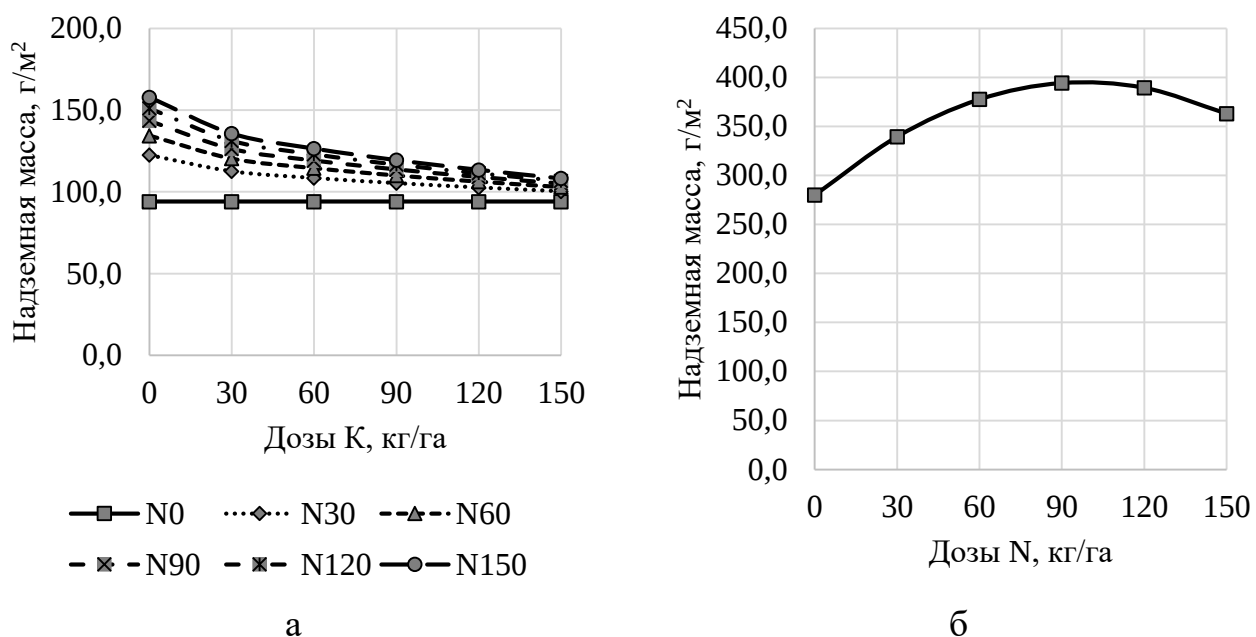


Рисунок 14 – Влияние доз азотных и калийных удобрений на урожайность надземной массы озимой ржи по фазам развития (расчётные данные)

Таблица 17 – Коэффициенты линейной корреляционной связи урожайности зерна и зелёной массы озимой ржи с агрохимическими показателями ($n=24$, $p<0,05$)

Показатель	pH_{KCl}	Hg	S	Гумус	P_2O_5	K_2O
Урожайность зерна	-0,13	0,03	0,06	0,15	-0,15	-0,14
Урожайность з.м. выход в трубку	-0,21	0,18	-0,04	0,13	0,15	-0,09
Урожайность з.м. колошение	-0,26	0,20	-0,07	0,30	0,12	-0,14

Закключение по Главе 4

Исследованиями установлено, что в контрастных погодных условиях наибольшая урожайность зерна озимой ржи и окупаемость зерном удобрений в длительном стационарном опыте была получена в варианте с применением N90 и составила 2,95 т/га (окупаемость 9,82 кг/кг). По результатам регрессионного анализа наибольшее влияние оказывали азотные удобрения, их действие имело затухающий характер. По расчётным данным наибольшая окупаемость азотных удобрений прибавкой урожайности получена при дозе 30 кг/га д.в. Анализ урожайности надземной массы озимой ржи показал, что на ранних стадиях

развития растений достоверное влияние оказывали также азотные удобрений. Между урожайностью надземной массы и зерна установлена заметная корреляционная связь. Между агрохимическими показателями почвы опыта и урожайностью надземной массы и зерна не установлено ни одной достоверной корреляционной связи.

ГЛАВА 5 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ

5.1 Технологические показатели зерна озимой ржи

Масса 1000 зёрен характеризует крупность зерна, его посевные качества, определяют конечный выход продукции. Натура дает представление о выполненности зерна, имеющей большое технологическое значение. Высоковыполненное зерно хорошо развито, у него большой процент приходится на долю эндосперма. При неблагоприятных условиях формирования зерна масса его оболочек (по сравнению с массой эндосперма) возрастает, а масса эндосперма снижается, что ведет, в свою очередь, к снижению выхода готовой продукции (муки, крупы и т. п.). «Число падения» – общее время в секундах, начиная с момента погружения вискозиметрической пробирки в кипящую воду, необходимое для перемешивания суспензии мешалкой вискозиметра и для падения ее через эту суспензию из воды и муки для цельносмолотого зерна.

В 2019 году в связи с частичным прорастанием зерна озимой ржи на корню показатели качества зерна определяли выборочно в шести вариантах, представляющих из себя блок возрастающих доз азотного удобрения (таблица 18). Наибольшая масса 1000 зёрен была сформирована в варианте без применения удобрений, при применении удобрений величина показателя снижалась и составила 23,6 г в среднем по удобренным вариантам. Натура зерна изменялась в диапазоне от 596 до 668 г/л. В соответствии с ГОСТ 16990-2017 «Технические условия. Озимая рожь», определяющим правила приемки, анализа и реализации зерна озимой ржи пищевого направления, по данному показателю было получено зерно 3 (640-679 г/л) и 4 класса (< 640 г/л). Необходимо отметить что среди вариантов, в которых получено зерно 3 класса, величина натуры зерна близка к нижней границе класса, за исключением варианта с применением $N_{30}P_{30}K_{30}$. Величина «Числа падения» по всем вариантам была получена на уровне воды – 60 с. Это связано с тем, что обильные осадки августе 2019 года вызвали

активизацию фермента α -амилазы и в зерне озимой ржи произошло расщепление крахмала до сахаров.

Таблица 18 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой ржи, 2019 г.

Вариант	Масса 1000 зёрен, г	Натура зерна, г/л	Класс зерна	Число падения, с	Класс зерна	Общий класс
Без удобрений	25,8	648	3	60	4	4
N ₉₀	21,3	596	4	60	4	4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	25,4	668	3	60	4	4
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	23,0	645	3	60	4	4
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	23,9	646	3	60	4	4
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	24,2	608	4	60	4	4

По общей оценке, в соответствии с ГОСТ 16990-2017, в условиях 2019 года было получено зерно 4 класса качества. Такое зерно не предназначено для реализации на продовольственные цели.

Регрессионные уравнения, характеризующие влияние удобрений на продовольственные качества озимой ржи в условиях 2019 года представлены в формулах 28-29 и в приложении Н. При применении азотных удобрений происходило снижение обоих показателей, фосфорно-калийные удобрения наоборот вызывали повышение величины массы 1000 зёрен. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений. Натура зерна при увеличении доз фосфорно-калийных удобрений до 60 кг/га снижалась. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$M_{1000} = 25,48 - 2,169 \times N^{0,5} + 1,854 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,52; \varepsilon=4,1 \%) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{Натура} = 647,51 - 29,207 \times N^{0,5} + 113,408 \times PK^{0,5} - 60,992 \times PK \\ (R^2=0,63, \varepsilon=1,7 \%) \end{aligned} \quad (29)$$

где: M_{1000} – масса 1000 зёрен, г, Натура – натура зерна, г/л в 2019 году

N, P, K – дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений в кодированном виде – количество единичных доз;

25,04, 647,51 – теоретические значения показателей в варианте без применения удобрений;

2,169...60,992 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

В условиях засушливого 2021 года масса 1000 зёрен изменялась в относительно широком диапазоне от 21,7 г ($N_{120}P_{30}K_{30}$) до 27,2 г ($N_{150}P_{150}K_{150}$), в среднем при применении удобрений величина показателя увеличивалась относительно контроля на 2,2 г (таблица 19). В основном при внесении минеральных удобрений происходило либо повышение массы 1000 зёрен, либо величина показателя оставался на уровне контроля. Исключением был вариант $N_{120}P_{30}K_{30}$. Натура зерна озимой ржи изменялась по опыту в диапазоне от 660 до 718 г/л, при применении минеральных удобрений происходило снижение величины показателя относительно контроля. Наименьший натурный вес зерна сформировался в варианте $N_{150}P_{150}K_{60}$, наибольший в вариантах без применения удобрений и K_{90} . «Число падения» изменялось по опыту в диапазоне от 88 до 221 с. Внесение минеральных удобрений оказывало негативное влияние на величину показателя: среднее значение по всем вариантам с удобрениями составило 157 с при 203 с на контроле. Наименьшее значение отмечено в варианте $N_{150}P_{60}K_{150}$, наибольшее в варианте K_{90} .

По общей оценке, в соответствии с ГОСТ 16990-2017, зерно первого класса получено в вариантах без удобрений и K_{90} , реализация его предполагается для усиления более слабых партий зерна. В восьми вариантах опыта сформировалось зерно 3 класса, которое можно использовать только с применением муки-усилителя. В большинстве вариантов опыта в условиях вегетационного периода 2020-2021 гг. было получено зерно 2 класса, что предполагает его реализацию в мукомольной промышленности.

Таблица 19 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой ржи, 2021 г.

Вариант	Масса 1000 зёрен, г	Натура зерна, г/л	Класс зерна	Число падения, с	Класс зерна	Общий класс
Без удобрений	22,2	713	1	203	1	1
K ₉₀	24,6	718	1	221	1	1
P ₉₀	25,6	699	2	211	1	2
P ₉₀ K ₉₀	24,4	704	1	186	2	2
N ₉₀	23,1	676	3	116	3	3
N ₉₀ K ₉₀	23,6	675	3	164	2	3
N ₉₀ P ₉₀	24,1	680	2	143	2	2
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	23,5	682	2	158	2	2
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	22,3	698	2	196	2	2
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	24,8	706	1	194	2	2
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	23,9	696	2	154	2	2
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	25,3	680	2	164	2	2
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	21,7	667	3	147	2	3
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	24,2	705	1	168	2	2
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	26,5	671	3	139	3	3
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	25,6	665	3	95	3	3
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	25,8	694	2	142	2	2
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	22,2	685	2	162	2	2
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	25,7	682	2	169	2	2
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	24,7	691	2	190	2	2
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	24,3	686	2	126	3	3
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	24,1	688	2	88	3	3
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	24,9	660	3	123	3	3
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	27,2	696	2	150	2	2
Среднее	24,3	688	—	159	—	—
V, %	5,8	2,2	—	21,8	—	—

Результаты регрессионного анализа влияния изучаемых в опыте минеральных удобрений на технологические показатели зерна озимой ржи представлены в формулах 30-32 и приложении Н. Масса 1000 зёрен в опыте увеличивалась под действием фосфорных удобрений. Натура зерна и «Число падения» (ЧП) уменьшались при применении азотных удобрений. Применение калийных удобрений снижало негативное воздействие на натуру азотных удобрений, для «Числа падения» такой закономерности выявить не удалось. Стоит отметить относительно низкий коэффициент детерминации для всех

полученных уравнений, что может быть свидетельством сильного влияния на технологические свойства зерна иных условий произрастания озимой ржи, таких как погодные условия и сортовые особенности. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для формул 30 и 31, для формулы 32 – удовлетворительная.

$$M_{1000} = 23,08 + 0,506 \times P \quad (R^2=0,40; \varepsilon=3,7 \%) \quad (30)$$

$$\text{Натура} = 702,92 - 8,970 \times N + 1,134 \times NK \quad (R^2=0,55; \varepsilon=1,2 \%) \quad (31)$$

$$\text{ЧП} = 198,57 - 15,928 \times N \quad (R^2=0,64; \varepsilon=12,0 \%) \quad (32)$$

где: M_{1000} – масса 1000 зёрен, г, Натура – натура зерна, г/л, ЧП – число падения, с;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений в кодированном виде – количество единичных доз;

23,08, 702,92, 198,57 – теоретические значения показателей в варианте без применения удобрений;

0,506...15,928 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

А.А. Завалин и А.В. Пасынков (2007) приводят данные, показывающие, что масса 1000 зёрен, натура зерна и «Число падения» снижаются под действием азотных удобрений, что соответствует полученным нами данным для натуры и «Числа падения». Коэффициент детерминации регрессионного уравнения, описывающего действие азотных удобрений, находился на более высоком уровне и составлял 0,59. В.Д. Абашев и др. (2014), наоборот, указывают на отсутствие зависимости величины натуры и массы 1000 зёрен от действия минеральных удобрений. В этой же работе исследователи отмечают устойчивую тенденцию снижения «Числа падения» под действием азотных удобрений для сорта озимой ржи Фалёнская 4, в более поздних исследованиях (Попов и др., 2020) для сорта Графиня аналогичной закономерности авторами не установлено.

Многие исследования указывают на зависимость технологических показателей от сортовых особенностей культуры и погодных условий периода

вегетации (Лыскова и др., 2014; Нуждина и др., 2016; Козлова и др., 2017; Шляхтина и др., 2018; Пономарев, Пономарева, 2019; Аниськов, Сафонова, 2020; Максимов и др., 2020). Среди прочего необходимо отметить, что в результате проведённых нами исследований для регрессионных уравнений были получены относительно низкие коэффициенты детерминации. В связи с вышесказанным, мы считаем, что полученные нами математические закономерности являются следствием сочетания действия минеральных удобрений и иных факторов (сортовая реакция, погодные условия), которые в рамках проведённых нами исследований не изучались.

Как уже было показано в главе 4, азотные удобрения вносят наибольший вклад в увеличение урожайности зерна, однако, как показывают формулы 29-30, они же оказывают влияние на снижение технологических показателей зерна. Следовательно, актуальной задачей является выявление оптимальных доз азота, не ухудшающих показатели качества и обеспечивающих высокую прибавку урожайности. На рисунке 15 представлены производственные функции действия азотных удобрений на натуру и «Число падения» озимой ржи сорта Фалёнская 4. По построенным производственным функциям можно сделать вывод о том, что зерно 1 класса качества (натура ≥ 700 , «Число падения» > 200) возможно получить только при возделывании культуры без применения удобрений. Применение азотных удобрений в дозе до 60 кг/га д.в. включительно позволяет получить зерно 2 класса качества (натура 680-700, ЧП 141-200). При дополнительном внесении калийных удобрений совместно с азотными для получения 2 класса зерна возможно увеличить дозу азота до 90 кг/га при дозе калия 30-60 кг/га, до 120 при дозе калия 90 кг/га, до 150 при дозе калия 120-150 кг/га.

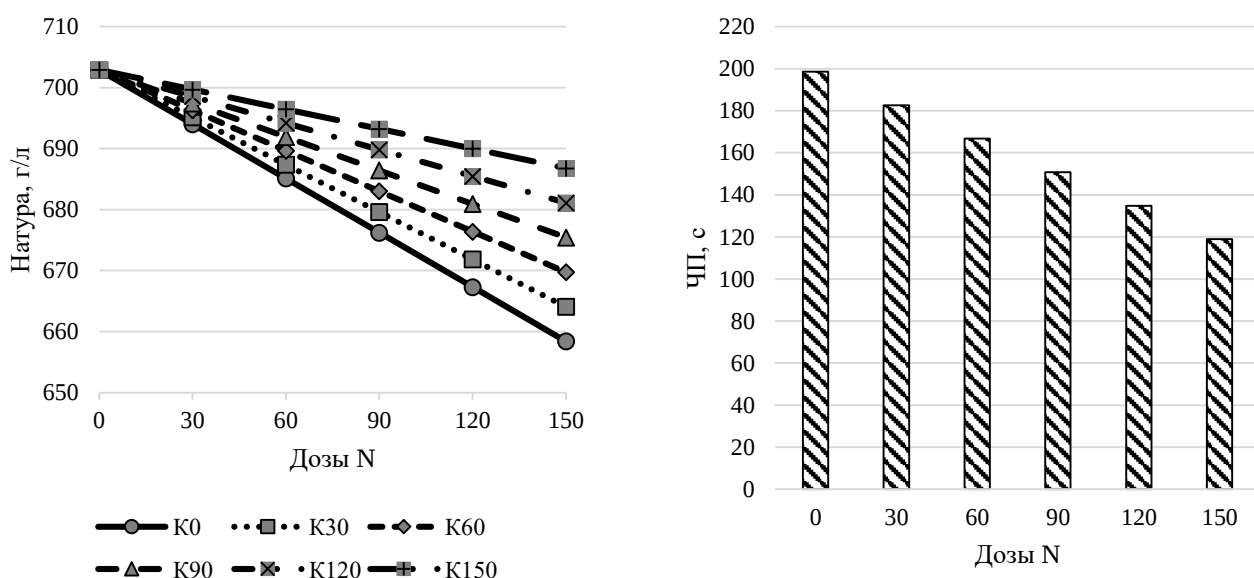


Рисунок 15 – Влияние азотных и калийных удобрений на натуру и «Число падения» зерна озимой ржи (расчётные данные)

5.2 Биохимические показатели зерна озимой ржи

Содержание белка, золы и крахмала в абсолютно сухом веществе (а.с.в.) представлено в таблице 20. В среднем по опыту в условиях 2021 года содержание сырого белка составляло 11,7 %. Минимальное его содержание было отмечено в варианте $P_{90}K_{90}$, максимальное в варианте $N_{120}P_{120}K_{120}$. В среднем по вариантам с применением минеральных удобрений содержание сырого белка было на уровне контроля, что явилось следствием как снижения, так и повышения величины показателя под действием минеральных удобрений. Содержание крахмала в зерне по вариантам опыта находилось в диапазоне от 51 % ($N_{60}P_{60}K_{150}$) до 57 % ($N_{90}K_{90}$), применение минеральных удобрений приводило к увеличению его содержания. В.А. Сысуев и соавторы (2011) отмечают, что для производства крахмала наиболее пригодно зерно с содержанием крахмала не менее 58 %, белка не более 13 %. Зерно озимой ржи, полученное в условиях 2021 г., было малопригодно для переработки на крахмал: несмотря на то, что содержание белка по всем вариантам было ниже 13 %, содержание крахмала было недостаточным.

Таблица 20 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на биохимический состав зерна озимой ржи, 2021 г., % на а.с.в.

Вариант	Сырой белок	Крахмал	Зола
Без удобрений	11,8	51,1	0,96
K ₉₀	11,3	52,2	1,05
P ₉₀	11,1	58,0	1,09
P ₉₀ K ₉₀	10,6	52,0	1,06
N ₉₀	11,8	57,4	0,99
N ₉₀ K ₉₀	11,5	55,5	1,04
N ₉₀ P ₉₀	11,6	55,7	1,09
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	11,7	55,4	1,06
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	11,4	54,2	0,92
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	11,6	54,5	1,05
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	11,4	57,1	1,04
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	12,0	55,7	1,08
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	11,9	51,9	0,97
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	11,8	52,9	1,08
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	12,0	55,7	1,09
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	12,4	52,6	1,07
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	11,7	53,1	0,95
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	11,5	52,4	1,05
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	11,3	54,0	1,12
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	11,9	56,1	1,08
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	12,0	55,7	0,96
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	12,0	56,6	1,10
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	11,8	55,0	1,07
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	12,0	52,5	1,07
Среднее	11,7	54,5	1,04
V, %	3,2	3,6	5,2

Содержание зольных веществ изменялось в диапазоне от 0,92 до 1,12 % и возрастало с 0,96 % на контроле до 1,05 % в среднем по вариантам с применением минеральных удобрений. Наибольшее содержание золы в зерне обнаружено в варианте N₆₀P₁₅₀K₆₀, наименьшее в варианте N₃₀P₃₀K₃₀.

Математически доказуемое влияние минеральные удобрения оказывали на содержание в зерне озимой ржи сырого белка и золы (формулы 33, 34, приложение О). Содержание крахмала не зависело от доз и соотношений минеральных удобрений. Содержание сырого белка увеличивалось под действием азотных удобрений, содержание золы зависело от доз и соотношений фосфорных

и калийных. Действием удобрений можно объяснить 61 % изменения содержания сырого белка по опыту и 71 % изменения содержания зольных веществ. Формой уравнения, наиболее достоверно описывающей действие удобрений на содержание сырого белка, была форма 0,5-1 степени. Для содержания золы обе формы уравнения оказались пригодными: различий между стандартными ошибками оценки регрессии не обнаружено, разница между значениями коэффициента детерминации составила 0,001. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$\text{Сырой белок} = 11,62 - 0,360 \times P^{0,5} + 0,265 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,61; \varepsilon=1,4 \%) \quad (33)$$

$$\text{Зола} = 0,97 + 0,009 \times P^2 + 0,008 \times K^2 - 0,013 \times PK \quad (R^2=0,71; \varepsilon=2,4 \%) \quad (34)$$

где: Сырой белок, Зола – содержание сырого белка и золы в зерне, %;

11,62, 0,97 – значения показателей на контроле (теоретические);

N, P, K – дозы азотных, фосфорных и калийных удобрений в кодированном виде (от 0 до 5);

0,360...-0,013 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

На рисунке 16 представлена зависимость содержания сырого белка от доз и соотношений азота и фосфора. При внесении одних фосфорных удобрений происходит снижение содержания белка, при добавлении азотных удобрений происходит постепенное повышение величины показателя. Многими исследователями отмечается высокая связь между дозами азотных удобрений и содержанием белка (Крищенко, Ушакова, 1986; Иванова, 1988; Башков, 2000; Завалин, Пасынков, 2009; Конова и др., 2011; Пасынков, Пасынкова, 2011, 2016; Ненайденко, Ильин, 2017; Darby et al., 2019), в то время как по результатам наших исследований она опосредованная через сочетание азотных удобрений с фосфорными. В исследованиях О.И. Акимовой (2013) на каштановой почве такая связь, наоборот, прослеживается: содержание белка в зерне ржи при применении

N_{60} составила 15,96 %, при добавлении к этой дозе азота фосфора и калия в дозах по 60 и 90 кг/га соответственно содержание белка понизилось до 15,48 %. В.Г. Сычев и Н.А. Кирпичников (2009) указывают на то, что снижение содержания белка в таком случае происходит за счёт снижения отношения органического фосфора к неорганическому, вследствие чего происходит торможение процесса синтеза белка. А.М. Конова и др. (2011) приводит регрессионное уравнение, по которому низкие дозы азотных удобрений не оказывают положительного влияния на содержание белка в зерне озимой ржи за счёт более быстрого нарастания прибавок урожайности. Данная закономерность прослеживается и по результатам наших исследований.

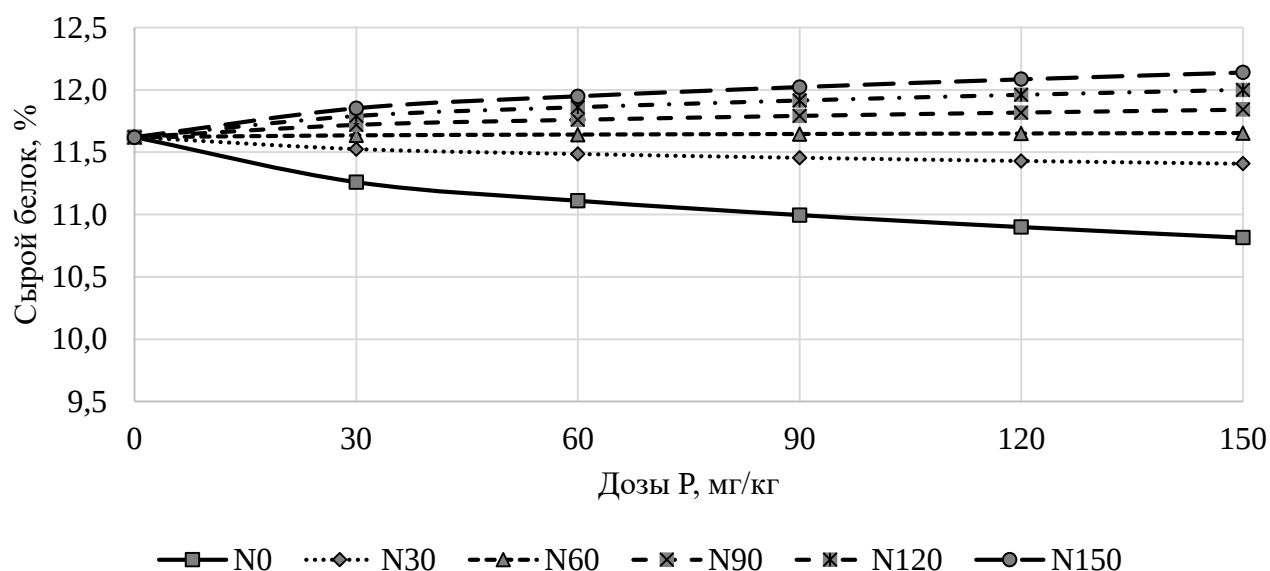


Рисунок 16 – Влияние азотных и фосфорных удобрений на содержание белка в зерне озимой ржи (расчётные данные)

Содержание золы увеличивалось при применении фосфорных и калийных удобрений как по отдельности, так и вместе (рисунок 17). Интересно отметить, что при совместном внесении фосфора и калия увеличение показателя происходило с меньшей интенсивностью, чем при применении указанных удобрений по отдельности.

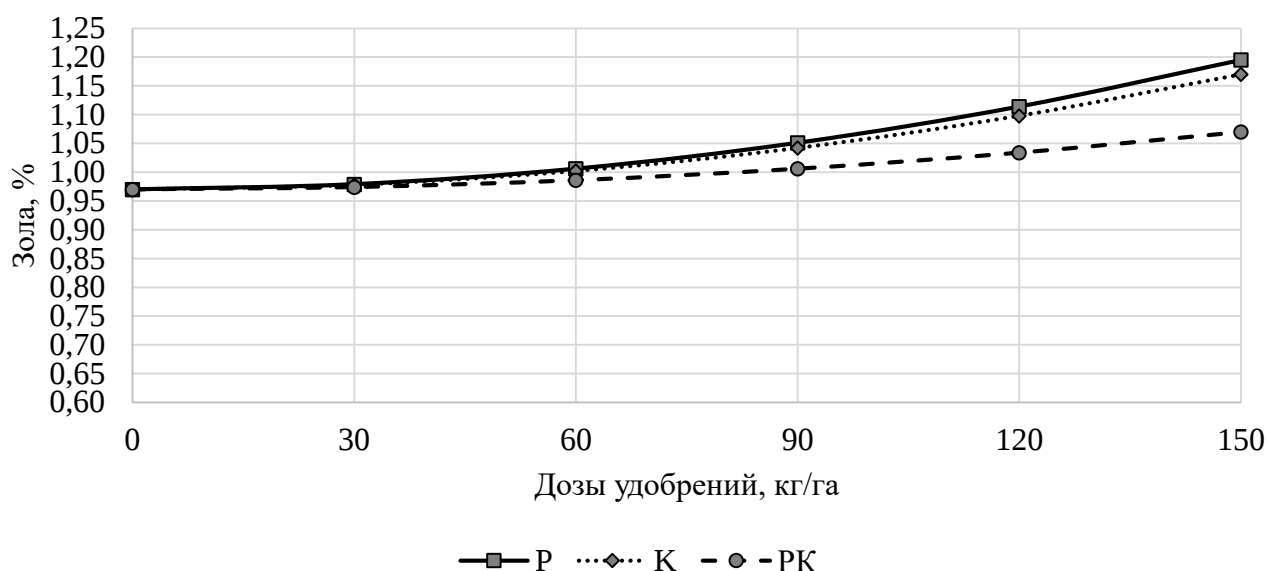


Рисунок 17 – Влияние фосфорных и калийных удобрений на содержание золы в зерне озимой ржи (расчётные данные)

Критические аминокислоты (лизин, метионин, триптофан) лимитируют использование других аминокислот для синтеза молекул белка, в связи с чем их содержание является важной характеристикой качества продовольственного зерна, которое является основным их источником для человека. Содержание в зерне лизина изменялось с 4,43 до 5,10 г/кг, метионина с 2,05 до 2,35 г/кг, триптофана с 1,32 до 1,50 г/кг. Содержание всех критических аминокислот в среднем по вариантам с применением минеральных удобрений уменьшалось относительно контроля (таблица 21). Максимальное содержание по всем критическим аминокислотам наблюдалось в варианте $N_{120}P_{120}K_{120}$, минимальное по лизину и метионину – в варианте $P_{90}K_{90}$, по триптофану – в варианте P_{90} . Сумма критических аминокислот изменялась с 7,83 до 8,95 г/кг, максимальное и минимальное значения также наблюдались в вариантах $N_{120}P_{120}K_{120}$ и $P_{90}K_{90}$ соответственно.

Таблица 21 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на содержание критических аминокислот в зерне озимой ржи, 2021 г.

Вариант	Лизин		Метионин		Триптофан		Сумма критических аминокислот	
	г/кг а.с.в	г/кг белка	г/кг а.с.в	г/кг белка	г/кг а.с.в	г/кг белка	г/кг а.с.в	г/кг белка
Без удобрений	4,96	42,1	2,31	19,6	1,49	12,6	8,76	74,3
K ₉₀	4,73	41,8	2,21	19,5	1,39	12,3	8,33	73,7
P ₉₀	4,55	41,0	2,13	19,2	1,32	11,9	8,00	72,2
P ₉₀ K ₉₀	4,43	41,8	2,05	19,3	1,35	12,7	7,83	73,8
N ₉₀	4,88	41,3	2,25	19,1	1,42	12,0	8,55	72,4
N ₉₀ K ₉₀	4,70	40,7	2,22	19,2	1,41	12,2	8,33	72,2
N ₉₀ P ₉₀	4,82	41,4	2,21	19,0	1,40	12,0	8,43	72,4
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	4,87	41,5	2,30	19,6	1,49	12,7	8,66	73,7
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	4,86	42,5	2,25	19,7	1,45	12,7	8,56	74,9
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	4,79	41,4	2,22	19,2	1,42	12,3	8,43	72,8
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	4,77	41,8	2,18	19,1	1,42	12,4	8,37	73,3
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	4,94	41,2	2,30	19,2	1,46	12,2	8,70	72,6
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	4,94	41,6	2,28	19,2	1,49	12,6	8,71	73,4
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	4,88	41,4	2,27	19,3	1,43	12,1	8,58	72,8
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	4,85	40,5	2,24	18,7	1,43	11,9	8,52	71,1
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	5,10	41,0	2,35	18,9	1,50	12,1	8,95	71,9
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	4,91	41,9	2,25	19,2	1,43	12,2	8,59	73,2
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	4,88	42,3	2,26	19,6	1,45	12,6	8,59	74,4
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	4,66	41,1	2,16	19,1	1,38	12,2	8,20	72,4
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	4,82	40,7	2,24	18,9	1,46	12,3	8,52	71,9
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	4,95	41,3	2,30	19,2	1,47	12,3	8,72	72,8
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	4,99	41,7	2,32	19,4	1,46	12,2	8,77	73,3
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	4,93	41,8	2,25	19,1	1,44	12,2	8,62	73,1
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	4,98	41,5	2,29	19,1	1,45	12,1	8,72	72,7
Среднее	4,84	40,5	2,24	19,2	1,43	12,3	8,52	73,0
V, %	3,0	1,2	2,9	1,3	3,1	2,0	3,0	1,2

Исследования, посвящённые аминокислотному составу зерна, встречаются достаточно редко, поэтому интересно сравнить, как полученные нами данные соотносятся с данными, полученными исследователями в других зонах. Е.П. Кондратенко и др. (2015) показывают, что в условиях лесостепи юго-востока Западной Сибири зерно озимой ржи содержало 1,8-3,1 г/кг лизина, 0,6-1,5 г/кг метионина и 1,1-1,5 г/кг триптофана, зерно озимой пшеницы 4,0-4,6, 2,7-3,4 и 0,9-

1,3 г/кг соответственно. Д.В. Маркевич и др. (2013) приводит для условий республики Беларусь следующие данные: содержание лизина и метионина (на воздушно-сухое вещество) для озимой ржи 2,0-3,3 и 0,8-2,0 г/кг, для озимой пшеницы 2,0-3,5 и 1,0-1,8 г/кг соответственно. В.П. Крищенко и Т.Ф. Ушакова (1986) при обобщении данных по различным почвенно-климатическим регионам СССР указывают, что на различных фонах минерального питания содержание в зерне озимой ржи лизина изменялось в диапазоне 4,5-5,8 г/кг, метионина 1,08-2,25 г/кг. При анализе вышеперечисленных данных стоит отметить, что по своему аминокислотному составу зерно озимой ржи, полученное в нашем опыте, соотносится с результатами других исследователей.

Результаты регрессионного анализа по влиянию исследуемых видов минеральных удобрений на содержание критических аминокислот представлены в формулах 35-38 и приложении О. Интересно отметить, что в регрессионные уравнения вошли те же дозы и сочетания минеральных удобрений, что и в формулу, описывающую содержание сырого белка в зависимости от исследуемых минеральных удобрений. Данная закономерность прослеживается также в результатах исследований В.П. Крищенко и Т.Ф. Ушакова (1986). Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$\text{Лизин} = 4,90 - 0,122 \times P - 0,130 \times K^{0,5} + 0,102 \times NP^{0,5} + 0,100 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,76; \varepsilon=1,0 \%) \quad (35)$$

$$\text{Метионин} = 2,23 - 0,035 \times P + 0,046 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,57; \varepsilon=1,4 \%) \quad (36)$$

$$\text{Триптофан} = 1,45 - 0,040 \times P - 0,019 \times K + 0,022 \times NP^{0,5} + 0,042 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,69; \varepsilon=1,4 \%) \quad (37)$$

$$\text{СКА} = 8,63 - 0,216 \times P - 0,214 \times K^{0,5} + 0,167 \times NP^{0,5} + 0,179 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,76; \varepsilon=1,0 \%) \quad (38)$$

где: лизин, метионин, триптофан, СКА – содержание лизина, метионина триптофана и суммы критических аминокислот в зерне озимой ржи, г/кг;

4,90, 2,23, 1,45, 8,63 – расчётное (теоретическое) значение для варианта без удобрений;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений и их сочетаний в кодированном виде (количество единичных доз);

-0,122... 0,179 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

Визуализация уравнений 36 представлена на рисунке 18. Внесение фосфорных и калийных удобрений снижало содержание СКА в зерне озимой ржи. При внесении азотных удобрений негативное действие фосфорных нивелировалось и при дозе азота 120 кг/га д.в. полностью прекратилось на всём диапазоне доз фосфора.

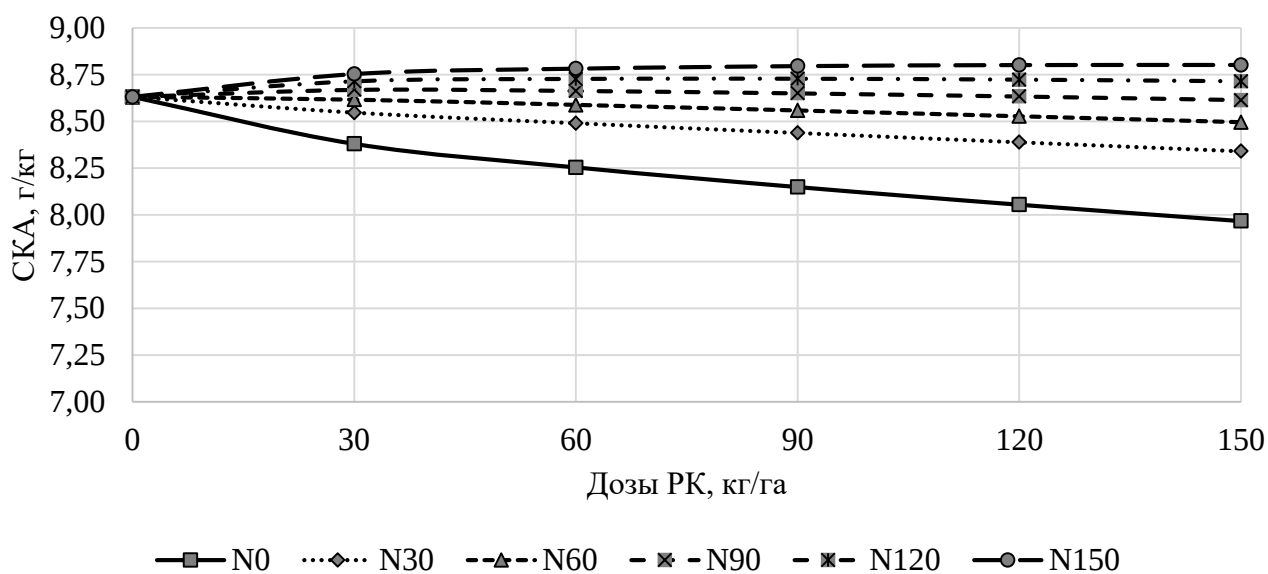


Рисунок 18 – Влияние азотных, фосфорных и калийных удобрений на суммы критических аминокислот в зерне озимой ржи (расчётные данные)

В агрономической практике важной составляющей является не только получение высокого качества зерна, но и получение общего выхода зерна с единицы площади, обладающего требуемыми показателями. Наибольший сбор сырого белка был получен в варианте N₉₀ и был в 1,9 раз больше, чем в варианте P₉₀K₉₀, где сбор сырого белка был наименьшим (таблица 22). Наибольший сбор по

всем трём показателям отмечается в варианте N₉₀, где увеличение сбора относительно контроля составило 71 % для сырого белка, 68 % для суммы критических аминокислот и 94 % для крахмала.

Таблица 22 – Сбор сырого белка, суммы критических аминокислот и крахмала с урожаем озимой ржи, 2021 г.

Вариант	Сырой белок	Сумма критических аминокислот	Крахмал
	кг/га		т/га
Без удобрений	207	15,3	0,89
K ₉₀	209	15,4	0,97
P ₉₀	188	13,5	0,98
P ₉₀ K ₉₀	186	13,7	0,91
N ₉₀	355	25,7	1,73
N ₉₀ K ₉₀	314	22,7	1,52
N ₉₀ P ₉₀	253	18,4	1,21
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	269	19,9	1,27
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	234	17,5	1,11
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	239	17,4	1,12
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	233	17,1	1,16
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	251	18,2	1,16
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	262	19,2	1,14
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	238	17,3	1,07
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	349	24,8	1,62
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	330	23,8	1,40
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	280	20,5	1,27
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	254	19,0	1,16
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	245	17,8	1,17
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	262	18,7	1,23
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	245	17,8	1,14
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	266	19,5	1,26
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	267	19,5	1,24
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	278	20,2	1,22
Среднее	259	18,9	1,21
V, %	17,0	16,4	16,8

В приложении II приведена матрица линейной корреляции показателей качества с агрохимическими показателями и урожайностью зерна и зелёной массы. Интересно отметить следующие обнаруженные связи:

1. Обратная связь между натурой зерна, «Числом падения» и урожайностью как надземной массы, так и зерна. По шкале Чеддока, корреляционная связь между натурой зерна и урожайностью в разные фазы средняя и высокая (-0,60; -0,53; -0,77), между ЧП и урожайностью в разные фазы связь менее тесная – слабая и средняя (-0,44; -0,51; -0,58). Интересно отметить обратную связь средней силы между натурой зерна и «Числом падения» с величиной гидролитической кислотности.

2. Для массы 1000 зёрен отмечена высокая положительная связь с содержанием подвижного фосфора в почве (0,70), что объясняет достоверное влияние фосфорных удобрений на величину показателя (формула 28).

3. Обнаружена закономерно высокая (триптофан) и очень высокая (лизин, метионин, СКА) связь аминокислот и содержания белка в зерне.

4. Содержание белка имеет обратную связь слабой и средней силы с натурой зерна и «Числом падения» (-0,47 и -0,62). На аналогичную закономерность указывают А.В. Пасынков и Е.Н. Пасынкова (2011).

5. Между натурой зерна и «Числом падения» отмечена прямая сильная связь (0,71).

Заключение по Главе 5

В условиях вегетационного периода 2020-2021 гг. во всех вариантах получено зерно озимой ржи, пригодное для использования на продовольственные цели. Зерно первого класса было получено в вариантах без применения удобрений, K_{90} и $N_{30}P_{120}K_{30}$. Снижение натуры зерна и «Числа падения» произошло за счёт применения азотных удобрений. Для получения зерна 2 класса качества необходимо применять азотные удобрения в дозах до 90 кг/га д.в. включительно. Содержание сырого белка линейно увеличивалось под действием азотных удобрений. Содержание золы в зерне увеличивалось при совместном внесении РК начиная с дозы фосфора 90 кг/га д.в. Содержание крахмала не зависело от доз минеральных удобрений. Максимальное содержание в зерне суммы критических аминокислот было отмечено в варианте с применением

$N_{120}P_{120}K_{120}$. Содержание лизина и метионина увеличивалось под действием азотных удобрений и снижалось под действием фосфорных. Наибольший сбор сырого белка, суммы критических аминокислот и крахмала был отмечен в варианте N_{90} .

ГЛАВА 6 СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В РАСТЕНИЯХ ОЗИМОЙ РЖИ

Среди факторов, участвующих в формировании урожайности, важное место занимает оптимальная обеспеченность растений элементами питания в соотношениях, наиболее близких к требованиям растений. Негативное влияние на рост и развитие растений может отмечаться как при избытке, так и недостатке определённого элемента питания. Поступление элемента в растение лимитируется разными факторами и является важнейшей характеристикой уровня минерального питания растений. В.В. Церлинг (1990) на основании обобщения большого массива данных по разным почвенно-климатическим зонам бывшего СССР предложена градация валового содержания основных элементов питания для различных культур в определённые фазы их роста и развития. Оптимальное содержание элементов питания по этой градации выявлено на основании того, что при таких концентрациях элементов минерального питания наблюдается максимальная продуктивность растений. Оптимальное содержание для озимой ржи по вышеуказанным данным следующее:

1. Азот общий – выход в трубку 3,2-3,8 %, колошение 1,5 %;
2. Фосфор общий – выход в трубку 0,35-0,45 %, колошение 0,28-0,35 %;
3. Калий общий – выход в трубку 2,9-3,3 %, колошение 1,7-2,3 %.

В таблице 23 представлено содержание валовых (общих) форм азота, фосфора и калия в зелёной массе озимой ржи в среднем за 2 года исследований. В фазу выхода в трубку содержание азота в варианте без удобрений составило 3,17 %, при применении удобрений изменялось в диапазоне от 3,03 до 3,52. По всем вариантам опыта, за исключением вариантов K_{90} и $N_{30}P_{30}K_{120}$, содержание азота можно оценить как оптимальное. В вышеуказанных вариантах, где содержание ниже оптимального, содержание азота не опускается до низкого уровня. Содержание фосфора и калия в зелёной массе в фазу выхода в трубку, которое изменяется по вариантам опыта в диапазонах 0,80-1,11 и 5,22-6,99 %, соответственно, можно оценить как избыточное. В фазу колошения содержание

НРК в растениях изменялось в следующих диапазонах: азот 1,60-2,23 %, фосфор 0,36-0,54 %, калий 2,32-3,78 %. По градации предложенной В.В. Церлинг, содержание элементов питания можно оценить как выше оптимального для азота (выше оптимального уровня, но ниже избытка), преимущественно выше оптимального для фосфора (в вариантах $N_{60}P_{150}K_{60}$ и $N_{150}P_{150}K_{150}$ отмечается избыток), преимущественно избыток для калия (за исключением варианта $N_{90}P_{90}$).

Таблица 23 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на содержание НРК в надземной массе озимой ржи по фазам развития, %, 2019 и 2021 гг.

Вариант	Выход в трубку			Колошение		
	N	P	K	N	P	K
Без удобрений	3,17	0,84	5,83	1,60	0,40	2,62
K_{90}	3,03	0,80	6,01	1,63	0,41	3,07
P_{90}	3,18	0,97	5,68	1,93	0,49	2,77
$P_{90}K_{90}$	3,27	1,03	6,66	1,92	0,45	3,17
N_{90}	3,40	0,96	5,22	1,91	0,36	2,65
$N_{90}K_{90}$	3,25	0,94	6,09	1,82	0,40	3,31
$N_{90}P_{90}$	3,17	0,98	5,87	1,87	0,49	2,32
$N_{90}P_{90}K_{90}$	3,30	0,97	6,57	1,88	0,46	3,16
$N_{30}P_{30}K_{30}$	3,20	0,83	5,75	1,97	0,42	2,92
$N_{30}P_{30}K_{120}$	3,08	0,95	6,75	1,63	0,41	3,11
$N_{30}P_{120}K_{30}$	3,28	1,09	6,09	1,68	0,48	2,78
$N_{30}P_{120}K_{120}$	3,20	1,03	6,33	1,82	0,48	3,16
$N_{120}P_{30}K_{30}$	3,52	0,89	5,53	1,88	0,43	2,98
$N_{120}P_{30}K_{120}$	3,30	0,95	6,51	1,87	0,40	3,62
$N_{120}P_{120}K_{30}$	3,42	1,04	5,48	1,72	0,45	2,75
$N_{120}P_{120}K_{120}$	3,20	1,07	6,71	2,03	0,46	3,31
$N_{60}P_{60}K_{60}$	3,27	0,92	5,89	1,75	0,42	3,03
$N_{60}P_{60}K_{150}$	3,23	0,90	6,51	1,68	0,39	2,87
$N_{60}P_{150}K_{60}$	3,25	1,10	6,34	1,93	0,50	2,65
$N_{60}P_{150}K_{150}$	3,20	1,11	6,58	1,92	0,49	3,23
$N_{150}P_{60}K_{60}$	3,43	0,88	5,48	1,86	0,40	3,08
$N_{150}P_{60}K_{150}$	3,25	0,91	6,84	2,12	0,47	3,46
$N_{150}P_{150}K_{60}$	3,50	1,08	6,05	1,87	0,48	2,64
$N_{150}P_{150}K_{150}$	3,33	1,08	6,99	2,23	0,54	3,78
Среднее	3,27	0,97	6,16	1,86	0,45	3,02
V, %	3,67	9,35	8,03	8,25	9,96	11,38

Как было показано ранее, в главе 3.3, на конец пятой ротации севооборота обеспеченность подвижными формами фосфора была от высокой до очень высокой, калия от повышенной до очень высокой. В связи с этим закономерно, что содержание в растениях фосфора и калия высокое и даже избыточное. Этим же можно объяснить негативное влияние фосфорных удобрений на урожайность и отсутствие такого влияния у калийных удобрений. Оптимальное содержание азота, в том числе в вариантах без внесения азотных удобрений, на наш взгляд является некоторой аномалией. Из возможных причин такой закономерности можно отметить влияние предшествующего озимой ржи в севообороте чистого пара. Исследованиями Н.Е. Завьяловой и О.В. Ивановой (2020) установлено, что в паровом поле вне зависимости от доз минеральных удобрений, внесенных ранее, нитрификационная способность по Кравкову характеризовалась как высокая (32,9-45,4 мг/кг N-NO₃). Интенсивность разложения клетчатки характеризовалась авторами как высокая, обеспеченность ржи минеральным азотом как средняя. Содержание минерального азота перед посевом и в фазу весеннего кущения составило на контроле 35,0 и 26,2 мг/кг соответственно, что и могло быть причиной оптимального содержания азота в растениях озимой ржи по годам исследования.

Результаты регрессионного анализа по влиянию минеральных удобрений на накопление элементов питания в зелёной массе озимой ржи представлены в формулах 39-44 и приложении Р. На накопление NPK оказывали влияние все изучаемые в опыте виды удобрений. Основной вклад в увеличение азота, фосфора и калия в зелёной массе озимой ржи принадлежал соответственно азотным, фосфорным и калийным удобрениям (рисунок 19) Влияние минеральных удобрений лучше прослеживалось в фазу выхода в трубку, так как для уравнений, полученных в эту фазу, характерен более высокий коэффициент детерминации, чем для уравнений, полученных для фазы колошения. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$N_{\text{выход в трубку}} = 3,16 + 0,084 \times N + 0,126 \times K^{0,5} - 0,122 \times K - 0,070 \times NP^{0,5} + 0,081 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,86; \varepsilon=1,0 \%) \quad (39)$$

$$P_{\text{выход в трубку}} = 0,82 + 0,074 \times N^{0,5} - 0,075 \times P^{0,5} + 0,103 \times P - 0,051 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,90; \varepsilon=2,3 \%) \quad (40)$$

$$K_{\text{выход в трубку}} = 5,76 - 0,149 \times N + 0,060 \times P + 0,140 \times K + 0,039 \times NK \quad (R^2=0,83; \varepsilon=2,7 \%) \quad (41)$$

$$N_{\text{колошение}} = 1,82 - 0,059 \times K + 0,016 \times NK + 0,010 \times PK \quad (R^2=0,58; \varepsilon=4,2 \%) \quad (42)$$

$$P_{\text{колошение}} = 0,42 - 0,013 \times N + 0,022 \times P - 0,012 \times K + 0,004 \times NK \quad (R^2=0,80; \varepsilon=3,8 \%) \quad (43)$$

$$K_{\text{колошение}} = 2,73 + 0,075 \times K - 0,017 \times NP + 0,032 \times NK \quad (R^2=0,75; \varepsilon=4,3 \%) \quad (44)$$

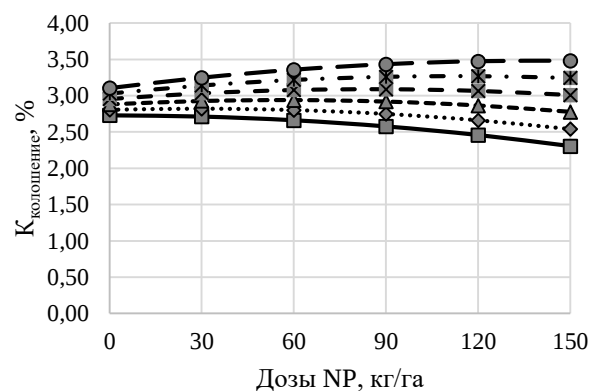
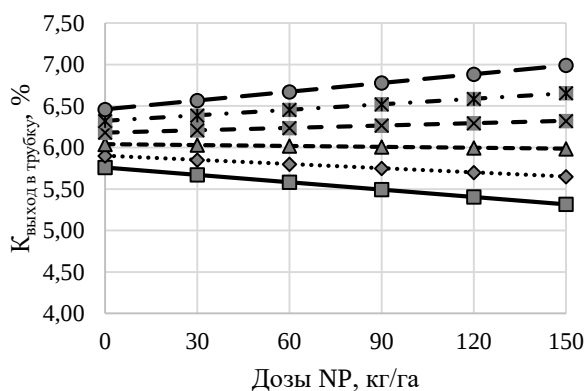
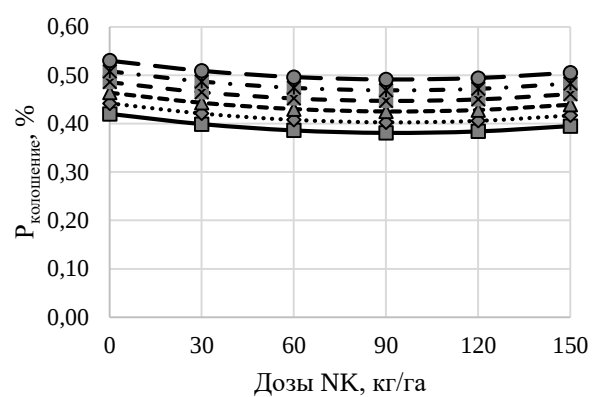
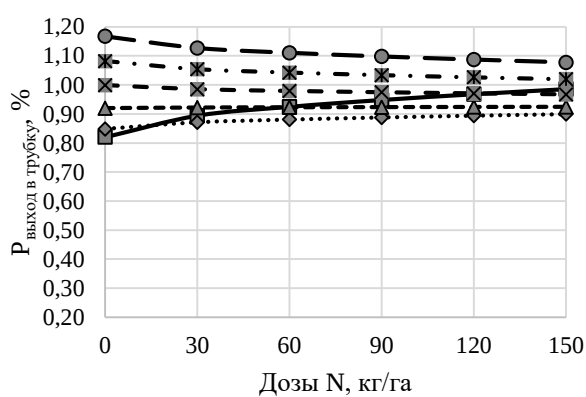
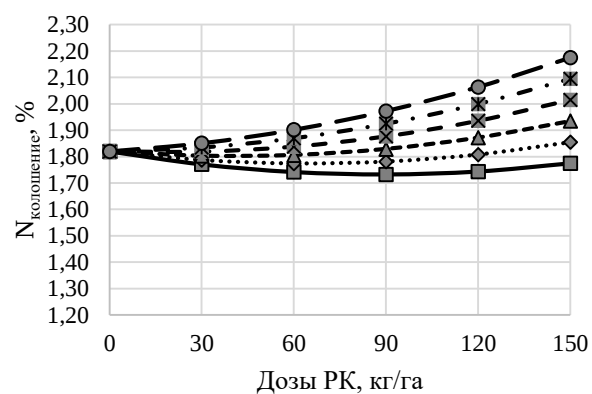
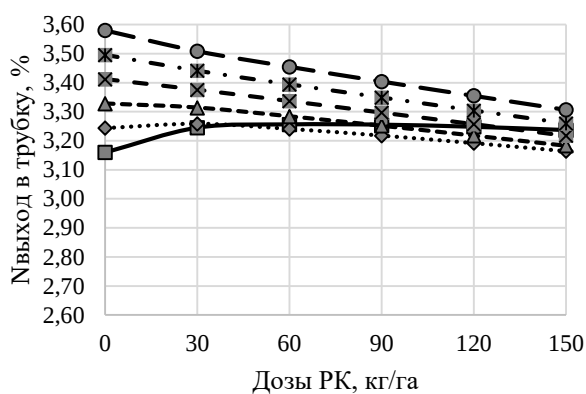
где: $N_{\text{выход в трубку}}$, $P_{\text{выход в трубку}}$, $K_{\text{выход в трубку}}$, $N_{\text{колошение}}$, $P_{\text{колошение}}$, $K_{\text{колошение}}$ – содержание азота, фосфора и калия в надземной массе озимой ржи по фазам развития, %;

3,16, 0,82, 5,76, 1,82, 0,42, 2,73 – расчётное (теоретическое) значение для варианта без удобрений;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений и их сочетаний в кодированном виде (количество единичных доз);

0,084... 0,032 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

Интересно отметить следующую закономерность. Формой уравнения, наилучшим образом описывающей действие минеральных удобрений на содержание в растениях азота и фосфора, в фазу выхода в трубку является форма 0,5-1 степени, а в фазу колошения форма 1-2 степени. Для содержания калия в обе фазы наилучшей была форма 1-2 степени.



а – N, выход в трубку, б – N, колошение, в – P, выход в трубку, г – P, колошение, д – K, выход в трубку, е – K, колошение

Рисунок 19 – Влияние доз минеральных удобрений на содержание NPK в надземной массе озимой ржи по фазам развития (расчётные данные)

Важной характеристикой минерального питания является не только содержание элементов в растении, но и соотношении их между собой. Как показывает в своих работах Г.Я. Елькина (2008, 2011) взаимодействие элементов в зависимости от их концентрации может носить как синергетический, так и антагонистический характер. Основываясь на данных В.В. Церлинг (1990), оптимальное соотношение элементов будет следующим:

1. N/P – выход в трубку 7,1-10,9, колошение 4,3-5,4;
2. N/K – выход в трубку 0,97-1,3, колошение 0,65-0,9;
3. P/K – выход в трубку 0,11-0,16, колошение 0,12-0,21.

Избыточное содержание фосфора и калия в надземной массе озимой ржи привело к нарушению сбалансированности по N/P и N/K в фазу выхода в трубку (таблица 24). К фазе колошения за счёт более резкого снижения концентрации фосфора и калия, чем азота в некоторых вариантах было получено оптимальное или близкое к оптимальному соотношение элементов. Соотношение P/K в обе фазы развития было оптимальным, интересно отметить, что в среднем по опыту в фазу выхода в трубку соотношение установилось ближе к верхней границе оптимального, в то время как в фазу колошения наоборот установилось ближе к нижней границы оптимального соотношения.

Таблица 24 – Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на соотношение NPK в надземной массе озимой ржи по фазам развития, 2019 и 2021 гг.

Вариант	Выход в трубку			Колошение		
	N/P	N/K	P/K	N/P	N/K	P/K
Без удобрений	3,779	0,544	0,144	4,054	0,611	0,151
K ₉₀	3,776	0,503	0,133	3,973	0,531	0,134
P ₉₀	3,270	0,560	0,171	3,936	0,697	0,177
P ₉₀ K ₉₀	3,175	0,491	0,155	4,317	0,607	0,141
N ₉₀	3,538	0,651	0,184	5,316	0,721	0,136
N ₉₀ K ₉₀	3,461	0,534	0,154	4,553	0,550	0,121
N ₉₀ P ₉₀	3,252	0,541	0,166	3,858	0,806	0,209
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	3,398	0,502	0,148	4,084	0,594	0,145
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	3,837	0,556	0,145	4,750	0,675	0,142
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	3,250	0,456	0,140	3,973	0,523	0,132
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	3,002	0,538	0,179	3,497	0,604	0,173

Продолжение таблицы 24

Вариант	Выход в трубку			Колошение		
	N/P	N/K	P/K	N/P	N/K	P/K
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	3,102	0,505	0,163	3,834	0,576	0,150
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	3,961	0,636	0,160	4,421	0,631	0,143
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	3,477	0,507	0,146	4,678	0,517	0,111
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	3,289	0,625	0,190	3,868	0,627	0,162
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	2,995	0,477	0,159	4,459	0,613	0,138
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	3,555	0,555	0,156	4,220	0,579	0,137
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	3,579	0,496	0,139	4,360	0,585	0,134
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,952	0,513	0,174	3,858	0,727	0,188
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,879	0,486	0,169	3,961	0,595	0,150
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	3,897	0,627	0,161	4,718	0,605	0,128
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	3,556	0,475	0,134	4,513	0,613	0,136
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	3,236	0,578	0,179	3,898	0,710	0,182
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	3,069	0,476	0,155	4,127	0,590	0,143
Среднее	3,387	0,535	0,159	4,218	0,620	0,148
V, %	9,31	10,35	9,98	9,57	11,36	15,35

Содержание в зерне озимой ржи азота изменялось от 1,76 до 2,33 %, фосфора от 0,71 до 1,07 %, калия от 0,52 до 0,59 % (таблица 25). Содержание NPK в соломе варьировало в диапазоне от 0,51 до 0,90, от 0,14 до 0,30 и от 1,45 до 2,15 % соответственно. Коэффициент использования элементов питания из минеральных удобрений (КИУ) зависел от доз соответствующих элементов: так при дозе азота 30 кг/га отмечен наибольший КИУ (общий 41,3-81,1 %, для зерна 31,5-62,6 %), при дозе азота 150 кг/га общий КИУ составил 9,8-19,2, для зерна 5,8-11,0 %. Аналогичная закономерность изменения КИУ отмечена для фосфорных и калийных удобрений. Средние значения КИУ для зерна составили 21,0 %, 5,3 % и 3,1 % азота, фосфора и калия; для соломы средние значения КИУ составили 10,5, 2,9 и 26,6 % соответственно.

Таблица 25 – Содержание NPK в зерне и соломе, коэффициенты использования из удобрений (КИУ) элементов питания, в среднем за 2019 и 2021 гг., %

Вариант	Содержание NPK						КИУ					
	зерно			солома			общий (солома + зерно)			зерно		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Без удобрений	1,85	0,82	0,56	0,55	0,18	1,45	–	–	–	–	–	–
K ₉₀	1,94	0,74	0,59	0,52	0,20	1,51	–	–	7,2	–	–	1,6
P ₉₀	1,76	0,96	0,58	0,51	0,19	1,53	–	5,3	–	–	4,5	–
P ₉₀ K ₉₀	1,88	0,83	0,55	0,58	0,20	1,50	–	2,2	4,2	–	1,1	0,3
N ₉₀	2,20	0,72	0,54	0,63	0,15	1,60	40,8	–	–	29,7	–	–
N ₉₀ K ₉₀	2,16	0,79	0,57	0,70	0,19	2,03	36,8	–	45,6	24,3	–	4,7
N ₉₀ P ₉₀	2,19	0,87	0,55	0,74	0,21	1,99	21,3	4,7	–	12,8	3,1	
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	2,33	0,83	0,56	0,79	0,25	1,87	27,5	5,7	21,6	17,0	2,4	1,4
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	2,01	0,83	0,56	0,55	0,20	1,73	50,5	18,7	68,3	39,5	12,4	7,5
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	1,94	0,71	0,53	0,55	0,15	1,67	41,3	1,8	14,1	31,5	1,5	1,1
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,03	0,92	0,57	0,74	0,23	1,88	67,6	6,7	80,5	36,8	4,4	7,6
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	2,20	0,88	0,55	0,59	0,20	1,89	81,1	6,5	24,1	62,6	4,9	2,1
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	2,15	0,83	0,53	0,73	0,27	1,58	21,6	27,7	53,0	13,4	13,2	6,3
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	2,26	0,84	0,57	0,90	0,21	1,65	21,7	12,5	10,0	11,1	7,5	1,1
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	2,02	0,88	0,54	0,69	0,27	1,58	21,2	9,7	66,0	13,0	5,5	9,7
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	2,28	0,92	0,54	0,82	0,22	1,70	26,8	7,5	16,8	16,0	5,3	1,8
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,96	0,85	0,56	0,54	0,21	1,75	19,3	9,0	31,7	15,4	6,0	3,0
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	2,13	0,82	0,52	0,61	0,14	1,67	30,1	4,2	10,5	22,2	4,9	0,7
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,03	1,07	0,57	0,62	0,24	1,68	29,6	8,4	32,1	20,2	6,4	4,4
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,01	0,90	0,56	0,67	0,21	1,61	33,2	5,2	11,3	20,4	3,7	1,6
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	2,05	0,87	0,55	0,68	0,17	1,89	9,8	5,2	32,8	5,8	4,9	1,7
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	2,21	0,83	0,54	0,82	0,20	1,83	19,2	9,2	15,4	11,0	6,1	1,1
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	2,21	1,00	0,55	0,73	0,22	1,74	15,4	6,2	29,8	9,8	4,7	2,5
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	2,17	0,96	0,57	0,87	0,30	2,15	15,6	6,2	18,8	7,6	3,4	0,9
Среднее	2,08	0,86	0,55	0,67	0,21	1,73	31,5	8,1	29,7	21,0	5,3	3,1

В формулах 45-47, приложении Р и на рисунке 20 представлена зависимость содержания NPK в зерне от применяемых в опыте видов и соотношений удобрений. Азотные удобрения увеличили содержание азота, фосфорные удобрения увеличили содержание фосфора, однако при внесении азотных и калийных удобрений содержание фосфора снизилось при минимальной дозе и затем не изменялось. Содержание калия в зерне изменялось в очень узком диапазоне, в связи с этим было получено регрессионное уравнение относительно

низкого «качества». Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая для всех регрессионных уравнений.

$$N_{\text{зерно}} = 1,86 + 0,163 \times N - 0,021 \times N^2 \quad (R^2=0,63; \varepsilon=3,3 \%) \quad (45)$$

$$P_{\text{зерно}} = 0,83 - 0,060 \times N^{0,5} + 0,040 \times P - 0,039 \times K + 0,052 \times NK^{0,5} \quad (R^2=0,86; \varepsilon=2,5 \%) \quad (46)$$

$$K_{\text{зерно}} = 0,57 - 0,020 \times N^{0,5} + 0,009 \times P + 0,010 \times NK^{0,5} - 0,013 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,44; \varepsilon=1,9 \%) \quad (47)$$

где: $N_{\text{зерно}}$, $P_{\text{зерно}}$, $K_{\text{зерно}}$ – содержание азота, фосфора и калия в зерне озимой ржи, %;

1,86, 0,83, 0,57 – расчётное (теоретическое) значение для варианта без удобрений;

N, P, K – дозы азотных, фосфорных, калийных удобрений и их сочетаний в кодированном виде (количество единичных доз);

0,163...-0,013 – коэффициенты, характеризующие действие удобрений.

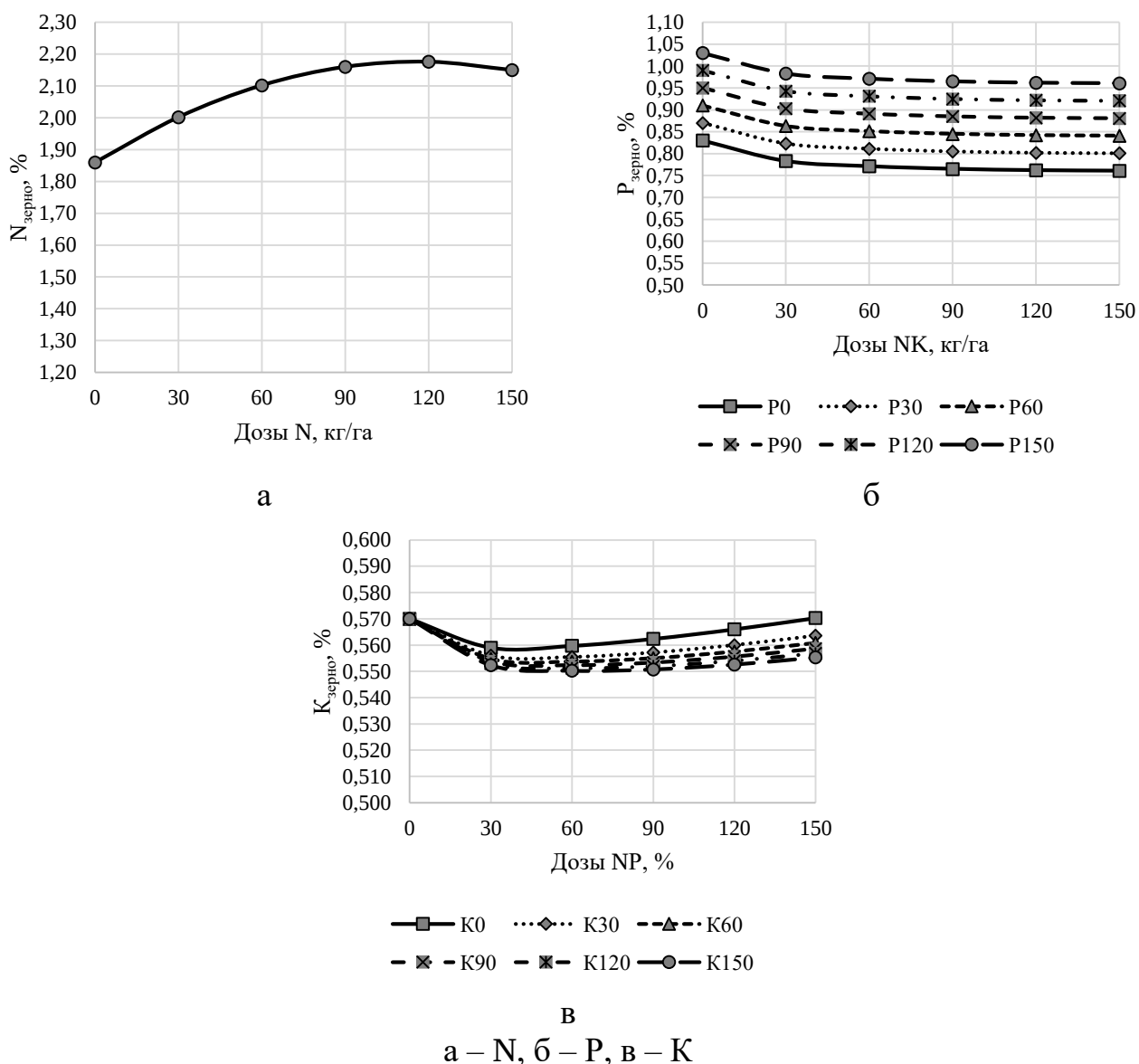


Рисунок 20 – Влияние доз минеральных удобрений на содержание NPK в зерне озимой ржи (расчётные данные)

В приложении С представлена матрица коэффициентов линейной корреляции между агрохимическими показателями, урожайностью, показателями качества и содержанием, и соотношением элементов питания в растениях озимой ржи. Следует отметить следующие математические достоверные связи:

1. Между содержанием азота в фазу выхода в трубку и урожайностью зелёной массы в обе фазы отбора (связь прямая умеренная $r=0,41$ и $0,48$). В виду отсутствия корреляционной связи с урожайностью зерна можно предположить, что на ранних этапах развития озимой ржи содержание азота в некоторой степени

определяла величину будущей урожайности, однако в более поздние фазы развития сильное влияние оказали погодные условия.

2. Соотношение Р/К находилось в прямой зависимости от содержания фосфора в фазу выхода в трубку ($r = 0,65$) и в обратной от содержания в эту фазу калия ($r = -0,47$).

3. Между соотношением Р/К в фазу выхода в трубку и урожайностью зерна и надземной массы по обеим фазам (связь прямая, умеренная, $r = 0,41, 0,41$ и $0,48$ соответственно). Ввиду того что связь прямая, можно предположить, что увеличение соотношения, которое происходит при увеличении содержания фосфора и снижении содержания калия, положительно влияет на величину урожая.

4. На содержание фосфора в обе фазы отбора надземной массы и в зерне оказало прямое сильно влияние содержание подвижного фосфора в почве – коэффициенты корреляции составили $0,85, 0,86$ и $0,80$. Содержание подвижного калия в почве оказывало влияние на содержание калия только в надземной массе (прямая сильная связь, $r = 0,82-0,83$), для содержания калия в зерне такой зависимости не отмечено, что закономерно, так как калий накапливается в основном в соломе.

5. Отмечена обратная средняя связь накопления азота в фазу выхода в трубку и в зерне с натурой зерна и ЧП ($r = -0,64$ и $-0,57$ для фазы выхода в трубку и $-0,61$ и $-0,67$ для зерна), что подтверждает закономерность снижения данных технологических показателей качества под действием азотных удобрений.

Заключение по Главе 6

Содержание азота в надземной массе озимой ржи в фазы выхода в трубку и колошения было близким к оптимальному, оптимальным или выше оптимального. Содержание фосфора и калия в обозначенные выше фазы развития было выше оптимального и избыточное. Содержание NPK увеличивалось за счёт применения соответствующих удобрений. Из-за избыточного содержания фосфора и калия в надземной массе были нарушены соотношения N/P и N/K в фазу выходы в трубку, к фазе колошения они приблизились к оптимальному. Содержание азота в зерне

озимой ржи повышалось за счёт применения азотных удобрений, фосфора – за счёт применения фосфорных, при внесении азота происходило некоторое снижение фосфора. Наибольшие коэффициенты использования элементов питания из минеральных удобрений получены при применении минимальных доз азотных удобрений и составили 31,5-62,6 %, для фосфорных и калийных удобрений они изменялись в относительно узком диапазоне. Корреляционный анализ показал, что содержание азота в фазу выходы в трубку в умеренной степени связано с урожайностью надземной массы, а соотношение Р/К в эту фазу с урожайностью зерна. Содержание фосфора и калия в растениях было сильно связано с содержанием подвижных форм этих элементов в почве. Содержание азота в надземной части в фазу выхода в трубку и в зерне находилось в обратной средней связи с «Числом падения» и натурой зерна.

ГЛАВА 7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДОЗ И СООТНОШЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Важнейшим показателем в практике реального применения минеральных удобрений является экономическая эффективность их использования, что особенно важно в условиях существующего диспаритета цен на минеральные удобрения и с.-х. продукцию. В таблице 26 и приложении Т представлен расчёт экономической эффективности применения изучаемых в опыте доз и соотношений минеральных удобрений. Стоимость реализации продукции рассчитывали исходя из закупочных цен АО «Пермский мукомольный завод» для зерна 3 класса качества на март 2023 года – 9500 руб./т (АО Пермский..., 2023).

Таблица 26 – Рентабельность применения различных доз и соотношений минеральных удобрений при возделывании озимой ржи сорта Фалёнская 4 (фактические данные)

Вариант	Рентабельность, %			Вариант	Рентабельность, %		
	2019	2021	Среднее		2019	2021	Среднее
Без удобрений	74	43	60	N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	19	-2	9
K ₉₀	45	15	31	N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	-4	-20	-12
P ₉₀	36	-3	18	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	-13	1	-6
P ₉₀ K ₉₀	13	-16	-1	N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	-23	-16	-20
N ₉₀	46	50	48	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	6	5	6
N ₉₀ K ₉₀	23	21	22	N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	-1	-13	-7
N ₉₀ P ₉₀	0	-6	-3	N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	-2	-20	-11
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	-14	-14	-14	N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	-12	-28	-20
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	48	15	32	N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	-7	-22	-14
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	25	-2	12	N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	-12	-26	-19
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	15	-10	3	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	-22	-29	-25
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	9	-20	-5	N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	-36	-34	-35

В условиях 2019 года наибольшая рентабельность получена по варианту без применения удобрений (74 %). При использовании удобрений происходило существенное снижение рентабельности в 1,6 раза и более. Среди изучаемых в опыте доз удобрений наибольшая рентабельность получена в вариантах K₉₀, N₉₀ и

$N_{30}P_{30}K_{30}$, наименьшая – в варианте $N_{150}P_{150}K_{150}$. Стоит отметить, что в целом возделывание озимой ржи становилось нерентабельным при использовании полного удобрения в дозах от 60 кг/га д. в. и выше.

В условиях 2021 г. рентабельность применения удобрений была ниже по большинству вариантов относительно данных 2019 года, что может быть связано с общим снижением уровня урожайности. Возделывание озимой ржи без применения удобрений в 2021 г. было менее рентабельным, чем при применении N_{90} – при внесении азотных удобрений рентабельность повышалась на 7 %. Применение всех остальных исследуемых доз удобрений снижало рентабельность в 2 и более раз. Наименьшая рентабельность была получена при применении полного минерального удобрения в дозе 150 кг д. в./га. Повышение суммарной дозы NPK более 90 кг д. в./га приводило к нерентабельному возделыванию озимой ржи (кроме варианта $N_{90}K_{90}$ и $N_{60}P_{60}K_{60}$).

В среднем за два года исследований рентабельность возделывания озимой ржи без применения удобрений составила 60 %. Среди исследуемых в опыте доз удобрений рентабельность производства выше 30 % была при внесении K_{90} , $N_{30}P_{30}K_{30}$ и N_{90} . Внесение остальных доз удобрений было низко рентабельным или нерентабельным.

Так как по результатам наших исследований наибольшее влияние на урожайность озимой ржи оказали азотные удобрения, в таблице 27 представлена экономическая эффективность для расчётных значений урожайности по возрастающим дозам азотных удобрений. В расчёт были добавлены также ещё два варианта. Вариант с применением $N_{30}P_{30}K_{30}$ был добавлен так как эту дозу рекомендовали А.И. Косолапова и др. (2013, 2016) по результатам исследований, проведённых в предыдущей ротации. Вариант с применением $N_{30}K_{30}$ был добавлен, так как в главе 3 было выявлено существенное снижение содержание подвижного калия при применении одних азотных удобрений. По расчётным данным наибольшая рентабельность отмечена в варианте без применения удобрений и с увеличением доз данный показатель снижается, однако, даже при использовании 150 кг/га азота, рентабельность остаётся положительной. Среди

доз азотных удобрений по экономической эффективности выделились 2 варианта: N_{30} и N_{60} – разница между значениями рентабельности по ним наименьшая среди изучаемых до (2 %). Стоит так же отметить, что, несмотря на снижение рентабельности, до дозы 60 кг/га д.в. прибыль при реализации зерна растёт. Относительно варианта без применения удобрений она увеличилась при дозе N_{30} на 1630 руб./га (20,5 %), при дозе N_{60} на 1236 руб./га (15,5 %), при дозе $N_{30}K_{30}$ на 610 руб./га (7,6 %).

Таблица 27 – Экономическая эффективность применения удобрений (расчётные данные)

Вариант	Затраты, руб.		Стоимость продукции, руб.	Прибыль, руб.	Рентабельность, %	С учётом класса зерна		
	на 1 т	на 1 га				Стоимость продукции	Прибыль	Рентабельность
Без удобрений	5794	12456	20425	7969	64	22575	10119	81
N_{30}	5878	15576	25175	9599	62	27825	12249	79
N_{60}	6189	17205	26410	9205	54	29190	11985	70
N_{90}	6579	18685	26980	8295	44	26980	8295	44
N_{120}	7004	20101	27265	7164	36	27265	7164	36
N_{150}	7456	21475	27360	5885	27	27360	5885	27
$N_{30}K_{30}$	6263	16596	25175	8579	52	27825	11229	68
$N_{30}P_{30}K_{30}$	7371	17617	22705	5088	29	25095	7478	42

По причине того, что в условиях 2021 года было получено зерно пригодное для использования на продовольствие цели (1-3 класс), в таблице 26 представлена стоимость продукции, и рентабельность производства зерна озимой ржи при применении различных доз и соотношений минеральных удобрений при учёте закупочных цен «Пермского мукомольного завода» в зависимости от класса зерна. Стоимость зерна 1 класса составляла 10800 руб./т, 2 класса – 10500 руб./т, 3 класса – 9500 руб./т. Увеличение стоимости продукции и рентабельности было характерно для всех вариантов, где зерно относилось к 1 и 2 классу качества, что доказывает эффективность возделывания озимой ржи сорта Фалёнская 4 при реализации его на продовольственные цели.

Энергетическая эффективность возделывания озимой ржи в опыте, рассчитанная по фактическим данным, представлена в приложении У. Для расчётных доз удобрений коэффициент энергетической эффективности в варианте

без применения удобрений составил 1,92 (таблица 28). При внесении 30 кг/га азота, а также совместном внесении азота и калия в дозе 30 кг/га он возрастал на 0,07 и 0,06 соответственно. При увеличении доз азотных удобрений коэффициент энергетической эффективности снижался.

Таблица 28 – Энергетическая эффективность (расчётные данные)

Вариант	Полные затраты техногенной энергии, ГДж/га		Выход валовой энергии с урожаем, ГДж				Прирост техногенной энергии, ГДж/га		Коэффициент энергетической эффективности производства			
			основной продукции		общий				основной продукции		общий	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
N ₀	23,0	–	28,9	–	15,3	–	21,1	–	1,26	–	1,92	–
N ₃₀	27,4	4,4	35,6	6,7	18,8	3,5	27,0	5,9	1,30	0,04	1,99	0,07
N ₆₀	30,0	7,0	37,4	8,5	19,7	4,5	27,1	6,0	1,25	-0,01	1,90	-0,01
N ₉₀	32,4	9,4	38,2	9,3	20,2	4,9	25,9	4,8	1,18	-0,08	1,80	-0,12
N ₁₂₀	34,7	11,7	38,6	9,7	20,4	5,1	24,2	3,1	1,11	-0,14	1,70	-0,22
N ₁₅₀	37,0	13,9	38,7	9,8	20,4	5,2	22,2	1,0	1,05	-0,21	1,60	-0,32
N ₃₀ K ₃₀	27,5	4,5	35,6	6,7	18,8	3,5	26,9	5,8	1,30	0,04	1,98	0,06
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	26,8	3,8	32,1	3,2	17,0	1,7	22,3	1,1	1,20	-0,06	1,83	-0,09

Примечание – 1 – значение показателя, 2 – отклонение от контроля

Заключение по главе 7

Наибольшая рентабельность производства озимой ржи сорта Фалёнская 4 была отмечена в среднем за 2 года исследований при возделывании её без применения удобрений. Аналогичная закономерность отмечена для вегетационного периода 2018-2019 гг. Однако в условиях 2020-2021 года, когда не отмечалось негативного влияния азотных удобрений на урожайность, вариант с применением N₉₀ обеспечивал большую рентабельность производства, чем в варианте без применения удобрений. Среди доз азотных удобрений, рассчитанных по регрессионному уравнению, описывающему действие азотных удобрений на урожайность в среднем за 2 года, рентабельность при применении удобрений также снижается. Установлено увеличение прибыли до дозы N₆₀. Расчёт экономической эффективности возделывания озимой ржи в зависимости от класса

зерна показал увеличение рентабельности в вариантах без применения удобрений и K_{90} , снижение в варианте $N_{120}P_{120}K_{120}$. Установлено увеличение коэффициента энергетической эффективности при применении N_{30} и $N_{30}K_{30}$ относительно контроля на до 1,99 и 1,98 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В длительном стационарном опыте проведены комплексные исследования по влиянию доз и соотношений азотных, фосфорных и калийных удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, урожайность и показатели качества зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4. Изучено изменение основных агрохимических показателей почвы за период от закладки опыта (1978 и 1980 гг.) до окончания 5 ротаций 8-полного севооборота (2017 и 2019 гг.). Получены регрессионные уравнения и прогнозные модели, описывающие влияние на исследуемые показатели минеральных удобрений. На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Показатель pH_{KCl} снизился за 40 лет в варианте без применения удобрений на 0,4, в среднем по вариантам с применением удобрений на 0,6. Математическое доказуемое влияние на снижение показателя оказали азотные удобрения, действие которых зависело от исходного уровня показателя. Точность прогнозной модели – удовлетворительная. Ухудшение других кислотно-основных свойств (гидролитической кислотности, сумма поглощённых оснований, ЕКО и степень насыщенности почв основаниями) также произошло как в контрольном варианте, так и при применении удобрений. Действием минеральных удобрений может быть объяснен 71 % изменения гидролитической кислотности, 39 % суммы поглощённых оснований, 36 % ЕКО и 65 % степени насыщенности почв основаниями по вариантам опыта.

Длительное применение минеральных удобрений не оказало влияния на изменение содержания гумуса по вариантам опыта. Установлено сильная корреляционная связь между исходными значениями гумуса и изменением его за 5 ротаций ($r = -0,82$). Увеличение показателя до естественного уровня, характерного для почв места проведения исследований (1,8-2,2 %), отмечали в вариантах с относительно низким (1,6-1,7 %) исходным содержанием гумуса. При длительном внесении минеральных удобрений в дозах $N_{150}P_{150}K_{60}$ и $N_{150}P_{150}K_{150}$ отмечена тенденция к увеличению содержания гумуса на 0,14-0,22 %.

Содержание подвижных форм фосфора и калия снизилось в варианте без применения удобрений на 45 и 53 мг/кг соответственно. Увеличение содержания элементов в почве произошло за счёт внесения фосфорных и калийных удобрений соответственно. Их действием можно объяснить 94 и 88 % изменения показателей по вариантам опыта соответственно. Применение азотных удобрений привело к снижению содержания фосфора и калия. В вариантах, где фосфорные удобрения не вносили, содержание подвижного фосфора установилось на уровне 170-200 мг/кг, для содержания калия по вариантам, где не вносили калийные удобрения, такого минимального содержания не установлено. Построение прогнозной модели показало, что влияние калийных удобрений на содержание подвижного калия в почве зависло от исходного уровня показателя ($R^2=0,79$).

2. В различных по гидротермическим условиям годам наибольшая урожайность зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4 получена в варианте N_{90} (2,95 т/га). Наибольшая агрономическая окупаемость была отмечена также в этом варианте и составила 9,82 кг зерна / кг д.в. удобрений. Математически доказуемое увеличение урожайности озимой ржи отмечено при применении азотных удобрений, действие их возрастающих доз имело затухающий характер. Регрессионное уравнение показало хорошую точность прогнозирования ($\epsilon=3,4\%$), действием минеральных удобрений определялось 73 % изменчивости показателя по вариантам опыта. Среди доз азотных удобрений наибольшую агрономическую эффективность по расчётным данным показал вариант с применением N_{30} : урожайность составила 2,65 т/га, окупаемость зерном 1 кг д.в. удобрений 16,7 кг/кг.

3. Сформированное в условиях повышенной влажности августа 2019 г. зерно озимой ржи относилось к 4 классу качества. В условиях засушливого 2021 г. по вариантам опыта сформировались зерно 1-3 класса качества. В оба года исследования снижение технологических показателей произошло за счёт применения азотных удобрений. Прогнозные модели показали, что в засушливых условиях с удовлетворительной точностью можно прогнозировать получение

зерна не ниже второго класса качества при применении азотных удобрений в дозе до 60 кг/га д.в.

Содержание сырого белка в зерне озимой ржи и критических аминокислот в условиях 2021 г. увеличилось за счёт применения азотных удобрений, фосфорные и калийные удобрения оказывали обратный эффект. Содержание золы увеличилось под действием калийных и фосфорных удобрений. Действием удобрений можно объяснить 61 % изменения сырого белка, 76 % изменения суммы критических аминокислот и 71 % изменения содержания золы по вариантам опыта. Полученные регрессионные уравнения показали хорошую точность прогноза. Содержание крахмала изменялось в диапазоне от 51 до 57 % и не зависело от доз и соотношений минеральных удобрений. Наибольший сбор с 1 га сырого белка (355 кг/га), суммы критических аминокислот (25,7 кг/га) и крахмала (1,73 т/га) обеспечивало применение под озимую рожь азотных удобрений в дозе 90 кг/га.

4. В условиях длительного стационарного опыта отмечено оптимальное содержание азота в надземной массе озимой ржи в фазы выхода в трубку и колошения. Содержание фосфора и калия в указанные фазы было избыточным. Данная особенность отмечена как для контрольного варианта, так и для вариантов с применением минеральных удобрений. Между соотношением Р/К в зелёной массе в фазе выхода в трубку и урожайностью зерна установлена прямая умеренная связь ($r=0,41$).

5. Наибольшая экономическая и энергетическая эффективность возделывания озимой ржи в среднем за 2 года исследований была получена для варианта без применения удобрений. Расчётные дозы азотных удобрений N_{30} , N_{60} и $N_{30}K_{30}$ показали снижение рентабельности на 2, 10 и 12 % соответственно, при повышении прибыли на 7,6-20,5 %. Коэффициент энергетической эффективности при применении указанных доз составил 1,99, 1,90 и 1,98 соответственно при коэффициенте 1,92 в варианте без удобрений.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

На основании комплексной оценки урожайности и качества зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4, а также показателей плодородия дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы предлагается следующее:

1. На почвах с высоким содержанием подвижного фосфора при возделывании озимой ржи сорта Фалёнская 4 рекомендуется применять азотные удобрения в дозах 30-60 кг/га, обеспечивающих стабильную в различных гидротермических условиях урожайность зерна, агрономическую и экономическую окупаемость затрат.

2. Для улучшения показателей качества зерна и предотвращения снижения содержания подвижного калия в почве следует дополнительно вносить 30 кг/га калия ежегодно.

3. Использовать для прогноза изменения агрохимических показателей и качества зерна озимой ржи полученные регрессионные уравнения и графические прогнозные модели, обеспечивающие хорошую и удовлетворительную точность прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашев, В. Д. Влияние возрастающих доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность и качество зерна озимой ржи / В. Д. Абашев, Е. В. Светлакова, Ф. А. Попов [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2014. – № 4(41). – С. 26-30.
2. Абашев, В. Д. Влияние минеральных удобрений на урожайность культур зернопаротравяного севооборота / В. Д. Абашев, Е. В. Светлакова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2015. – № 2(45). – С. 37-43.
3. Абашев, В. Д. Изменение продуктивности культур зернопаротравяного севооборота и агрохимических показателей почвы в многолетнем полевом опыте при применении минеральных удобрений / В. Д. Абашев, Ф. А. Попов, Е. Н. Носкова, Е. В. Светлакова // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2018. – № 3(9). – С. 76-84.
4. Абашев, В. Д. Эффективность минеральных удобрений при возделывании различных сортов озимой ржи / В. Д. Абашев, Ф. А. Попов, Е. Н. Носкова, Е. В. Светлакова // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2020. – Т. 6. № 2(22). – С. 131-137.
5. Агроклиматический справочник по Пермской области. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 258 с.
6. Агро- и зооэнергетическая оценка технологий и операций в сельскохозяйственном производстве Предуралья / Ю. Н. Зубарев, С. Л. Елисеев, А. А. Васильев [и др.] – Пермь, 2011. – 112 с.
7. Акимова, О. И. Влияние уровня азотного питания на урожай зерна озимой ржи / О. И. Акимова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 8(106). – С. 013-018.
8. Андреев, Н. Р. Глубокая переработка зерна озимой ржи / Н. Р. Андреев, Н. Д. Лукин, А. А. Папахин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2014. – № 6(43). – С. 9-12.

9. Андриюшина, Н. Н. Урожайность и качество зерна озимой ржи, возделываемой на дерново-подзолистой радиоактивно загрязненной почве, в зависимости от применяемых средств химизации / Н. Н. Андриюшина, И. Н. Белоус, В. Н. Адамко [и др.] // Аграрная наука. – 2022. – № 9. – С. 98-103.

10. Аниськов, Н. И. Оценка показателей стрессоустойчивости, стабильности и пластичности сортов озимой ржи по массе 1000 зерен / Н. И. Аниськов, И. В. Сафонова // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 9(162). – С. 27-35.

11. Анкудович, Ю. Н. Влияние минеральных удобрений на урожайность озимой ржи, возделываемой по сидеральному пару / Ю. Н. Анкудович // Плодородие. – 2015. – № 6(87). – С. 8-9.

12. Афанасьев, Р. А. (а) Содержание подвижного фосфора в почвах при длительном применении удобрений / Р. А. Афанасьев, Г. Е. Мерзлая // Агрохимия. – 2013. – № 2. – С. 30-36.

13. Афанасьев, Р. А. (б) Содержание подвижного калия в почвах при длительном применении удобрений / Р. А. Афанасьев, Г. Е. Мерзлая // Агрохимия. – 2013. – № 6. – С. 5-11.

14. Афанасьев, Р. А. Сравнительная эффективность систем удобрения / Р. А. Афанасьев, Г. Е. Мерзлая // Агрохимия. – 2021. – № 2. – С. 31-36.

15. Башков, А. С. Агрохимические основы повышения эффективности систем удобрений полевых культур на дерново-подзолистых почвах Среднего Предуралья: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.04 / Башков Александр Степанович. – Пермь, 2000. – 68 с.

16. Башков, А. С. Фосфатное состояние дерново-подзолистых почв Удмуртии и проблема фосфорного питания сельскохозяйственных культур / А. С. Башков, Т. Ю. Бортник, А. Ю. Карпова [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1(50). – С. 11-20.

17. Белоус, И. Н. Влияние систем удобрения на урожай и качество зерна озимой ржи / И. Н. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Н. Адамко // Агрохимический вестник. – 2014. – № 1. – С. 38-40.

18. Белоус, И. Н. Применение систем удобрения при возделывании озимой ржи в условиях юго-запада Нечерноземья / И. Н. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Г. П. Малявко // Агрохимия. – 2017. – № 9. – С. 49-57.

19. Белоус, И. Н. Влияние систем удобрения озимой ржи на урожайность и технологические качества зерна / И. Н. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов, Г. П. Малявко // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 3(57). – С. 3-8.

20. Бельченко, С. А. Влияние систем удобрения на химические свойства дерново-подзолистой песчаной почвы / С. А. Бельченко // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2012. – № 1(34). – С. 22-23.

21. Бирюкова, О. А. Прогнозирование продуктивности озимой пшеницы на черноземе обыкновенном / О. А. Бирюкова, И. И. Ельников, Д. В. Божков // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 7. – С. 150-151.

22. Биологические основы производства зерна озимой ржи на Евро-Северо-Востоке РФ / Л. И. Кедрова, Е. И. Уткина, Е. А. Шляхтина [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 6. – С. 21-23.

23. Варламова, Л. Д. Обеспеченность полевых культур доступными формами фосфора в условиях длительного применения удобрений / Л. Д. Варламова, В. В. Нефедьева // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3(31). – С. 14-16.

24. Васбиева, М. Т. Влияние длительного применения органических и минеральных удобрений на динамику содержания органического углерода и азотный режим дерново-подзолистой почвы / М. Т. Васбиева // Почвоведение. – 2019. – № 11. – С. 1365-1372.

25. Васбиева, М. Т. (а) Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений / М. Т. Васбиева // Почвоведение. – 2021. – № 1. – С. 90-99.

26. Васбиева, М. Т. (б) Влияние длительного применения систем удобрений на фракционный состав минеральных фосфатов и содержание подвижного фосфора по профилю дерново-подзолистой почвы / М. Т. Васбиева, В. Р.

Ямалтдинова, Д. С. Фомин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 2. – С. 43-48.

27. Возделывание озимой ржи в условиях северного земледелия / Е. И. Уткина, Л. И. Кедрова, М. Г. Шамова [и др.]. – Киров : Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 2021. – 121 с.

28. Волкова, Е. С. Влияние удобрений и биопрепаратов на показатели качества зелёной массы озимой ржи / Е. С. Волкова, Т. В. Шайкова, М. В. Дятлова // Научные труды по агрономии. – 2022. – № 3. – С. 12-18.

29. Володина, Т. И. Потребление азота, сбор протеина культурами севооборота под влиянием минеральной и органических систем удобрений / Т. И. Володина, О. В. Чухина, А. И. Демидова // Молочнохозяйственный вестник. – 2019. – № 4(36). – С. 31-45.

30. Володина, Т. И. Влияние различных систем удобрения на гумусовое состояние дерново-подзолистых почв Псковской области / Т. И. Володина, О. В. Чухина, А. И. Демидова // Агрохимический вестник. – 2020. – № 3. – С. 19-24.

31. Воробьев, В. А. Агроэкологические аспекты природно-антропогенной трансформации калийного состояния дерново-подзолистых почв Северо-Запада России: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.04 / Воробьев Вячеслав Анатольевич. – Брянск, 2016. – 42 с.

32. Гамзиков, Г. П. Состояние и перспективы исследований в длительных стационарных опытах с удобрениями в Сибири / Г. П. Гамзиков // Плодородие. – 2016. – № 5(92). – С. 6-9.

33. Гамзиков, Г. П. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность полевых культур и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы (к 70-летию Нарымского стационара) / Г. П. Гамзиков, Ю. Н. Анкудович // Агрохимия. – 2018. – № 1. – С. 17-29.

34. Горшкова, М. А. Методологические основы комплексной диагностики минерального питания по сопряженным исследованиям почв и растений: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 03.00.27 / Горшкова Маргарита Алексеевна. – М., 1996. – 77 с.

35. Гусева, К. А. Эффективность минеральных удобрений на почвах Пермской области (по данным географических опытов): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.53.30 / Гусева Капитолина Александровна. – Пермь, 1972. – 24 с.

36. Донских И. Н. Курсовое и дипломное проектирование по системе применения удобрений / И. Н. Донских. – Л.: Агропромиздат, 1989. – 144 с.

37. Дербенева, Л. В. Эффективность длительного применения разных систем удобрения в зернопаропропашном севообороте и их влияние на баланс гумуса в дерново-мелкоподзолистой тяжелосуглинистой почве / Л. В. Дербенева // Пермский аграрный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 62-68.

38. Елисеев, С. Л. Сроки посева озимой ржи в Предуралье / С. Л. Елисеев // Нива Поволжья. – 2010. – № 4(17). – С. 12-15.

39. Елисеев, С. Л. Необходимость уточнения срока посева озимой ржи / С. Л. Елисеев, Т. С. Вершинина // Пермский аграрный вестник. – 2017. – № 1(17). – С. 32-38.

40. Елькина, Г. Я. Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах / Г. Я. Елькина. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 277 с.

41. Елькина, Г. Я. Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах / Г. Я. Елькина // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2011. – № 12. – С. 42-45.

42. Ельников, И. И. Диагностика химического состава зерна сорго по системе ИСОД / И. И. Ельников, В. С. Крыщенко, О. А. Бирюкова, Н. С. Погорелова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2003. – № 4(124). – С. 54-57.

43. Ельников, И. И. Диагностика обеспеченности почв фосфором с учетом взаимосвязи его подвижной формы с агрохимическими свойствами почв и сбалансированностью химического состава растений / И. И. Ельников, О. Б. Рогова // Системы интенсификации земледелия как основа инновационной модернизации аграрного производства. – Суздаль : ИПК «ПресСто», 2016. – С. 208-212.

44. Ермакова, Л. И. Оценка эффективности различных систем удобрения в полевом севообороте в Нечерноземной зоне / Л. И. Ермакова, М. Н. Новиков // *Агрохимия*. – 2019. – № 10. – С. 39-45.
45. Ермакова, Л. Н. Оценка агроклиматических ресурсов территории Пермского края / Л. Н. Ермакова, Н. И. Толмачева, Е. А. Безматерных // *Географический вестник*. – 2010. – № 2. – С. 52-58.
46. Ермакова, Л. Н. Современные изменения климатических и агрометеорологических характеристик в Пермском крае и возможные вариации продуктивности сельскохозяйственных культур / Л. Н. Ермакова, В. А. Шкляев, Л. С. Шкляева // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. – 2013. – № 2. – С. 104-116.
47. Ермохин, Ю. И. Физиологические основы применения удобрений под озимую рожь / Ю. И. Ермохин, М. А. Ли // *Плодородие*. – 2010. – № 1(52). – С. 10-11.
48. Жуков, Ю. П., Эффективность применения удобрений под озимую рожь в условиях Вологодской области / Ю. П. Жуков, О. В. Чухина, Е. И. Куликова [и др.] // *Плодородие*. – 2011. – № 6(63). – С. 7-9.
49. Завалин, А. А. Азотное питание и прогноз качества зерновых культур / А. А. Завалин, А. В. Пасынков. – М.: ВНИИА, 2007. – 208 с.
50. Завьялова, Н. Е. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Предуралья / Н. Е. Завьялова. – Пермь: ОТ и ДО, 2014. – 328 с.
51. Завьялова, Н. Е. Влияние возрастающих доз полного минерального удобрения на органическое вещество и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, А. И. Косолапова, А. Н. Сторожева // *Агрохимия*. – 2014. – № 6. – С. 20-28.
52. Завьялова, Н. Е. Агробиологические свойства целинной и пахотной дерново-подзолистой почвы / Н. Е. Завьялова, Д. Г. Шишков, Я. В. Енина // *Плодородие*. – 2019. – № 2(107). – С. 47-49.

53. Завьялова, Н. Е. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы в вегетационный период озимой ржи / Н. Е. Завьялова, О. В. Иванова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2020. – № 3. – С. 36-39.

54. Завьялова, Н. Е. Агрохимические и биохимические параметры плодородия пахотной и целинной дерново-подзолистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, Е. С. Дир, Д. Г. Шишков // Проблемы агрохимии и экологии. – 2021. – № 2. – С. 16-21.

55. Завьялова, Н. Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья / Н. Е. Завьялова // Почвоведение. – 2022. – № 8. – С. 1046-1055.

56. Завьялова, Н. Е. Органическое вещество целинной и пахотной дерново-подзолистой почвы Предуралья / Н. Е. Завьялова, М. Т. Васбиева, Д. Г. Шишков // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 2. – С. 27-40.

57. Иванова, Т. И. Оптимизация системы удобрения в севообороте с использованием математических моделей: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.04 / Иванова Тамара Ильинична. – Москва, 1988. – 40 с.

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

59. Исмагилов, Р. Р. Хлебопекарные качества зерна озимой ржи и приемы их повышения / Р. Р. Исмагилов, Л. М. Ахиярова, Д. С. Аюпов, К. Р. Исмагилов // Аграрный вестник Урала. – 2010. – № 3(69). – С. 54-55.

60. Исмагилов, Р. Р. Качество зерна побегов озимой ржи разного порядка образования / Р. Р. Исмагилов, М. С. Нехороших, Л. М. Ахиярова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2016. – № 4(53). – С. 22-26.

61. Кайгородов, А. Т., Современное состояние почвенного плодородия пахотных земель Пермского края / А. Т. Кайгородов, Н. И. Пискунова // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31. – № 4. – С. 22-26.

62. Кирин, К. П. Изучение урожайности и химического состава зерна озимой ржи в условиях среднего Урала / К. П. Кирин, Л. Б. Сергеева, Г. Н. Потапова // Молодежь и наука. – 2022. – № 9.

63. Кирпичников, Н. А. Влияние извести на физико-химические свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность полевого севооборота при систематическом применении азотных и калийных удобрений в длительном опыте / Н. А. Кирпичников, С. П. Бижан // Агрохимия. – 2019. – № 8. – С. 14-17.

64. Козлова, Л. М. Оценка технологических и хлебопекарных качеств озимой ржи в зависимости от предшественника в адаптивно-ландшафтном земледелии / Л. М. Козлова, А. В. Денисова, И. В. Лыскова, С. Н. Жук // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 5(60). – С. 33-39.

65. Кондратенко, Е. П. Содержание белка и аминокислот в зерне озимых культур, произрастающих на территории лесостепи Юго-Востока Западной Сибири / Е. П. Кондратенко, О. Б. Константинова, О. М. Соболева [и др.] // Химия растительного сырья. – 2015. – № 3. – С. 143-150.

66. Конова, А. М. Урожайность и качество зерна озимой ржи при длительном применении минеральных удобрений в севообороте на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве / А. М. Конова, Л. М. Державин, Л. Н. Самойлов // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 5. – С. 23-26.

67. Конова, А. М. Продуктивность культур зернотравяного севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы при длительном применении минеральных удобрений / А. М. Конова, А. Ю. Гаврилова, Е. А. Трабурова // Плодородие. – 2020. – № 2(113). – С. 46-49.

68. Коромыслова, В. В. Влияние фосфорных удобрений, извести и навоза на урожайность зерновых культур и фосфатный режим дерново-подзолистых почв: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 Агрохимия / Коромыслова Валентина Васильевна. – Москва, 1995. – 22 с.

69. Косолапова, А. И. Агроэкологические вопросы устойчивости агроэкосистем в Предуралье / А. И. Косолапова, С. И. Попова. – Пермь: ОТ и ДО, 2012. – 232 с.

70. Косолапова, А. И. Приемы управления продукционным процессом озимой ржи Фаленская 4 в условиях изменяющегося климата Предуралья, обеспечивающие формирование урожайности не менее 3,5 т/га / А. И. Косолапова, М. Т. Васбиева, Е. М. Митрофанова [и др.] – Пермь: От и До, 2013. – 64 с.

71. Косолапова, А. И. Отзывчивость озимой ржи Фаленская 4 на длительное применение минеральных удобрений / А. И. Косолапова, П. А. Лейних, В. И. Возжаев // Пермский аграрный вестник. – 2016. – № 3(15). – С. 29-34.

72. Косолапова, А. И. Эффективность длительного применения удобрений на дерново-подзолистых почвах Предуралья / А. И. Косолапова, Н. Е. Завьялова, Е. М. Митрофанова [и др.] // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 42-55.

73. Крищенко, В. П. Аминокислотный состав зерна ячменя, ржи и пшеницы при разных уровнях минерального питания / В. П. Крищенко, Т. Ф. Ушакова // Известия ТСХА. – 1986. – №5. – С. 73-79.

74. Кузьменко, Н. Н. Плодородие дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных систем удобрения / Н. Н. Кузьменко // Агрохимия. – 2010. – № 4. – С. 11-17.

75. Лапа, В. В. Продуктивность севооборотов и изменение плодородия дерново-подзолистой супесчаной почвы при длительном применении удобрений / В. В. Лапа, Н. Н. Ивахненко // Агрохимия. – 2012. – № 9. – С. 41-48.

76. Лейних, П. А. Влияние доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность и качество сортов ячменя (Эколог, БИОС-1, Сонет) на дерново-мелкоподзолистой тяжелосуглинистой почве: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Лейних Павел Альбертович. – Пермь, 2005. – 191 с.

77. Ли, М. А. Диагностика и оптимизация минерального питания озимой ржи в условиях южной лесостепи Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Ли Михаил Алексеевич. – Омск, 2009. – 16 с.

78. Лизиметрические исследования на Среднем Урале / Н. Н. Зезин, Л. П. Огородников, П. А. Постников [и др.] ; Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН. – Екатеринбург : Джи Лайм, 2020. – 250 с.

79. Литвяк, В. В. Морфология и размеры зерен природного крахмала разного ботанического происхождения / В. В. Литвяк, С. М. Бутрим, А. В. Канарский, З. А. Канарская // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 64-69.

80. Лукин, С. М. Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 06.01.04 / Лукин Сергей Михайлович. – Москва, 2009. – 49 с.

81. Лыков, А. М. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья / А. М. Лыков, А. И. Еськов, М. Н. Новиков. – М.: Россельхозакадемия, 2004. – С. 399-433.

82. Лыскова, И. В. Влияние активности фермента альфа-амилаза на хлебопекарные качества озимой ржи / И. В. Лыскова, Е. А. Шляхтина, О. Н. Рылова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2014. – № 3(40). – С. 15-18.

83. Лыскова, И. В. Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, урожайность и качество зерновых культур / И. В. Лыскова // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 6(61). – С. 35-40.

84. Магницкий, К. П. Контроль питания полевых и овощных культур / К. П. Магницкий – Москва: Московский рабочий, 1964. – 303 с.

85. Майсак, Г. П. Урожайность озимых культур при разных сроках скашивания и качество силоса и зерносенажа в среднем Предуралье / Г. П. Майсак, В. А. Волошин // Пермский аграрный вестник. – 2016. – № 3(15). – С. 41-48.

86. Макарова, В. М. Структура урожайности зерновых культур и ее регулирование / В. М. Макарова. – Пермь: ПГСХА, 1995 – 144 с.

87. Максимов, В. А. Результаты экологического испытания новых сортов озимой ржи в условиях Республики Марий Эл / В. А. Максимов, Р. И. Золотарева

// Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2019. – Т. 5, № 2(18). – С. 178-184.

88. Максимов, В. А. Влияние минеральных удобрений на экономические показатели возделываемых сортов озимой ржи в условиях Республики Марий Эл / В. А. Максимов, Р. И. Золотарева, Ю. А. Лапшин // Зерновое хозяйство России. – 2020. – № 4(70). – С. 27-30.

89. Макшакова, О. В. Последствие длительного применения органических и минеральных удобрений на урожайность и качество озимой ржи: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.04 / Макшакова Ольга Викторовна. – Москва, 2014. – 21 с.

90. Малявко, Г. П. Агрохимическое обоснование технологий возделывания озимой ржи на юго-западе России / Г. П. Малявко, Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов. – Брянск : Брянский государственный аграрный университет, 2010. – 247 с.

91. Махалов, Р. М. Влияние последствия различных доз известкования и длительного применения минеральных удобрений на агрохимические свойства светло-серой лесной почвы и урожайность лядвенца рогатого / Р. М. Махалов, А. И. Гувеннов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2015. – № 2(45). – С. 32-37.

92. Мерзлая, Г. Е. Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений / Г. Е. Мерзлая, Т. А. Девятова, Е. В. Пономарева, И. В. Румянцева // Плодородие. – 2010. – № 4(55). – С. 31-33.

93. Мерзлая, Г. Е. Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве / Г. Е. Мерзлая, Г. А. Зябкина, Т. П. Фомкина [и др.] // Агрохимия. – 2012. – № 2. – С. 37-46.

94. Мерзлая, Г. Е. Результаты исследований длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве / Г. Е. Мерзлая, А. Ю. Гаврилова, К. В. Постникова // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной

продукции : сборник статей по материалам VI Международной научно-практической конференции (Краснодар, 31 марта 2020 года). – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2020. – С. 591-595.

95. Мерзлая, Г. Е. Исследование устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений на дерново-подзолистой почве / Г. Е. Мерзлая // Почвоведение. – 2021. – № 3. – С. 355-362.

96. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / В. Г. Сычев, А. Н. Аристархов, И. В. Володарская [и др.]. – Москва : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2003. – 240 с.

97. Методы определения активных компонентов в составе гумуса почв. М.:ВНИИА, 2010. – 32 с.

98. Митрофанова, Е. М. Влияние известкования на динамику кислотности и содержание поглощенных оснований в дерново-слабоподзолистой почве Южной зоны Предуралья / Е. М. Митрофанова // Агрохимия. – 2010. – № 3. – С. 12-16.

99. Митрофанова, Е. М. Агроэкологические аспекты снижения отрицательного влияния кислотности почв в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия Предуралья: автореф. дис. ... докт. с-х наук: 06.01.04 / Митрофанова Екатерина Михайловна. – Пермь, 2011. – 43 с.

100. Митрофанова, Е. М. Роль агрохимических приемов в снижении кислотности дерново-подзолистых почв Предуралья / Е. М. Митрофанова // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 5(97). – С. 8-10.

101. Митрофанова, Е. М. Приемы регулирования фосфатного режима почвы, обеспечивающие повышение урожайности сельскохозяйственных культур и сохранение плодородия почвы / Е.М. Митрофанова. – Пермь: От и До, 2015. – 51 с.

102. Митрофанова, Е. М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и последствия извести на фосфатный режим дерново-поверхностноподзолистой почвы Предуралья / Е. М. Митрофанова // Агрохимия. – 2016. – № 7. – С. 36-43.

103. Митрофанова, Е. М. Влияние длительного применения минеральных и органических удобрений на подвижные формы фосфора дерново-подзолистой почвы Предуралья / Е. М. Митрофанова // Плодородие. – 2017. – № 3(96). – С. 3-5.

104. Михайлова, Л. А. Оптимизация питания ячменя, озимой ржи, картофеля и клевера и эффективность минеральных удобрений при разной окультуренности дерново-подзолистых почв Предуралья: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.04 / Михайлова Людмила Аркадьевна. – Пермь, 2008. – 41 с.

105. Мудрых, Н. М. Развитие зерновой отрасли в Пермском крае / Н. М. Мудрых // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1(147). – С. 14-20.

106. Мудрых, Н. М. Изменение содержания элементов питания в дерново-подзолистых почвах при длительном применении удобрений / Н. М. Мудрых, В. Р. Ямалтдинова, Д. Г. Шишков // Российский журнал прикладной экологии. – 2019. – № 2(18). – С. 32-34.

107. Муратов, М. Р. Корреляция урожайности зерновых и зернобобовых культур от агрохимических параметров почв и погодных условий / М. Р. Муратов, М. Ю. Гилязов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 10, № 2(36). – С. 128-135.

108. Мурыгин, В. П. Влияние срока и дозы азотной подкормки на урожайность озимых культур / В. П. Мурыгин, В. А. Попов, С. Л. Елисеев // Пермский аграрный вестник. – 2016. – № 3(15). – С. 53-59.

109. Мурыгин, В. П. Хлебопекарные качества озимых зерновых культур в Среднем Предуралье / В. П. Мурыгин // Пермский аграрный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 96-101.

110. Наумова, Н. Б. Влияние удобрений на химические свойства дерново-подзолистой почвы в зернотравяном севообороте в длительном полевом опыте /

Н. Б. Наумова, Р. П. Макарикова, О. А. Савенков [и др.] // Агрохимия. – 2012. – № 3. – С. 3-12.

111. Неволина, К. Н. Приемы управления возделывания озимых зерновых культур, обеспечивающие формирование урожайности не менее 3 т/га с высоким качеством зерна в условиях Предуралья / К. Н. Неволина, Л. В. Бессонова, Р. И. Вяткина, Т. Е. Калина. – Пермь : «От и До», 2015. – 46 с.

112. Ненайденко, Г. Н. Удобрение и повышение качества зерна / Г. Н. Ненайденко, Л. И. Ильин // Владимирский земледелец. – 2017. – № 3(81). – С. 23-28.

113. Никитина, Л. В. Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети / Л. В. Никитина // Агрохимия. – 2018. – № 1. – С. 39-51.

114. Нуждина, Н. Н. Результаты изучения качества зерна сортов озимой ржи / Н. Н. Нуждина, Т. Я. Ермолаева, Т. Б. Кулеватова [и др.] // Аграрный вестник Юго-Востока. – 2016. – № 1-2(14-15). – С. 35-37.

115. Нурлыгаянов, Р. Б. Технология производства продовольственного зерна озимой ржи в Уральском регионе: автореф. дис. ... докт. с.-х. наук: 06.01.09 / Нурлыгаянов Разит Баязитович. – Москва, 2003. – 34 с.

116. Окорков, В. В. Модели изменения физико-химических свойств серых лесных почв при длительном применении удобрений / В. В. Окорков, О. А. Фенова, Л. А. Окоркова // Владимирский земледелец. – 2013. – № 4(66). – С. 19-22.

117. Окорков, В. В. Влияние длительного применения удобрений на изменение физико-химических свойств серой лесной почвы Верхневолжья / В. В. Окорков, Л. А. Окоркова, О. А. Фенова // Владимирский земледелец. – 2021. – № 2(96). – С. 27-34.

118. Пасынков, А. В. Статистические зависимости основных показателей качества зерновых культур / А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова // Агрохимия. – 2011. – № 2. – С. 24-40.

119. Пасынков, А. В. Влияние длительного применения минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, продуктивность севооборота и качество зерна / А. В. Пасынков, Е. В. Светлакова, Н. В. Котельникова [и др.] // Агрохимия. – 2016. – № 10. – С. 38-47.

120. Пасынков, А. В. Исследование взаимосвязей основных показателей качества зерна озимой ржи при его фракционировании / А. В. Пасынков, Е. Н. Пасынкова // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3(61). – С. 24-30.

121. Перегудов, В. Н. Планирование многофакторных полевых опытов с удобрениями и математическая обработка их результатов / В. Н. Перегудов. – М.: «Колос», 1978. – 184 с.

122. Пермский край в цифрах. 2019: Краткий статистический сборник/ Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю. – Пермь, 2019. – 200 с.

123. Пермский край в цифрах. 2023: Краткий статистический сборник/ Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю. – Пермь, 2023. – 197 с.

124. АО «Пермский мукомольный завод: закуп зерна. – URL: <https://permill.ru/grain-purchase/> (дата обращения 10.03.2023).

125. Пинаева, М. И. Влияние предшественника и доз минеральных удобрений на урожайность озимой ржи при возделывании на дерново-подзолистой почве / М. И. Пинаева, Л. А. Михайлова, Ю. А. Акманаева // Пермский аграрный вестник. – 2017. – № 3(19). – С. 101-106.

126. Плотников, А. М. Продуктивность севооборота и показатели кислотности почвы при использовании различных удобрений / А. М. Плотников // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 3(31). – С. 13-17.

127. Ползиков, Д. А. Императивы адаптации к климатическим изменениям в разработке агропродовольственной политики в России / Д. А. Ползиков // Проблемы прогнозирования. – 2022. – № 6(195). – С. 145-155.

128. Полетаев, И. С. Эффективность минеральных удобрений при возделывании озимых культур, нута и подсолнечника в условиях Саратовского Левобережья / Полетаев И. С., А. П. Солодовников, Ф. П. Четвериков [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 7. – С. 37-40.

129. Понкратенкова, И. В. Динамика продуктивности полевого севооборота и агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений / И. В. Понкратенкова, А. Ю. Гаврилова, Г. Е. Мерзлая // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : сборник статей по материалам V Международной научно-практической конференции (Краснодар, 29 марта 2019 года). – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2019. – С. 424-428.

130. Пономарева, М. Л. Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи / М. Л. Пономарева, С. Н. Пономарев // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2019. – Т. 23. – №. 3. – С. 320-327.

131. Попов, Ф. А. Влияние возрастающих норм удобрений на продуктивность полевого севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы в факториальном опыте / Ф. А. Попов, В. Д. Абашев, Е. Н. Носкова [и др.] // Итоги выполнения программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013-2020 гг. : Материалы Всероссийского координационного совещания научных учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями / Под ред. акад. РАН В.Г. Сычева. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 220-224.

132. Попов, Ф. А. Влияние длительного применения минеральных удобрений на урожайность и качество зерна озимой ржи / Ф. А. Попов, В. Д. Абашев, Е. Н. Носкова [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020. – Т. 21. – № 5. – С. 561-570.

133. Практикум по агрохимии: учебное пособие / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. – М.: МГУ. – С. 357-358.

134. Проведение многофакторных опытов с удобрениями и математический анализ их результатов: методические указания / под ред. В.Н. Перегудова. – М.: ВИУА, 1976. – 112 с.

135. Прудникова, А. Г. Изменение агрохимических и биологических свойств почвы при внесении различных видов и соотношений органических и минеральных удобрений / А. Г. Прудникова, А. Д. Прудников, В. А. Павлюченкова [и др.] // АгроЭкоИнфо. – 2020. – № 4(42). – С. 13.

136. Ринькис, Г. Я. Сбалансированное питание растений макро- и микроэлементами / Г. Я. Ринькис, В. Ф. Ноллендорф – Рига: Зинатне, 1982. – 304 с.

137. Романенков, В. А. Почвенный углерод в условиях глобального изменения климата / В. А. Романенков // Плодородие почв России: состояние и возможности : Сборник статей (к 100-летию со дня рождения Тамары Никандровны Кулаковской). – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2019. – С. 177-183.

138. Рысев, М. Н. Закономерности действия удобрений под озимую рожь на дерново-подзолистых почвах / М. Н. Рысев, Е. С. Волкова, Е. Н. Федотова, М. В. Дятлова // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 4. – С. 18-25.

139. Семендяева, Н. В. Влияние длительного применения удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы таежной зоны Западной Сибири / Н. В. Семендяева // Агрохимия. – 2010. – № 3. – С. 3-11.

140. Сиротенко, О. Д. Оценка и прогноз эффективности минеральных удобрений в условиях изменяющегося климата / О. Д. Сиротенко, В. А. Романенков, В. Н. Павлова, М. П. Листова // Агрохимия. – 2009. – № 7. – С. 26-33.

141. Степанова, О. И. Устойчивость почв в агроценозах / О. И. Степанова // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2020. – № 23. – С. 116-137.

142. Сысуев, В. А. Формирование партий зерна озимой ржи с повышенным содержанием крахмала / В. А. Сысуев, Н. К. Лаптева, Л. И. Кедрова [и др.] // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 3. – С. 78.

143. Сысуев, В. А. Приоритетные направления исследований в решении проблемы многофункционального использования озимой ржи / В. А. Сысуев, Л. И. Кедрова, Е. И. Уткина // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2014. – № 6(43). – С. 4-8.

144. Сысуев, В. А., Концептуальные направления развития научно-инновационного проекта «Рожь России» / В. А. Сысуев, Л. И. Кедрова, Н. Е. Рубцова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29, № 11. – С. 28-31.

145. Сычев, В. Г. Основные ресурсы урожайности сельскохозяйственных культур и их взаимосвязь / В. Г. Сычев. – М.: ЦИНАО, 2003. – 228 с.

146. Сычев, В. Г. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях / В. Г. Сычев, Н. А. Кирпичников. – М.: ВНИИА, 2009. – С. 18-94.

147. Сычев, В. Г. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Том 1. Агрохимические аспекты роли азота в продукционном процессе / В. Г. Сычев, О. А. Соколов, Н. Я. Шмырева – М.: ВНИИА, 2009. – С. 305-331.

148. Сычёв, В. Г. Влияние агрохимических свойств почв на эффективность минеральных удобрений / В. Г. Сычёв, С. А. Шафран. – М.: ВНИИА, 2012. 200 с.

149. Сычев, В. Г. Этапы развития, результаты исследований и актуальные проблемы длительных агрохимических полевых опытов Географической сети опытов с удобрениями / В. Г. Сычев, М. В. Беличенко, В. А. Романенков // Агрохимия. – 2018. – № 1. – С. 3-16.

150. Сычев, В. Г. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв / В. Г. Сычев, Л. К. Шевцова, Г. Е. Мерзлая // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 3-21.

151. Сычев, В. Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования / В. Г. Сычев. – М.: Российская академия наук, 2019. – 328 с.

152. Сычев, В. Г. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России / В. Г. Сычев, А. Н. Налиухин, Л. К. Шевцова [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1521-1536.

153. Титова, В. И. Изменение продуктивности культур и агрохимических показателей почвы в 9-й ротации севооборота в многолетнем полевом опыте при применении удобрений / В. И. Титова, Л. Д. Варламова, Е. Г. Тюрникова [и др.] // Агрохимия. – 2013. – № 7. – С. 25-32.

154. Усков, И. Б. Эффективность удобрений и продуктивность земледелия при глобальном изменении климата / И. Б. Усков, Л. М. Державин // Плодородие. – 2008. – № 2. – С. 7-9.

155. Усова, К. А. Влияние возрастающих доз азотных удобрений на урожайность и качество зерна озимой ржи / К. А. Усова, Н. В. Токарева, О. В. Чухина // Молочнохозяйственный вестник. – 2012. – № 1. – С. 28-31.

156. Уткина, Е. И. Технологические особенности возделывания сорта озимой ржи Фаленская 4 в условиях изменяющегося климата / Е. И. Уткина, Л. И. Кедрова, Е. А. Шляхтина [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2015. – № 5(48). – С. 34-38.

157. Фесенко, М. А. О значимости агрометеорологических и техногенных факторов при возделывании культур полевого севооборота на северо-западе России / М. А. Фесенко, А. М. Шпанев, В. В. Смук // Научные труды по агрономии. – 2020. – № 1(3). – С. 28-32.

158. Формирование урожая основных сельскохозяйственных культур / Пер. с чеш. З.К Благовещенской. – М.: Колос, 1984. – с. 367.

159. Церлинг, В. В. Применение методов растительной диагностики для определения потребности озимых зерновых в подкормке азотом / В. В. Церлинг,

В. П. Толстоусов, М. А. Горшкова // Химия в сельском хозяйстве. – 1982. – № 5. – С.5-10.

160. Церлинг, В. В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справочник / В. В. Церлинг. – М.: Агропромиздат, 1990 – 235 с.

161. Цыгуткин, А. С. Особенности постановки полевого опыта с минеральными удобрениями на основе неполной факториальной схемы 1/9(6х6х6) / А. С. Цыгуткин, М. Т. Васбиева, Д. Г. Шишков // Земледелие. – 2022. – № 6. – С. 22-25.

162. Чеботарев, Н. Т. Эффективность длительного применения удобрений в кормовом севообороте на дерново-подзолистой почве / Н. Т. Чеботарев, А. А. Юдин, П. И. Конкин, Н. В. Булатова // Кормопроизводство. – 2018. – № 11. – С. 19-22.

163. Чеботарев, Н. Т. Органические и минеральные удобрения как факторы повышения продуктивности агроценозов (на примере северной тайги Республики Коми) / Н. Т. Чеботарев, А. А. Юдин, А. В. Облизов [и др.]. – Сыктывкар : Коми республиканская академия государственной службы и управления, 2019. – 130 с.

164. Чеботарев, Н. Т. Влияние длительного применения извести и минеральных удобрений на продуктивность бобово-злаковой травосмеси и свойства дерново-подзолистой почвы в условиях Республики Коми / Н. Т. Чеботарев, О. В. Броварова, С. А. Быков // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 5(97). – С. 31-36.

165. Чухина, О. В. Влияние различных доз удобрений на качественные показатели озимой ржи при возделывании ее в севообороте / О. В. Чухина // Arctic Environmental Research. – 2014. – №. 3. – С. 101-108.

166. Чухина, О. В. Оплата удобрений прибавкой урожая зерна озимой ржи в Вологодской области / О. В. Чухина, А. И. Демидова, В. В. Ганичева // Znanstvena Misel. – 2020. – № 48-1(48). – С. 8-11.

167. Шафран, С. А. Влияние агрохимических свойств почв Центрального района на урожайность зерновых культур / С. А. Шафран, В. А. Прошкин // Агрохимия. – 2008. – № 7. – С. 5-12.

168. Шафран, С. А. Влияние агрохимических свойств почв на окупаемость азотных удобрений / С. А. Шафран, В. А. Прошкин, Г. И. Ваулина, Е. С. Козеичева // Агрохимия. – 2010. – № 8. – С. 15-23.

169. Шафран, С. А. Окупаемость фосфорных удобрений прибавкой урожайности озимой и яровой пшеницы на почвах России / С. А. Шафран, В. А. Прошкин, С. Н. Адрианов, Е. В. Шаброва // Агрохимия. – 2011. – № 10. – С. 9-21.

170. Шафран, С. А. Окупаемость калийных удобрений прибавкой урожая зерновых культур на почвах России / С. А. Шафран, В. А. Прошкин, Т. М. Духанина // Агрохимия. – 2012. – № 12. – С. 31-40.

171. Шафран, С. А. Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений / С. А. Шафран // Агрохимия. – 2015. – № 3. – С. 26-33.

172. Шафран, С. А. (а) Динамика содержания подвижного фосфора в почвах нечерноземной зоны и его регулирование / С. А. Шафран, Н. А. Кирпичников, А. А. Ермаков, А. И. Семенова // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 14-20.

173. Шафран, С. А. (б) Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур (сообщение 2). Фосфорные и калийные удобрения / С. А. Шафран // Агрохимия. – 2021. – № 8. – С. 9-16.

174. Шляхтина, Е. А. Адаптивность сортов озимой ржи по технологическим свойствам зерна / Е. А. Шляхтина, О. Н. Рылова, И. В. Лыскова // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2018. – № 2(26). – С. 57-61.

175. Шмырева, Н. Я. Потоки и баланс азота удобрения и азота почвы в условиях севооборота на эродированной дерново-подзолистой почве (исследования с ^{15}N) сообщение 1. Озимая рожь / Н. Я. Шмырева, А. А. Завалин, О. А. Соколов // Плодородие. – 2018. – № 4(103). – С. 2-5.

176. Шпанев, А. М. Влияние предпосевного внесения полного минерального удобрения на фитосанитарное состояние посевов озимой ржи на Северо-Западе России / А. М. Шпанев, М. А. Фесенко // Вестник защиты растений. – 2019. – № 3(101). – С. 34-40.

177. Юлушев, И. Г. Приемы повышения плодородия почв Вятско-Камской земледельческой провинции / И. Г. Юлушев // Агрохимия. – 2019. – № 2. – С. 3-12.

178. Якименко, В. Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2019. – № 3. – С. 19-29.

179. Ямалтдинова, В. Р. Влияние систем удобрений на урожайность культур полевого севооборота и содержание гумуса в дерново-подзолистой почве / В. Р. Ямалтдинова, Н. М. Мудрых, И. А. Самофалова // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1(37). – С. 21-25.

180. Вострухин, Н. П. Длительные стационарные полевые опыты - неотъемлемая составляющая фундаментально-прикладных исследований в земледелии / Н. П. Вострухин // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2014. – № 4. – С. 38-45.

181. Домаш, В. И. Роль гидролитических ферментов в устойчивости злаковых культур к прорастанию зерна в колосе / В. И. Домаш, О. А. Иванов, И. А. Гордей [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. – 2017. – № 1. – С. 77-83.

182. Иванина, В. В. Динамика физико-химических свойств чернозема оподзоленного при длительном использовании удобрений в зерносвекловичном севообороте / В. В. Иванина // Агробиология. – 2012. – № 9(96). – С. 68-72.

183. Лапа, В. В. Баланс азота, фосфора и калия и применение удобрений на почвах пахотных земель Беларуси / В. В. Лапа, Н. Н. Ивахненко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 2. – С. 48-57.

184. Логинов, В. Ф. Прогноз изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси на период 2016-2035 гг / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2018. – Т. 56, № 1. – С. 51-64.

185. Маркевич, Д. В. Сравнительный анализ состава незаменимых аминокислот в основной продукции зерновых культур / Д. В. Маркевич, Ю. В. Путятин, О. М. Таврыкина // Почвоведение и агрохимия. – 2013. – № 1(50). – С. 178-185.

186. Мезенцева, Е. Г. Влияние дефицитных систем удобрения на динамику содержания фосфатов и калия, их баланс в длительном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве / Е. Г. Мезенцева, О. Г. Кулеш, А. А. Грачева // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 1(68). – С. 40-49.

187. Путятин, Ю. В. Сравнительный анализ состава незаменимых аминокислот в продукции основных сельскохозяйственных культур / Ю. В. Путятин, Т. М. Серая, Д. В. Маркевич, О. М. Таврыкина // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2014. – № 3. – С. 60-68.

188. Abebe, A. Assessment of the limiting nutrients for wheat (*Triticum aestivum* L.) growth using Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) / A. Abebe, G. Abera, S. Beyene // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2018. – V. 49. – №. 21. – P. 2653-2663.

189. Bangroo, S. A. Diagnosis and recommendation Integrated System (DRIS) – A review / S. A. Bangroo, M. I. Bhat, T. Ali, M. A. Aziz, M. A. Bhat, M. A. Wani // International Journal of Current Research. – 2010. – V. 10. – P. 84-97.

190. Darby, H., Bruce, J., Jean, H., & Krezinski, I. (2019). Rye nitrogen fertility trial. University of Vermont Northwest Crops and Soil Program. – URL: https://www.uvm.edu/sites/default/files/media/2019_Winter_Rye_Nitrogen_Fertility_Trial.pdf (дата обращения 16.04.2023).

191. Hadasch, S. Trends in mean performance and stability of winter wheat and winter rye yields in a long-term series of variety trials / Hadasch S., F. Laidig, J. Macholdt, E. Bönecke, H. P. Piepho // Field Crops Research. – 2020. – V. 252. – P. 107792.

192. Järvan, M. The productivity, quality and bread-making properties of organically and conventionally grown winter rye / M. Järvan, L. Lukme, I. Tupits, A. Akk // *Zemdirbyste-Agriculture*. – 2018. – V. 105(4). – P. 323–330.

193. Kunkulberga, D. Grain quality of winter rye cultivars grown in Latvia / D. Kunkulberga, A. Linina, A. Kronberga, A. Kokare, I. Lenenkova // *The 11th Baltic Conference on Food Science and Technology: «Food Science and Technology in a Changing World»*, Foodbalt – 2017, Proceeding, Jelgava, Latvia. – 2017. – C. 121-125.

194. Linina, A. Winter rye grain quality of hybrid and population cultivars / A. Linina, D. Kunkulberga, A. Kronberga, I. Locmele // *Agronomy Research*. – 2019. – № 17(S2). – P. 1380-1389.

195. Loide, V. The productivity and yield stability of winter rye variety 'Vambo' in long term NPK fertilization trial on Calcaric Cambisol / V. Loide // *Agraarteadus*. – 2015. – V. 26. – № 2. – P. 62-67.

196. Osvalde, A. Optimization of plant mineral nutrition revisited: the roles of plant requirements, nutrient interactions, and soil properties in fertilization management / A. Osvalde // *Environmental and Experimental Biology*. – 2011. – V. 9. – № 3. – C. 1-8.

197. Rawat, J. Potassium and its role in sustainable agriculture / J. Rawat, P. Sanwal, J. Saxena // *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture*. – New Delhi : Springer India, 2016. – C. 235-253.

198. Šeremešić, S. Comparative study of growing winter small grain cereals in organic and conventional production systems / S. Šeremešić, M. Manojlović, B. Vojnov [et al.] // *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. – 2019. – V. 23. – № 4. – 176-179.

199. Studnicki, M. Effects of Fertilizers and Manures on Temporal Yield Variability of Winter Rye / M. Studnicki, J. Macholdt, A. Macdonald, W. Stępień // *Agronomy*. – 2021. – V. 11. – № 3. – P. 519.

200. Szuleta, E. Influence of nitrogen rate on yield and profitability of rye grain production / E. Szuleta, J. M. Shockley, C. Knott, T. Phillips, D. A. Van Sanford // *Crop, Forage & Turfgrass Management*. – 2023. – V. 9 – № 2. P. e20243.

201. Umarov, R. A. Influence of Sowing Dates and Nutritional Background on the Formation of the Yield of Winter Rye / R. A. Umarov, B. M. Azizov // International Journal of Integrated Health Sciences. – 2021. – V. 4. – № 11. – P. 217-221.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Схематический план расположения делянок в опыте

Д. 43 114	Д. 44 444	Д. 45 300	Д. 46 141	Д. 47 003	Д. 48 555
Д. 37 030	Д. 38 411	Д. 39 252	Д. 40 225	Д. 41 522	Д. 42 333
Д. 31 414	Д. 32 330	Д. 33 552	Д. 34 303	Д. 35 255	Д. 36 033
Д. 25 000	Д. 26 111	Д. 27 222	Д. 28 441	Д. 29 144	Д. 30 525
Д. 19 222	Д. 20 525	Д. 21 144	Д. 22 000	Д. 23 303	Д. 24 033
Д. 13 414	Д. 14 441	Д. 15 255	Д. 16 552	Д. 17 330	Д. 18 111
Д. 7 030	Д. 8 114	Д. 9 411	Д. 10 225	Д. 11 300	Д. 12 444
Д. 1 555	Д. 2 333	Д. 3 141	Д. 4 522	Д. 5 252	Д. 6 003

Описание сорта озимой ржи Фалёнская 4

Включен в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации с 1999 г. Районирован по Северному, Северо-Западному, Центральному и Волго-Вятскому регионам РФ. Патент РФ № 0292.

Авторы: Савельев Ю. П., Кедрова Л. И., Савельева Р. А.,
Псарева Н. А., Шешегова Т. К.

Сорт селекции ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого создан методом отбора на провокационных фонах по снежной плесени из популяции, полученной в результате 4-х беккроссов сорта Вятка 2, 3-х зимостойких образцов коллекции ВИР с сортом Дымка.

Сорт среднепоздний, высокозимостойкий. Потенциальная урожайность более 9,0 т/га. Стебель средней толщины, прочный, устойчив к полеганию. Высота растений 98-125 см. Имеет высокую способность к отрастанию после поражения снежной плесенью. Мучнистой росой, бурой и стеблевой ржавчиной поражается на уровне стандарта Вятка 2. Характеризуется высокой выносливостью к кислым почвам с повышенным содержанием ионов алюминия. Кроме того, сорт отличается высокой морозостойкостью, что ярко проявилось в условиях низких температур на глубине залегания узла кущения в зимний период 2009-2010 г., когда озимые зерновые культуры погибли на больших площадях во многих регионах страны. В 2010 г наблюдался аномально засушливый весенне-летний период. В таких условиях сорт Фалёнская 4 сформировал высокие урожаи, подтверждая значение озимой ржи как наиболее морозостойкой, адаптивной и засухоустойчивой зерновой культуры. Например, в ОАО «Октябрьский» Куменского района Кировской области на площади 945 га урожайность сорта в 2010 г. составила 4,1 т/га, в СПК ордена Ленина племзавод «Красный Октябрь» того же района на площади 1000 га средняя урожайность получена 3,4 т/га, а на лучших по плодородию почвах до 5,8 т/га.

В достаточно благоприятных условиях 2011 г. сорт Фалёнская 4 в ОАО «Октябрьский» Куменского района на площади 570 га сформировал урожайность

около 6 т/га. О высокой адаптивности и пластичности сорта свидетельствуют средние многолетние показатели урожайности конкурсного сортоиспытания (г. Киров) за 2001-2017 гг. – 4,5 т/га. В 2007 г. на сорт Фалёнская 4 получен Диплом «Гран-При» как «Лучший сорт селекции зерновых культур 2007 г.» (Ростовская область, выставка-демонстрация «День Российского поля»).

Сорт продовольственного назначения. Хлебопекарные качества высокие (1-2 класс качества). Масса 1000 зерен 27,0-31,0 г.

Сорт широко распространен в регионах возделывания и находится в первой пятерке по рейтингу высеянных семян, что говорит о его востребованности в производстве.

Погодные условия вегетационных периодов по годам проведения исследований

В1 – Погодные условия и средние многолетние данные вегетационных периодов по годам проведения исследований

Месяц	Декада	Сумма осадков, мм			Средняя температура, °С			ГТК	
		2018-2019 гг.	2020-2021 гг.	Средняя многолетняя	2018-2019 гг.	2020-2021 гг.	Средняя многолетняя	2018-2019 гг.	2020-2021 гг.
Август	III	15,2	4,1	23,4	14,0	16,7	13,2	0,99	0,22
Сентябрь	I	3,3	5,9	18,5	11,4	13,2	12,2	0,30	0,45
	II	23,3	55,0	22,7	11,7	9,7	10,8	1,93	1,84
	III	13,3	7,5	26,4	10,3	7,7	6,5	0,08	–
Октябрь	I	31,1	3,3	22,1	6,1	6,2	3,8	–	–
Апрель	III	3,5	9,4	10,1	6,3	6,1	5,9	–	–
Май	I	21,9	7,1	15,9	13,7	13,0	10,2	1,77	0,56
	II	24,4	0,0	14,4	13,0	20,5	11,3	0,93	0,00
	III	19,5	15,6	24,2	12,2	15,4	12,3	1,47	0,92
Июнь	I	22,8	0,0	27,7	15,0	14,7	13,0	1,52	0,00
	II	11,5	22,0	31,0	13,8	19,5	15,4	0,83	1,13
	III	39,1	42,5	30,3	16,2	22,3	18,4	2,41	1,91
Июль	I	66,2	61,3	28,0	15,9	20,9	18,9	4,16	2,93
	II	36,6	3,8	25,1	18,3	18,3	16,9	2,00	0,21
	III	40,1	78,5	25,7	16,5	16,4	19,0	2,20	4,35
Август	I	76,6	–	18,6	12,6	–	17,2	6,08	–
	II	87,1	–	22,0	16,3	–	14,4	5,34	–

В2 – Суммы температур по отдельным периодам

Показатель	Период	Года		
		2018-2019 гг.	2020-2021 гг.	Средняя многолетняя
Сумма температур	летне-осенний	549,0	551,3	462,3
	весенне-летний	1687,7	1703,7	1745,8
	вегетационный	2236,7	2255,0	2208,1
Сумма температур >10 °С	летне-осенний	420,3	375,6	331,7
	весенне-летний	1579,1	1589,3	1592,8
	вегетационный	1999,4	1964,9	1924,5

Приложение Г

Результаты регрессионного анализа зависимости рН_{КС} от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Г1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000*	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,341	0,324	0,312	0,280	0,266	0,197	0,004	0,002	0,003
X ₂ (N)	0,709	0,699	0,633	0,593	0,604	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,590	0,581	0,577	0,499	0,570	0,523	0,484	–	–
X ₄ (P)	0,865	0,861	0,806	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,546	0,400	0,386	0,391	0,206	0,236	0,220	0,264	–
X ₆ (K)	0,939	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,903	0,890	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,522	0,463	0,452	0,417	0,453	0,544	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,789	0,790	0,776	0,661	–	–	–	–	–

Здесь и далее: **0,000** – достоверен при $p < 0,05$

Г2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,074	0,064	0,057	0,052	0,053	0,046	0,044	0,042	0,006
X ₂ (N ²)	0,498	0,436	0,426	0,211	0,216	0,204	0,201	0,191	–
X ₃ (P)	0,740	0,731	0,280	0,271	0,280	0,280	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,804	0,775	–	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,461	0,444	0,425	0,416	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,300	0,283	0,283	0,356	0,651	–	–	–	–
X ₇ (NP)	1,000	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,571	0,557	0,545	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,369	0,352	0,349	0,339	0,341	0,261	0,603	–	–

Г3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,239	0,215	0,011	0,009	0,007	0,000	0,000
X ₂ (N)	0,808	0,738	–	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,450	0,423	0,431	0,364	0,426	0,362	–
X ₄ (P)	0,684	0,701	0,728	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,419	0,409	0,367	0,377	0,433	0,155	0,020
X ₆ (K)	0,626	0,627	0,626	0,605	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,862	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,381	0,371	0,391	0,386	0,453	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,300	0,273	0,271	0,279	0,171	0,208	0,002

Г4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,077	0,068	0,039	0,005	0,005	0,004	0,001	0,001
X ₂ (N ²)	0,516	0,503	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,057	0,049	0,043	0,040	0,045	0,042	0,039	0,004
X ₄ (P ²)	0,157	0,139	0,158	0,207	0,221	0,220	0,208	–
X ₅ (K)	0,306	0,290	0,289	0,277	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,294	0,181	0,133	0,141	0,272	–	–	–
X ₇ (NP)	0,377	0,362	0,479	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,377	0,362	0,180	0,216	0,224	0,586	–	–
X ₉ (PK)	0,766	–	–	–	–	–	–	–

Г5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,229	0,209	0,191	0,174	0,150	0,054	0,000	0,001	0,000
X ₂ (N)	0,720	0,703	0,692	0,649	0,618	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,511	0,492	0,475	0,453	0,097	0,080	0,067	0,115	–
X ₄ (P)	0,736	0,722	0,711	0,803	–	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,441	0,425	0,241	0,229	0,218	0,247	0,194	–	–
X ₆ (K)	0,967	0,970	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,968	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,663	0,646	0,605	0,520	0,505	0,601	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,767	0,754	0,720	–	–	–	–	–	–

Г6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,040	0,034	0,028	0,025	0,023	0,022	0,023	0,001	0,000
X ₂ (N ²)	0,415	0,429	0,411	0,398	0,171	0,173	0,170	–	–
X ₃ (P)	0,344	0,328	0,146	0,105	0,101	0,096	0,121	0,128	–
X ₄ (P ²)	0,740	0,816	–	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,378	0,362	0,350	0,349	0,342	0,383	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,299	0,283	0,242	0,325	0,463	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,769	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,495	0,481	0,467	0,461	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,625	0,613	0,468	–	–	–	–	–	–

Г7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$pH_{KCl} (1 \text{ закладка}) = 5,33 - 0,281 \times N^{0,5} \quad (\Gamma 7.1)$$

$$pH_{KCl} (1 \text{ закладка}) = 5,23 - 0,114 \times N \quad (\Gamma 7.2)$$

$$pH_{KCl} (2 \text{ закладка}) = 5,44 - 0,152 \times N^{0,5} + 0,125 \times K^{0,5} - 0,086 \times PK^{0,5} \quad (\Gamma 7.3)$$

$$pH_{KCl} (2 \text{ закладка}) = 5,510 - 0,063 \times N - 0,051 \times P \quad (\Gamma 7.4)$$

$$pH_{KCl} (\text{среднее}) = 5,44 - 0,234 \times N^{0,5} \quad (\Gamma 7.5)$$

$$pH_{KCl} (\text{среднее}) = 5,35 - 0,095 \times N \quad (\Gamma 7.6)$$

Г8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	Г7.1	Г7.2	Г7.3	Г7.4	Г7.5	Г7.6
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,577	0,541	0,827	0,788	0,701	0,656
$R^2_{\text{множ}}$	0,333	0,293	0,684	0,621	0,491	0,431
R^2_{adj}	0,303	0,261	0,637	0,585	0,468	0,405
$F_{\text{факт}}$	11,0	9,1	14,5	17,2	21,246	16,7
$F_{\text{теор}}$	4,3	4,3	3,1	3,5	4,3	4,3
p	0,003	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
$S_{\text{ух}}$	0,307	0,317	0,120	0,128	0,184	0,195
ε	4,8	5,0	1,7	1,8	2,9	2,9

Здесь и далее: $\Gamma_{\text{множ}}$ – коэффициент множественной корреляции, $R^2_{\text{множ}}$ – коэффициент множественной детерминации, R^2_{adj} – скорректированный коэффициент детерминации, $F_{\text{факт}}$ – фактическое значение критерия Фишера, $F_{\text{теор}}$ – теоретическое значение критерия Фишера, p – уровень значимости, $S_{\text{ух}}$ – стандартная ошибка оценки регрессии; ε – относительная ошибка аппроксимации, %

Г9 Расчётные значения pH_{KCl} , формула Г7.5

Показатель	Дозы N, мг/кг					
	0	30	60	90	120	150
pH_{KCl}	5,4	5,2	5,1	5,0	5,0	4,9

Приложение Д

Результаты регрессионного анализа зависимости Нг от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Д1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,719	0,734	0,725	0,686	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,435	0,421	0,412	0,368	0,345	0,070	0,031	0,032	0,011
X ₃ (P ^{0,5})	0,797	0,893			—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,818				—	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,777	0,796	0,789		—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,567	0,552	0,509	0,172	0,170	0,155	0,201		
X ₇ (NP ^{0,5})	0,640	0,547	0,515	0,495	0,473	0,487			
X ₈ (NK ^{0,5})	0,606	0,569	0,558	0,564	0,587				
X ₉ (PK ^{0,5})	0,302	0,292	0,170	0,161	0,155	0,136	0,115	0,336	

Д2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,504	0,489	0,474	0,460	0,052	0,048	0,018	0,023	0,011
X ₂ (N ²)	0,845	0,840	0,834	0,809	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,716	0,707	0,697	0,688	0,686	0,736	—	—	—
X ₄ (P ²)	0,819	0,813	0,791	0,759	0,777	—	—	—	—
X ₅ (K)	0,987	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,975	0,975	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP)	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,552	0,537	0,412	0,398	0,401	0,415	0,242	—	—
X ₉ (PK)	0,709	0,699	0,575	0,563	0,585	0,625	0,218	0,520	—

Д3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,759	—	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,144	0,060	0,034	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₃ (P ^{0,5})	0,242	0,237	0,236	0,197	0,231	0,236	0,142	—
X ₄ (P)	0,279	0,278	0,284	0,391	0,361	0,534	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,289	0,256	0,226	0,254	0,362	—	—	—
X ₆ (K)	0,406	0,360	0,389	0,438	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,395	0,393	0,400	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,728	0,698	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,122	0,114	0,110	0,086	0,031	0,009	0,009	0,000

Д4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,156	0,143	0,009	0,009	0,026	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,660	0,650	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,043	0,037	0,033	0,034	0,037	0,040	0,001
X ₄ (P ²)	0,164	0,149	0,113	0,115	0,156	0,303	–
X ₅ (K)	0,400	0,385	0,366	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,095	0,043	0,041	0,013	0,011	0,011	0,011
X ₇ (NP)	0,294	0,278	0,150	0,144	0,257	–	–
X ₈ (NK)	0,162	0,149	0,152	0,152	–	–	–
X ₉ (PK)	0,753	–	–	–	–	–	–

Д5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,657	0,646	0,626	0,619	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,179	0,138	0,125	0,075	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₃ (P ^{0,5})	0,431	0,411	0,392	0,374	0,400	–	–	–
X ₄ (P)	0,459	0,419	0,403	0,376	0,397	0,797	0,096	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,441	0,424	0,238	0,174	0,162	0,164	–	–
X ₆ (K)	0,972	0,974	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,981	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,920	0,915	0,897	–	–	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,113	0,098	0,070	0,050	0,048	0,040	0,001	0,002

Д6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,274	0,042	0,038	0,033	0,004	0,003	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,717	–	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,213	0,202	0,195	0,184	0,180	0,011	0,011	0,006
X ₄ (P ²)	0,409	0,354	0,345	0,395	0,548	–	–	–
X ₅ (K)	0,710	0,694	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,434	0,449	0,462	0,145	0,170	0,161	0,280	–
X ₇ (NP)	0,664	0,499	0,484	0,473	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,285	0,295	0,283	0,271	0,328	0,314	–	–
X ₉ (PK)	0,664	0,654	0,645	–	–	–	–	–

Д7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$H_{Г(1 \text{ закладка})} = 2,00 + 0,149 \times N \quad (Д7.1)$$

$$H_{Г(1 \text{ закладка})} = 2,00 + 0,149 \times N \quad (Д7.2)$$

$$H_{Г(2 \text{ закладка})} = 1,98 + 0,240 \times N + 0,235 \times PK^{0,5} \quad (Д7.3)$$

$$H_{Г(2 \text{ закладка})} = 1,86 + 0,249 \times N + 0,160 \times P + 0,021 \times K^2 \quad (Д7.4)$$

$$H_{Г(\text{среднее})} = 1,95 + 0,185 \times N + 0,154 \times PK^{0,5} \quad (Д7.5)$$

$$H_{Г(\text{среднее})} = 1,92 + 0,202 \times N + 0,124 \times P \quad (Д7.6)$$

Д8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	Д7.1	Д7.2	Д7.3	Д7.4	Д7.5	Д7.6
$r_{\text{множ}}$	0,507	0,507	0,912	0,911	0,840	0,819
$R^2_{\text{множ}}$	0,257	0,257	0,831	0,830	0,705	0,671
R^2_{adj}	0,224	0,224	0,815	0,804	0,677	0,640
$F_{\text{факт}}$	7,6	7,6	51,7	32,5	25,1	21,4
$F_{\text{теор}}$	4,3	4,3	3,5	3,1	3,5	3,5
p	0,011	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
$S_{\text{ух}}$	0,450	0,450	0,305	0,314	0,314	0,332
ε	17,5	17,5	7,8	8,0	9,8	10,6

Д9 Расчётные значения гидролитической кислотности, формула Д7.5

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы фосфорно-калийных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	НГ, ммоль(экв)/100 г					
0	1,95	2,10	2,26	2,41	2,57	2,72
30	2,14	2,29	2,44	2,60	2,75	2,91
60	2,32	2,47	2,63	2,78	2,94	3,09
90	2,51	2,66	2,81	2,97	3,12	3,28
120	2,69	2,84	3,00	3,15	3,31	3,46
150	2,88	3,03	3,18	3,34	3,49	3,65

Приложение Е

Результаты регрессионного анализа зависимости S от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Е1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,902	0,889	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,667	0,641	0,577	0,604	0,606	0,485	0,478	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,766	0,766	0,770	0,784	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,823	0,769	0,774	0,661	0,554	0,564	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,725	0,707	0,682	0,651	0,668	0,206	0,195	0,023
X ₆ (K)	0,797	0,742	0,746	0,761	0,716	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,828	0,812	0,794	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,400	0,387	0,377	0,376	0,342	0,367	0,389	0,008
X ₉ (PK ^{0,5})	0,903	—	—	—	—	—	—	—

Е2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,604	0,593	0,581	0,566	0,571	0,557	—	—	—
X ₂ (N ²)	0,509	0,492	0,477	0,498	0,478	0,512	0,017	0,015	0,017
X ₃ (P)	0,930	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P ²)	0,817	0,795	0,785	—	—	—	—	—	—
X ₅ (K)	0,699	0,685	0,675	0,670	—	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,644	0,630	0,613	0,602	0,756	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,606	0,594	0,581	0,493	0,472	0,473	0,480	—	—
X ₈ (NK)	0,499	0,483	0,469	0,456	0,445	0,283	0,285	0,234	—
X ₉ (PK)	0,928	0,925	—	—	—	—	—	—	—

Е3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,867	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,559	0,477	0,217	0,218	0,170	0,198	0,161	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,165	0,153	0,130	0,106	0,114	0,153	0,132	0,102	0,552
X ₄ (P)	0,240	0,228	0,189	0,229	0,114	0,144	0,131	0,125	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,336	0,307	0,311	0,332	0,283	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,636	0,602	0,472	0,284	0,254	0,691	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,488	0,462	0,475	0,513	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,678	0,677	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,573	0,568	0,525	—	—	—	—	—	—

**Е4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,905	0,900	–	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,756	0,750	0,719	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,079	0,069	0,061	0,053	0,048	0,046	0,046
X ₄ (P ²)	0,123	0,104	0,093	0,063	0,028	0,029	0,029
X ₅ (K)	0,543	0,368	0,349	0,258	0,282	0,394	–
X ₆ (K ²)	0,965	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,602	0,589	0,577	0,659	–	–	–
X ₈ (NK)	0,414	0,337	0,321	0,118	0,054	–	–
X ₉ (PK)	0,602	0,534	0,520	0,539	0,485	0,040	0,036

**Е5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,854	0,843	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,470	0,454	0,350	0,354	0,518	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,279	0,258	0,250	0,231	0,255	0,249	–	–
X ₄ (P)	0,357	0,339	0,333	0,340	0,185	0,179	0,409	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,375	0,188	0,174	0,141	0,131	0,013	0,015	0,013
X ₆ (K)	0,975	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,543	0,522	0,492	0,491	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,311	0,260	0,248	0,194	0,204	0,002	0,001	0,002
X ₉ (PK ^{0,5})	0,800	0,771	0,769	–	–	–	–	–

**Е6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,666	0,656	0,645	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,445	0,434	0,420	0,036	0,032	0,030	0,008	0,003	0,003
X ₃ (P)	0,383	0,366	0,351	0,328	0,328	0,329	0,450	–	–
X ₄ (P ²)	0,520	0,506	0,517	0,498	0,501	0,492	–	–	–
X ₅ (K)	0,514	0,500	0,486	0,488	0,662	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,669	0,694	0,551	0,551	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,449	0,433	0,418	0,407	0,398	0,387	0,172	0,158	–
X ₈ (NK)	0,845	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,822	0,816	–	–	–	–	–	–	–

Е7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$S_{(1 \text{ закладка})} = 18,53 + 2,076 \times K^{0,5} - 1,160 \times NK^{0,5} \quad (\text{Е7.1})$$

$$S_{(1 \text{ закладка})} = 20,11 - 0,123 \times N^2 \quad (\text{Е7.2})$$

$$S_{(2 \text{ закладка})} = \text{const} \quad (\text{Е7.3})$$

$$S_{(2 \text{ закладка})} = 19,11 - 1,153 \times P + 0,245 \times P^2 - 0,083 \times NK \quad (\text{Е7.4})$$

$$S_{(\text{среднее})} = 18,37 + 1,285 \times K^{0,5} - 0,817 \times NK^{0,5} \quad (\text{Е7.5})$$

$$S_{(\text{среднее})} = 19,26 - 0,089 \times N^2 \quad (\text{Е7.6})$$

Е8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	Е7.1	Е7.2	Е7.3	Е7.4	Е7.5	Е7.6
$r_{\text{множ}}$	0,541	0,481	—	0,586	0,622	0,572
$R^2_{\text{множ}}$	0,293	0,232	—	0,344	0,387	0,328
R^2_{adj}	0,225	0,197	—	0,245	0,329	0,297
$F_{\text{факт}}$	4,3	6,6	—	3,5	6,6	10,7
$F_{\text{теор}}$	3,5	4,3	—	3,1	3,5	4,3
p	0,026	0,017	—	0,035	0,006	0,003
$S_{\text{ух}}$	2,046	2,083	—	1,272	1,153	1,180
ε	7,3	8,1	—	5,3	4,5	5,1

Е9 Расчётные значения суммы поглощённых оснований, формула Е7.5

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы калийных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	S, ммоль(экв)/100 г					
0	18,4	19,7	20,2	20,6	20,9	21,2
30	18,4	18,8	19,0	19,2	19,3	19,4
60	18,4	18,5	18,6	18,6	18,6	18,7
90	18,4	18,2	18,2	18,1	18,1	18,1
120	18,4	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6
150	18,4	17,8	17,6	17,4	17,3	17,2

Приложение Ж

Результаты регрессионного анализа зависимости ЕКО и V от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Ж1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, ЕКО

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,903	0,891	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,623	0,610	0,525	0,478	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,293	0,274	0,262	0,252	0,270	0,277	—	—
X ₄ (P)	0,395	0,379	0,369	0,272	0,187	0,118	0,081	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,433	0,256	0,241	0,112	0,026	0,020	0,022	0,026
X ₆ (K)	0,953	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,483	0,458	0,432	0,408	0,622	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,286	0,232	0,219	0,215	0,046	0,012	0,009	0,024
X ₉ (PK ^{0,5})	0,805	0,802	0,791	—	—	—	—	—

Ж2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, ЕКО

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,910	0,907	0,904	—	—	—	—	—
X ₂ (N ²)	0,404	0,387	0,305	0,043	0,038	0,012	0,003	0,003
X ₃ (P)	0,502	0,486	0,472	0,454	0,454	0,625	—	—
X ₄ (P ²)	0,613	0,585	0,573	0,558	0,560	—	—	—
X ₅ (K)	0,508	0,492	0,478	0,467	0,379	0,371	0,385	—
X ₆ (K ²)	0,766	0,706	0,626	0,618	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,314	0,297	0,281	0,266	0,256	0,105	0,024	0,015
X ₈ (NK)	0,944	0,942	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,944	—	—	—	—	—	—	—

Ж3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, V

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,494	0,485	0,457	0,458	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,136	0,123	0,102	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₃ (P ^{0,5})	0,239	0,210	0,199	0,182	0,208	0,223	0,432	—
X ₄ (P)	0,265	0,248	0,185	0,154	0,173	0,324	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,493	0,238	0,224	0,241	0,229	—	—	—
X ₆ (K)	0,904	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,862	0,869	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,634	0,632	0,627	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,212	0,183	0,171	0,118	0,121	0,303	0,378	0,042

**Ж4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, V**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,476	0,460	0,455	0,444	–	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,394	0,352	0,333	0,322	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₃ (P)	0,164	0,149	0,140	0,131	0,117	0,115	0,104	0,095	–
X ₄ (P ²)	0,317	0,233	0,222	0,248	0,232	0,230	0,227	–	–
X ₅ (K)	0,762	0,754	–	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,592	0,579	0,616	0,262	0,250	0,459	–	–	–
X ₇ (NP)	0,922	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,405	0,388	0,374	0,362	0,357	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,639	0,627	0,616	–	–	–	–	–	–

**Ж5 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного
анализа**

$$EKO = 20,76 + 1,037 \times K^{0,5} - 0,496 \times NK^{0,5} \quad (\text{Ж5.1})$$

$$EKO = 21,45 - 0,112 \times N^2 + 0,107 \times NP \quad (\text{Ж5.2})$$

$$V = 90,85 - 1,089 \times N - 0,527 \times PK^{0,5} \quad (\text{Ж5.3})$$

$$V = 89,19 - 0,237 \times N^2 \quad (\text{Ж5.4})$$

Ж6 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение			
	Ж5.1	Ж5.2	Ж5.3	Ж5.4
r _{множ}	0,491	0,596	0,807	0,750
R ² _{множ}	0,241	0,355	0,651	0,563
R ² _{adj}	0,169	0,294	0,618	0,543
F _{факт}	3,3	5,8	19,6	28,3
F _{теор}	3,5	3,5	3,5	4,3
p	0,055	0,010	0,000	0,000
S _{ух}	1,049	0,968	1,774	1,939
ε	3,7	3,6	1,6	1,7

Ж7 Расчётные значения ёмкости поглощённых оснований, формула Ж5.2

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы фосфорных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	ЕКО, ммоль(экв)/100 г					
0	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
30	21,3	21,4	21,6	21,7	21,8	21,9
60	21,0	21,2	21,4	21,6	21,9	22,1
90	20,4	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0
120	19,7	20,1	20,5	20,9	21,4	21,8
150	18,7	19,2	19,7	20,3	20,8	21,3

Ж8 Расчётные значения степени насыщенности основаниями, формула Ж5.3

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы фосфорно-калийных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	V, %					
0	90,9	90,3	89,8	89,3	88,7	88,2
30	89,8	89,2	88,7	88,2	87,7	87,1
60	88,7	88,1	87,6	87,1	86,6	86,0
90	87,6	87,1	86,5	86,0	85,5	84,9
120	86,5	86,0	85,4	84,9	84,4	83,9
150	85,4	84,9	84,4	83,8	83,3	82,8

Приложение 3

Результаты регрессионного анализа зависимости содержания гумуса от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

31 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,907	0,830	0,826	0,873	—	—
X ₂ (N)	0,976	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,039	0,031	0,024	0,020	0,017	0,019
X ₄ (P)	0,133	0,119	0,096	0,087	0,053	0,034
X ₅ (K ^{0,5})	0,021	0,016	0,012	0,010	0,008	0,009
X ₆ (K)	0,021	0,017	0,010	0,004	0,003	0,003
X ₇ (NP ^{0,5})	0,647	0,621	0,614	0,561	0,396	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,872	0,867	0,869	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,903	0,902	—	—	—	—

32 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,962	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N ²)	0,639	0,430	0,419	0,557	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,143	0,128	0,119	0,111	0,102	0,098	0,463	—	—
X ₄ (P ²)	0,295	0,277	0,322	0,146	0,139	0,129	—	—	—
X ₅ (K)	0,156	0,140	0,131	0,123	0,113	0,108	0,109	0,095	—
X ₆ (K ²)	0,160	0,145	0,157	0,148	0,062	0,038	0,039	0,037	0,072
X ₇ (NP)	0,587	0,574	0,565	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,499	0,483	0,473	0,464	0,638	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,619	0,606	—	—	—	—	—	—	—

33 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,767	0,757	0,466	0,460	0,240	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,826	0,820	—	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,542	0,524	0,530	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,444	0,403	0,383	0,509	—	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,085	0,073	0,065	0,047	0,044	0,046	0,044	0,322	—
X ₆ (K)	0,380	0,337	0,318	0,269	0,239	0,114	0,071	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,286	0,266	0,196	0,179	0,127	0,049	0,022	0,020	0,005
X ₈ (NK ^{0,5})	0,246	0,228	0,215	0,215	0,242	0,631	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,985	—	—	—	—	—	—	—	—

34 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,461	0,244	0,112	0,102	0,055	0,049	0,038	0,051	0,029
X ₂ (N ²)	0,987	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,461	0,445	0,432	0,419	0,403	0,305	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,538	0,515	0,536	0,585	0,569	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,414	0,397	0,384	0,371	0,208	0,194	0,159	0,455	–
X ₆ (K ²)	0,720	0,705	0,679	0,755	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,830	0,799	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,444	0,384	0,388	0,375	0,242	0,227	0,227	–	–
X ₉ (PK)	0,764	0,756	0,748	–	–	–	–	–	–

35 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,880	0,725	0,714	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,918	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,297	0,268	0,244	0,230	0,189	0,108	0,180	–	–
X ₄ (P)	0,575	0,560	0,555	0,594	0,537	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,679	0,652	0,629	0,618	–	–	–	–	–
X ₆ (K)	0,292	0,274	0,249	0,258	0,146	0,102	0,133	0,148	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,331	0,268	0,255	0,108	0,105	0,050	0,050	0,141	0,051
X ₈ (NK ^{0,5})	0,504	0,485	0,465	0,514	0,489	0,342	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,909	0,893	–	–	–	–	–	–	–

36 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,605	0,592	0,580	0,576	0,583	0,878	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,748	0,665	0,655	0,584	0,583	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,547	0,533	0,519	0,517	0,494	0,600	0,428	–	–
X ₄ (P ²)	0,701	0,691	0,719	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,678	0,667	0,657	0,641	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,423	0,390	0,366	0,347	0,090	0,084	0,073	0,075	0,032
X ₇ (NP)	0,573	0,559	0,546	0,365	0,350	0,429	0,111	0,135	–
X ₈ (NK)	0,900	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,850	0,845	–	–	–	–	–	–	–

37 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$\text{Гумус}_{(1 \text{ закладка})} = 2,03 - 0,163 \times P^{0,5} + 0,062 \times P - 0,186 \times K^{0,5} + 0,094 \times K \quad (37.1)$$

$$\text{Гумус}_{(1 \text{ закладка})} = \text{const} \quad (37.2)$$

$$\text{Гумус}_{(2 \text{ закладка})} = 2,12 + 0,031 \times NP^{0,5} \quad (37.3)$$

$$\text{Гумус}_{(2 \text{ закладка})} = 2,13 + 0,023 \times N \quad (37.4)$$

$$\text{Гумус}_{(\text{среднее})} = \text{const} \quad (37.5)$$

$$\text{Гумус}_{(\text{среднее})} = 2,03 + 0,003 \times K^2 \quad (37.6)$$

38 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	37.1	37.2	37.3	37.4	37.5	37.6
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,733	—	0,549	0,445	—	0,438
$R^2_{\text{множ}}$	0,537	—	0,302	0,198	—	0,192
R^2_{adj}	0,440	—	0,270	0,162	—	0,155
$F_{\text{факт}}$	5,5	—	9,5	5,4	—	5,2
$F_{\text{теор}}$	2,9	—	4,3	4,3	—	4,3
p	0,004	—	0,005	0,029	—	0,032
$S_{\text{ух}}$	0,067	—	0,077	0,082	—	0,056
ε	2,4	—	2,6	3,0	—	2,3

Приложение И

**Результаты регрессионного анализа зависимости содержания P_2O_5 от
изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений**

И1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						7
	1	2	3	4	5	6	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,032	0,026	0,022	0,016	0,014	0,015	0,010
$X_2 (N)$	0,024	0,019	0,015	0,010	0,005	0,006	0,016
$X_3 (P^{0,5})$	0,925	—	—	—	—	—	—
$X_4 (P)$	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_5 (K^{0,5})$	0,825	0,826	0,834	—	—	—	—
$X_6 (K)$	0,795	0,797	0,727	0,749	0,321	—	—
$X_7 (NP^{0,5})$	0,153	0,140	0,130	0,112	0,104	0,128	—
$X_8 (NK^{0,5})$	0,866	0,854	0,833	0,845	—	—	—
$X_9 (PK^{0,5})$	0,869	0,857	—	—	—	—	—

И2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N)$	0,049	0,041	0,035	0,030	0,026	0,026	0,026
$X_2 (N^2)$	0,095	0,083	0,074	0,032	0,037	0,049	0,025
$X_3 (P)$	0,014	0,011	0,009	0,008	0,000	0,000	0,000
$X_4 (P^2)$	0,626	0,611	0,471	0,462	—	—	—
$X_5 (K)$	0,888	—	—	—	—	—	—
$X_6 (K^2)$	0,804	0,579	0,611	—	—	—	—
$X_7 (NP)$	0,322	0,306	0,291	0,280	0,395	—	—
$X_8 (NK)$	0,435	0,419	0,404	0,396	0,387	0,385	—
$X_9 (PK)$	0,786	0,778	—	—	—	—	—

И3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,750	0,767	—	—	—	—
$X_2 (N)$	0,393	0,378	0,304	0,244	0,211	0,017
$X_3 (P^{0,5})$	0,523	0,528	0,485	0,460	—	—
$X_4 (P)$	0,006	0,005	0,003	0,002	0,000	0,000
$X_5 (K^{0,5})$	0,107	0,031	0,026	0,021	0,019	0,019
$X_6 (K)$	0,815	—	—	—	—	—
$X_7 (NP^{0,5})$	0,287	0,253	0,249	0,256	0,285	—
$X_8 (NK^{0,5})$	0,023	0,011	0,008	0,004	0,003	0,004
$X_9 (PK^{0,5})$	0,633	0,540	0,520	—	—	—

**И4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,612	0,599	0,583	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,179	0,164	0,151	0,102	0,047	0,002
X ₃ (P)	0,008	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₄ (P ²)	0,913	0,872	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,052	0,044	0,037	0,035	0,006	0,006
X ₆ (K ²)	0,523	0,484	0,472	0,472	–	–
X ₇ (NP)	0,498	0,483	0,360	0,345	0,344	–
X ₈ (NK)	0,008	0,006	0,004	0,003	0,000	0,000
X ₉ (PK)	0,944	–	–	–	–	–

**И5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,039	0,029	0,024	0,018	0,012	0,016	0,010
X ₂ (N)	0,017	0,013	0,009	0,006	0,007	0,019	0,019
X ₃ (P ^{0,5})	0,814	0,790	0,780	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,482	0,226	0,156	0,146	0,146	–	–
X ₆ (K)	0,901	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,479	0,450	0,430	0,397	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,231	0,203	0,168	0,152	0,129	0,588	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,895	0,922	–	–	–	–	–

**И6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,052	0,045	0,040	0,036	0,031	0,032	0,028
X ₂ (N ²)	0,043	0,037	0,025	0,023	0,019	0,026	0,030
X ₃ (P)	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
X ₄ (P ²)	0,646	0,514	0,510	0,668	–	–	–
X ₅ (K)	0,428	0,412	0,377	0,368	0,359	–	–
X ₆ (K ²)	0,634	0,675	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,568	0,555	0,544	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,477	0,462	0,276	0,266	0,258	0,491	–
X ₉ (PK)	0,799	–	–	–	–	–	–

И7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$P_2O_5 \text{ (1 закладка)} = 196,71 - 101,688 \times N^{0,5} + 40,431 \times N + 58,776 \times P \quad (\text{И7.1})$$

$$P_2O_5 \text{ (1 закладка)} = 189,24 - 40,611 \times N + 7,857 \times N^2 + 57,174 \times P \quad (\text{И7.2})$$

$$P_2O_5 \text{ (2 закладка)} = 188,63 + 14,688 \times N + 36,389 \times P + 33,407 \times K^{0,5} - 29,375 \times NK^{0,5} \quad (\text{И7.3})$$

$$P_2O_5 \text{ (1 закладка)} = 192,14 + 3,496 \times N^2 + 35,484 \times P + 15,020 \times K - 7,148 \times NK \quad (\text{И7.4})$$

$$P_2O_5 \text{ (средняя)} = 208,79 - 56,849 \times N^{0,5} + 22,039 \times N + 46,980 \times P \quad (\text{И7.5})$$

$$P_2O_5 \text{ (средняя)} = 204,24 - 22,711 \times N + 4,281 \times N^2 + 46,084 \times P \quad (\text{И7.6})$$

И8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	И7.1	И7.2	И7.3	И7.4	И7.5	И7.6
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,944	0,939	0,947	0,959	0,971	0,968
$R^2_{\text{множ}}$	0,892	0,883	0,896	0,920	0,943	0,937
R^2_{adj}	0,875	0,865	0,874	0,903	0,934	0,928
$F_{\text{факт}}$	54,9	50,1	41,0	54,3	110,0	99,4
$F_{\text{теор}}$	3,1	3,1	2,9	2,9	3,1	3,1
p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$S_{\text{ух}}$	38,026	39,613	23,538	20,709	21,354	22,399
ϵ	9,6	10,0	6,1	5,3	5,7	5,8

И9 Расчётные значения подвижного фосфора, формула И7.5

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы фосфорных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	P_2O_5 , мг/кг					
0	209	256	303	350	397	444
30	174	221	268	315	362	409
60	172	219	266	313	360	407
90	176	223	270	317	364	411
120	183	230	277	324	371	418
150	192	239	286	333	380	427

Приложение К

**Результаты регрессионного анализа зависимости содержания K_2O от
изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений**

К1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,064	0,054	0,045	0,035	0,029	0,024	0,017
$X_2 (N)$	0,023	0,018	0,014	0,011	0,008	0,013	0,014
$X_3 (P^{0,5})$	0,966	0,964	—	—	—	—	—
$X_4 (P)$	0,640	0,604	0,313	0,290	0,275	—	—
$X_5 (K^{0,5})$	0,052	0,043	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_6 (K)$	0,834	0,814	0,811	—	—	—	—
$X_7 (NP^{0,5})$	0,277	0,259	0,242	0,215	0,192	0,461	—
$X_8 (NK^{0,5})$	0,709	0,698	0,690	0,733	—	—	—
$X_9 (PK^{0,5})$	0,992	—	—	—	—	—	—

К2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N)$	0,142	0,127	0,116	0,110	0,111	0,100	0,127	—	—
$X_2 (N^2)$	0,106	0,093	0,039	0,035	0,050	0,054	0,071	0,218	—
$X_3 (P)$	0,897	—	—	—	—	—	—	—	—
$X_4 (P^2)$	0,434	0,284	0,271	0,367	—	—	—	—	—
$X_5 (K)$	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000
$X_6 (K^2)$	0,281	0,265	0,282	0,111	0,109	0,102	—	—	—
$X_7 (NP)$	0,331	0,314	0,300	0,292	0,573	—	—	—	—
$X_8 (NK)$	0,695	0,685	—	—	—	—	—	—	—
$X_9 (PK)$	0,527	0,512	0,501	—	—	—	—	—	—

К3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001
$X_2 (N)$	0,009	0,004	0,004	0,002	0,002	0,001	0,002
$X_3 (P^{0,5})$	0,647	0,630	0,651	—	—	—	—
$X_4 (P)$	0,518	0,493	0,516	0,629	—	—	—
$X_5 (K^{0,5})$	0,709	0,702	—	—	—	—	—
$X_6 (K)$	0,041	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$X_7 (NP^{0,5})$	0,485	0,463	0,470	0,427	0,516	—	—
$X_8 (NK^{0,5})$	0,945	—	—	—	—	—	—
$X_9 (PK^{0,5})$	0,439	0,425	0,389	0,401	0,155	0,129	—

**К4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
X ₂ (N ²)	0,016	0,012	0,007	0,005	0,001	0,001	0,002
X ₃ (P)	0,938	–	–	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,868	0,866	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,007	0,005	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000
X ₆ (K ²)	0,256	0,238	0,222	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,347	0,330	0,142	0,235	0,188	–	–
X ₈ (NK)	0,250	0,234	0,219	0,449	–	–	–
X ₉ (PK)	0,111	0,098	0,037	0,072	0,048	0,119	–

**К5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,004	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
X ₂ (N)	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003
X ₃ (P ^{0,5})	0,817	–	–	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,502	0,439	0,403	0,162	0,509	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,123	0,114	0,109	0,089	0,122	0,103	–
X ₆ (K)	0,159	0,132	0,127	0,062	0,054	0,052	0,000
X ₇ (NP ^{0,5})	0,265	0,239	0,209	0,213	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,751	0,726	–	–	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,641	0,643	0,659	–	–	–	–

**К6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,009	0,007	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
X ₂ (N ²)	0,021	0,017	0,014	0,003	0,003	0,004	0,003
X ₃ (P)	0,961	–	–	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,669	0,538	0,212	0,209	0,211	0,672	–
X ₅ (K)	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
X ₆ (K ²)	0,196	0,181	0,193	0,316	–	–	–
X ₇ (NP)	0,264	0,247	0,235	0,232	0,232	–	–
X ₈ (NK)	0,389	0,372	0,360	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,647	0,635	–	–	–	–	–

И7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$K_2O_{(1 \text{ закладка})} = 147,78 - 61,822 \times N^{0,5} + 27,274 \times N + 58,445 \times K^{0,5} \quad (K7.1)$$

$$K_2O_{(1 \text{ закладка})} = 151,64 + 23,843 \times K \quad (K7.2)$$

$$K_2O_{(2 \text{ закладка})} = 158,66 - 84,496 \times N^{0,5} + 31,865 \times N + 34,721 \times K \quad (K7.3)$$

$$K_2O_{(2 \text{ закладка})} = 153,92 - 37,676 \times N + 6,969 \times N^2 + 33,390 \times K \quad (K7.4)$$

$$K_2O_{(\text{среднее})} = 158,66 - 84,496 \times N^{0,5} + 31,865 \times N + 34,721 \times K \quad (K7.5)$$

$$K_2O_{(\text{среднее})} = 157,51 - 28,370 \times N + 5,674 \times N^2 + 28,278 \times K \quad (K7.6)$$

К8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	K7.1	K7.2	K7.3	K7.4	K7.5	K7.6
$r_{\text{множ}}$	0,888	0,822	0,944	0,939	0,939	0,936
$R^2_{\text{множ}}$	0,788	0,675	0,890	0,882	0,882	0,875
R^2_{adj}	0,756	0,660	0,874	0,864	0,864	0,857
$F_{\text{факт}}$	24,8	45,7	54,2	49,7	49,7	46,8
$F_{\text{теор}}$	3,1	4,3	3,1	3,1	3,1	3,1
p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$S_{\text{ух}}$	24,988	29,516	22,685	23,566	20,266	20,815
ε	9,1	11,3	7,7	8,2	9,0	8,2

К9 Расчётные значения подвижного калия, формула К7.5

Дозы азотных удобрений, кг/га д.в.	Дозы калийных удобрений, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
	K_2O , мг/кг					
0	159	193	228	263	298	332
30	106	141	175	210	245	280
60	103	138	172	207	242	276
90	108	143	177	212	247	282
120	117	152	187	221	256	291
150	129	164	198	233	268	303

Приложение Л

Результаты регрессионного анализа зависимости урожайности озимой ржи сорта Фалёнская 4 от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Л1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,035	0,028	0,023	0,017	0,013	0,009	0,015	0,036
X ₂ (N)	0,217	0,178	0,166	0,140	0,112	0,086	0,024	0,016
X ₃ (P ^{0,5})	0,893	0,892	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,450	0,433	0,296	0,104	0,102	0,107	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,501	0,481	0,474	0,433	0,396	—	—	—
X ₆ (K)	0,549	0,519	0,513	0,578	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,037	0,030	0,024	0,022	0,021	0,025	0,073	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,969	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,705	0,690	0,689	—	—	—	—	—

Л2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 1 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,419	0,396	0,382	—	—	—	—	—
X ₂ (N ²)	0,394	0,382	0,369	0,025	0,025	0,043	0,036	
X ₃ (P)	0,383	0,373	0,359	0,378	—	—	—	—
X ₄ (P ²)	0,046	0,039	0,029	0,029	0,008	0,008	0,006	
X ₅ (K)	0,784	—	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,588	0,249	0,208	0,199	0,202	0,604	—	—
X ₇ (NP)	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	
X ₈ (NK)	0,276	0,260	0,246	0,242	0,239	—	—	—
X ₉ (PK)	0,727	0,718	—	—	—	—	—	—

Л3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002	0,000	
X ₂ (N)	0,343	0,325	0,290	0,197	0,161	0,053	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,029	0,022	0,018	0,016	0,012	0,008	0,021	
X ₄ (P)	0,048	0,041	0,032	0,015	0,011	0,020	0,044	
X ₅ (K ^{0,5})	0,949	0,941	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,983	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,351	0,331	0,314	0,315	0,238	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,455	0,406	0,331	0,327	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,745	0,725	0,630	—	—	—	—	—

Л4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, 2 закладка

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,016	0,011	0,009	0,005	0,003	0,001	0,002	0,002
X ₃ (P)	0,153	0,138	0,123	0,113	0,107	0,098	0,578	–
X ₄ (P ²)	0,476	0,458	0,386	0,297	0,120	0,117	–	–
X ₅ (K)	0,813	0,743	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,971	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,543	0,529	0,517	0,504	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,742	0,719	0,504	0,447	0,440	–	–	–
X ₉ (PK)	0,742	0,692	0,790	–	–	–	–	–

Л5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа				
	1	2	3	4	5
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₂ (N)	0,072	0,064	0,044	0,019	0,014
X ₃ (P ^{0,5})	0,031	0,029	0,025	0,024	0,018
X ₄ (P)	0,019	0,016	0,014	0,005	0,003
X ₅ (K ^{0,5})	0,573	0,732	–	–	–
X ₆ (K)	0,644	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,016	0,014	0,011	0,011	0,007
X ₈ (NK ^{0,5})	0,501	0,365	0,375	0,660	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,560	0,642	0,427	–	–

Л6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, в среднем

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
X ₂ (N ²)	0,128	0,115	0,103	0,041	0,024	0,002	0,003	0,003
X ₃ (P)	0,111	0,099	0,087	0,085	0,075	0,085	0,441	–
X ₄ (P ²)	0,089	0,050	0,043	0,039	0,036	0,115	–	–
X ₅ (K)	0,956	0,954	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,716	0,658	0,458	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,175	0,160	0,146	0,141	0,134	–	–	–
X ₈ (NK)	0,378	0,361	0,345	0,521	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,961	–	–	–	–	–	–	–

Л7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$Y_{(2019)} = 2,57 + 0,421 \times N^{0,5} - 0,213 \times N \quad (\text{Л7.1})$$

$$Y_{(2019)} = 2,59 + 0,020 \times N^2 + 0,027 \times P^2 - 0,057 \times NP \quad (\text{Л7.2})$$

$$Y_{(2021)} = 2,02 + 0,331 \times N^{0,5} - 0,570 \times P^{0,5} + 0,209 \times P \quad (\text{Л7.3})$$

$$Y_{(2021)} = 1,72 + 0,450 \times N - 0,069 \times N^2 \quad (\text{Л7.4})$$

$$Y_{19-21} = 2,15 + 0,644 \times N^{0,5} - 0,142 \times N - 0,295 \times P^{0,5} + 0,176 \times P - 0,145 \times NP^{0,5} \quad (\text{Л7.5})$$

$$Y_{19-21} = 2,18 + 0,257 \times N - 0,045 \times N^2 \quad (\text{Л7.6})$$

Л8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение					
	Л7.1	Л7.2	Л7.3	Л7.4	Л7.5	Л7.6
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,514	0,686	0,752	0,753	0,854	0,638
$R^2_{\text{множ}}$	0,265	0,471	0,566	0,567	0,730	0,407
R^2_{adj}	0,195	0,391	0,501	0,526	0,655	0,351
$F_{\text{факт}}$	3,8	5,9	8,7	13,8	9,7	7,2
$F_{\text{теор}}$	3,5	3,1	3,1	3,5	2,8	3,5
p	0,040	0,005	0,001	0,000	0,000	0,004
$S_{\text{ух}}$	0,201	0,175	0,239	0,233	0,118	0,162
ϵ	6,0	5,0	7,6	6,7	3,4	4,6

Л9 Расчётные значения урожайности, формула Л7.2

Показатель		Дозы Р, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Урожайность, т/га					
Дозы N, кг/га д.в.	0	2,59	2,62	2,70	2,83	3,02	3,27
	30	2,61	2,58	2,60	2,68	2,81	3,00
	60	2,67	2,58	2,55	2,57	2,65	2,78
	90	2,77	2,63	2,54	2,50	2,52	2,59
	120	2,91	2,71	2,56	2,47	2,43	2,45
	150	3,09	2,83	2,63	2,48	2,38	2,34

Продолжение приложения Л

Л10 Расчётные значения урожайности, формула Л7.4

Показатель	Дозы N, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
Урожайность, т/га	1,72	2,10	2,34	2,45	2,42	2,25

Л11 Расчётные значения урожайности, формула Л7.5

Показатель		Дозы P, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Урожайность, т/га					
Дозы N, кг/га д.в.	0	2,15	2,03	2,08	2,17	2,26	2,37
	30	2,65	2,39	2,38	2,42	2,48	2,55
	60	2,78	2,45	2,42	2,44	2,48	2,54
	90	2,84	2,47	2,42	2,42	2,45	2,50
	120	2,87	2,46	2,39	2,38	2,40	2,44
	150	2,88	2,44	2,36	2,34	2,35	2,38

Л12 Изменение урожайности озимой ржи за счёт действия азотных, фосфорных удобрений и их сочетаний

Доза	Урожайность, т/га	Изменение урожайности относительно контроля			
		Общее	за счёт взаимодействия NP	за счёт N	за счёт P
N ₀ P ₀	2,15	—	—	—	—
N ₃₀ P ₀	2,65	0,50	—	0,50	—
N ₆₀ P ₀	2,78	0,63	—	0,63	—
N ₉₀ P ₀	2,84	0,69	—	0,69	—
N ₁₂₀ P ₀	2,87	0,72	—	0,72	—
N ₁₅₀ P ₀	2,88	0,73	—	0,73	—
N ₀ P ₃₀	2,03	-0,12	—	—	-0,12
N ₃₀ P ₃₀	2,39	0,24	-0,38	0,50	-0,12
N ₆₀ P ₃₀	2,45	0,30	-0,45	0,63	-0,12
N ₉₀ P ₃₀	2,47	0,32	-0,49	0,69	-0,12
N ₁₂₀ P ₃₀	2,46	0,31	-0,53	0,72	-0,12
N ₁₅₀ P ₃₀	2,44	0,29	-0,56	0,73	-0,12
N ₀ P ₆₀	2,08	-0,07	—	—	-0,07
N ₃₀ P ₆₀	2,38	0,23	-0,34	0,50	-0,07
N ₆₀ P ₆₀	2,42	0,27	-0,43	0,63	-0,07
N ₉₀ P ₆₀	2,42	0,27	-0,49	0,69	-0,07
N ₁₂₀ P ₆₀	2,39	0,24	-0,55	0,72	-0,07
N ₁₅₀ P ₆₀	2,36	0,21	-0,59	0,73	-0,07
N ₀ P ₉₀	2,17	0,02	—	—	0,02
N ₃₀ P ₉₀	2,42	0,27	-0,25	0,50	0,02
N ₆₀ P ₉₀	2,44	0,29	-0,36	0,63	0,02
N ₉₀ P ₉₀	2,42	0,27	-0,44	0,69	0,02
N ₁₂₀ P ₉₀	2,38	0,23	-0,51	0,72	0,02
N ₁₅₀ P ₉₀	2,34	0,19	-0,56	0,73	0,02
N ₀ P ₁₂₀	2,26	0,11	—	—	0,11
N ₃₀ P ₁₂₀	2,48	0,33	-0,28	0,50	0,11
N ₆₀ P ₁₂₀	2,48	0,33	-0,41	0,63	0,11
N ₉₀ P ₁₂₀	2,45	0,30	-0,50	0,69	0,11
N ₁₂₀ P ₁₂₀	2,4	0,25	-0,58	0,72	0,11
N ₁₅₀ P ₁₂₀	2,35	0,20	-0,64	0,73	0,11
N ₀ P ₁₅₀	2,37	0,22	—	—	0,22
N ₃₀ P ₁₅₀	2,55	0,40	-0,32	0,50	0,22
N ₆₀ P ₁₅₀	2,54	0,39	-0,46	0,63	0,22
N ₉₀ P ₁₅₀	2,5	0,35	-0,56	0,69	0,22
N ₁₂₀ P ₁₅₀	2,44	0,29	-0,65	0,72	0,22
N ₁₅₀ P ₁₅₀	2,38	0,23	-0,72	0,73	0,22

Приложение М

Результаты регрессионного анализа зависимости урожайности зелёной массы озимой ржи от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

М1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,009	0,007	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,183	0,029	0,014	0,012	0,010	0,003	0,002	0,008
X ₂ (N)	0,833	—	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,461	0,460	0,453	0,396	0,295	0,254	—	—
X ₄ (P)	0,553	0,541	0,424	0,575	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,248	0,239	0,228	0,191	0,158	0,120	0,106	—
X ₆ (K)	0,413	0,399	0,403	0,528	0,478	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,728	0,761	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,079	0,063	0,042	0,043	0,040	0,012	0,015	0,043
X ₉ (PK ^{0,5})	0,463	0,461	0,457	—	—	—	—	—

М2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,153	0,141	0,011	0,010	0,004	0,006	0,012	0,010
X ₂ (N ²)	0,746	0,775	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,198	0,186	0,175	0,167	0,139	0,089	0,333	—
X ₄ (P ²)	0,473	0,421	0,379	0,453	—	—	—	—
X ₅ (K)	0,880	0,553	0,576	0,279	0,291	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,762	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,468	0,453	0,472	0,449	0,219	0,157	—	—
X ₈ (NK)	0,062	0,047	0,034	0,034	0,035	0,026	0,019	0,025
X ₉ (PK)	0,746	0,602	0,606	—	—	—	—	—

М3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,058	0,007	0,005	0,002	0,002	0,005	0,007	0,014	0,014
X ₂ (N)	0,943	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,089	0,076	0,063	0,070	0,074	0,061	0,058	0,585	—
X ₄ (P)	0,041	0,034	0,024	0,027	0,025	0,018	0,068	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,335	0,307	0,297	0,452	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,534	0,519	0,439	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,234	0,182	0,164	0,184	0,150	0,085	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,434	0,374	0,352	0,169	0,174	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,858	0,860	—	—	—	—	—	—	—

**М4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, колошение**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,017	0,014	0,011	0,009	0,009	0,007	0,006	0,008
X ₂ (N ²)	0,207	0,126	0,115	0,035	0,034	0,031	0,027	0,030
X ₃ (P)	0,539	0,525	0,513	0,505	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,409	0,395	0,425	0,415	0,533	–	–	–
X ₅ (K)	0,469	0,453	0,440	0,431	0,441	0,418	–	–
X ₆ (K ²)	0,642	0,630	0,467	0,241	0,242	0,236	0,146	–
X ₇ (NP)	0,844	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,573	0,559	0,548	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,726	0,717	–	–	–	–	–	–

**М5 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного
анализа**

$$Y_{\text{з.м. (выход в трубку)}} = 93,98 + 28,554 \times N^{0,5} - 9,930 \times NK^{0,5} \quad (\text{M5.1})$$

$$Y_{\text{з.м. (выход в трубку)}} = 99,96 + 11,604 \times N - 2,321 \times NK \quad (\text{M5.2})$$

$$Y_{\text{з.м. (колошение)}} = 296,00 + 43,893 \times N^{0,5} \quad (\text{M5.3})$$

$$Y_{\text{з.м. (колошение)}} = 279,98 + 70,259 \times N - 10,725 \times N^2 \quad (\text{M5.4})$$

М6 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение			
	M5.1	M5.2	M5.3	M5.4
r _{множ}	0,539	0,533	0,495	0,595
R ² _{множ}	0,290	0,285	0,245	0,354
R ² _{adj}	0,222	0,216	0,211	0,292
F _{факт}	4,3	4,2	7,154	5,7
F _{теор}	3,5	3,5	4,3	3,5
p	0,027	0,030	0,014	0,010
S _{ух}	23,647	23,737	59,528	56,383
ε	18,1	18,1	13,1	12,5

М7 Расчётные значения урожайности зелёной массы, формула М5.1

Показатель		Дозы К, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Урожайность, т/га					
Дозы N, кг/га д.в.	0	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0	94,0
	30	122,5	112,6	108,5	105,3	102,7	100,3
	60	134,4	120,3	114,5	110,0	106,3	103,0
	90	143,4	126,2	119,1	113,6	109,0	105,0
	120	151,1	131,2	123,0	116,7	111,4	106,7
	150	157,8	135,6	126,4	119,4	113,4	108,2

М8 Расчётные значения урожайности зелёной массы, формула М5.4

Показатель	Дозы N, кг/га д.в.					
	0	30	60	90	120	150
Урожайность зелёной массы, т/га	280,0	339,5	377,6	394,2	389,4	363,2

Приложение Н

**Результаты регрессионного анализа зависимости технологических свойств
зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4 от изучаемых в опыте видов и
соотношений минеральных удобрений**

Н1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, масса 1000 зёрен, 2019 г.

Член регрессии	Этап регрессионного анализа		
	1	2	3
Свободный член	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,040	0,037	0,005
$X_2 (N)$	0,199	0,244	–
$X_3 (PK^{0,5})$	0,210	0,022	0,032
$X_4 (PK)$	0,518	–	–

Н2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, масса 1000 зёрен, 2019 г.

Член регрессии	Этап регрессионного анализа		
	1	2	3
Свободный член	0,000	0,000	0,000
$X_1 (N)$	0,006	0,007	0,018
$X_2 (N^2)$	0,021	0,025	0,043
$X_3 (PK)$	0,126	0,072	–
$X_4 (PK^2)$	0,291	–	–

Н3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, натура, 2019 г.

Член регрессии	Этап регрессионного анализа	
	1	2
Свободный член	0,000	0,000
$X_1 (N^{0,5})$	0,288	0,006
$X_2 (N)$	0,942	–
$X_3 (PK^{0,5})$	0,027	0,014
$X_4 (PK)$	0,074	0,049

Н4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, натура, 2019 г.

Член регрессии	Этап регрессионного анализа	
	1	2
Свободный член	0,000	0,000
$X_1 (N)$	0,105	0,013
$X_2 (N^2)$	0,382	–
$X_3 (PK)$	0,016	0,016
$X_4 (PK^2)$	0,035	0,038

Н5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, масса 1000 зёрен

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,399	0,381	0,366	0,379	0,330	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,458	0,411	0,340	0,347	0,308	0,758	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,668	0,656	0,648	0,677	—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,104	0,074	0,064	0,062	0,008	0,007	0,006	0,002	0,001
X ₅ (K ^{0,5})	0,701	0,689	0,673	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,697	0,686	0,641	0,151	0,134	0,115	0,109	0,521	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,991	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,956	0,953	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,249	0,230	0,214	0,216	0,185	0,140	0,138	—	—

Н2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, масса 1000 зёрен

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,404	0,314	0,252	0,268	0,412	0,415	0,442	—	—
X ₂ (N ²)	0,798	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,620	0,613	0,227	0,273	0,323	0,308	0,268	0,055	0,001
X ₄ (P ²)	0,715	0,735	—	—	—	—	—	—	—
X ₅ (K)	0,437	0,425	0,415	0,402	0,402	0,548	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,640	0,592	0,544	0,335	0,484	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,613	0,480	0,344	0,392	0,290	0,293	0,285	0,430	—
X ₈ (NK)	0,590	0,457	0,459	0,435	—	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,519	0,505	0,551	—	—	—	—	—	—

Н3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, натура

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,048	0,004	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₂ (N)	0,959	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,541	0,517	0,504	0,549	0,540	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,165	0,150	0,110	0,115	0,113	0,044	0,079	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,588	0,575	0,556	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,511	0,496	0,465	0,652	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,251	0,213	0,198	0,196	0,205	0,186	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,581	0,556	0,544	0,552	0,068	0,055	0,028	0,068	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,956	0,959	—	—	—	—	—	—	—

**Н4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, натура**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,267	0,249	0,211	0,190	0,095	0,062	—	—
X ₃ (P)	0,696	0,684	0,670	0,373	0,361	0,045	0,051	—
X ₄ (P ²)	0,881	0,865	0,879	—	—	—	—	—
X ₅ (K)	0,902	0,911	—	—	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,945	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,741	0,732	0,724	0,742	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,208	0,141	0,083	0,060	0,056	0,014	0,006	0,016
X ₉ (PK)	0,816	0,816	0,714	0,646	0,678	—	—	—

**Н5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, число падения**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,386	0,368	0,322	0,299	0,301	0,337	—	—	—
X ₂ (N)	0,214	0,198	0,200	0,172	0,125	0,193	0,000	0,000	0,000
X ₃ (P ^{0,5})	0,700	0,692	—	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,686	0,675	0,849	—	—	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,610	0,467	0,453	0,452	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,959	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,498	0,474	0,486	0,271	0,356	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,484	0,451	0,447	0,446	0,107	0,164	0,180	0,437	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,263	0,211	0,194	0,128	0,172	0,299	0,256	—	—

**Н6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, число падения**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,045	0,038	0,032	0,027	0,025	0,025	0,000	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,695	0,687	0,678	0,475	0,475	0,469	—	—	—
X ₃ (P)	0,200	0,184	0,170	0,159	0,155	0,158	0,145	0,709	—
X ₄ (P ²)	0,301	0,281	0,261	0,142	0,178	0,172	0,159	—	—
X ₅ (K)	0,652	0,442	0,372	0,359	0,500	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,956	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,707	0,696	0,687	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,920	0,930	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,588	0,551	0,512	0,501	—	—	—	—	—

Н7 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$M_{1000} = 25,48 - 2,169 \times N^{0,5} + 1,854 \times PK^{0,5} \quad (H7.1)$$

$$M_{1000} = 26,49 - 2,401 \times N + 0,376 \times N^2 \quad (H7.2)$$

$$\text{Натура} = 647,51 - 29,207 \times N^{0,5} + 113,408 \times PK^{0,5} - 60,992 \times PK \quad (H7.3)$$

$$\text{Натура} = 639,39 - 11,449 \times N + 74,055 \times PK - 28,706 \times PK^2 \quad (H7.4)$$

$$M_{1000} = 23,08 + 0,506 \times P \quad (H7.5)$$

$$M_{1000} = 23,08 + 0,506 \times P \quad (H7.6)$$

$$\text{Натура} = 707,71 - 13,866 \times N^{0,5} \quad (H7.7)$$

$$\text{Натура} = 702,92 - 8,970 \times N + 1,134 \times NK \quad (H7.8)$$

$$\text{ЧП} = 198,57 - 15,928 \times N \quad (H7.9)$$

$$\text{ЧП} = 198,57 - 15,928 \times N \quad (H7.10)$$

Н8 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение									
	H7.1	H7.2	H7.3	H7.4	H7.5	H7.6	H7.7	H7.8	H7.9	H7.10
$r_{\text{множ}}$	0,781	0,734	0,853	0,823	0,629	0,629	0,690	0,739	0,629	0,629
$R^2_{\text{множ}}$	0,610	0,539	0,728	0,677	0,396	0,396	0,476	0,545	0,396	0,396
R^2_{adj}	0,524	0,436	0,626	0,556	0,369	0,369	0,453	0,502	0,369	0,369
$F_{\text{факт}}$	7,043	5,253	7,138	5,588	14,4	14,430	20,0	12,6	14,4	14,4
$F_{\text{теор}}$	4,3	4,3	4,1	4,1	4,3	4,3	4,3	3,5	4,3	4,3
p	0,014	0,031	0,012	0,023	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
$S_{\text{ух}}$	1,269	1,381	17,289	18,843	1,114	1,114	11,240	10,720	1,114	1,114
ε	4,1	4,2	1,7	2,0	3,7	3,7	1,3	1,2	12,0	12,0

Н9 Расчётные значения массы 1000 зёрен, формула Н7.5-7.6

Показатель	Дозы Р, кг/га					
	0	30	60	90	120	150
$M_{1000}, \text{ г}$	23,1	23,6	24,1	24,6	25,1	25,6

Н10 Расчётные значения натуре, формула Н7.8

Показатель		Дозы К, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Натура, г/л					
Дозы N, кг/га д.в.	0	703	703	703	703	703	703
	30	694	695	696	697	699	700
	60	685	687	690	692	694	696
	90	676	680	683	686	690	693
	120	667	672	676	681	685	690
	150	658	664	670	675	681	687

Н11 Расчётные значения числа падения, формула Н7.9-7.10

Показатель	Дозы N, кг/га					
	0	30	60	90	120	150
ЧП, сек.	199	183	167	151	135	119

Приложение О

Результаты регрессионного анализа зависимости биохимических показателей зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4 от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

О1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, сырой белок

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,247	0,259	0,208	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,201	0,191	0,179	0,545	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,149	0,116	0,005	0,006	0,005	0,001	0,002	0,002
X ₄ (P)	0,570	0,563	—	—	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,081	0,036	0,037	0,042	0,046	0,138	—	—
X ₆ (K)	0,625	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,034	0,032	0,032	0,030	0,017	0,000	0,000	0,000
X ₈ (NK ^{0,5})	0,311	0,201	0,163	0,149	0,157	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,188	0,110	0,123	0,136	0,088	0,078	0,329	—

О2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, сырой белок

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,053	0,045	0,039	0,039	0,042	0,001	0,001	0,001	0,000
X ₂ (N ²)	0,170	0,146	0,136	0,135	0,326	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,500	0,483	0,468	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P ²)	0,467	0,435	0,404	0,035	0,087	0,087	0,303	—	—
X ₅ (K)	0,357	0,185	0,159	0,144	0,152	0,155	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,927	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,225	0,208	0,195	0,188	—	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,798	0,734	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,126	0,074	0,050	0,046	0,050	0,051	0,144	0,287	—

О3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, крахмал

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,085	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₂ (N)	0,588	0,272	0,077	0,077	0,065	0,057	0,055	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,664	0,553	0,508	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P)	0,141	0,250	0,264	0,024	0,017	0,009	0,027	0,225	0,327
X ₅ (K ^{0,5})	0,321	0,455	0,472	0,517	—	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,362	0,547	0,401	0,446	0,677	—	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,061	0,100	0,100	0,106	0,083	0,072	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,694	0,608	—	—	—	—	—	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,182	0,264	0,273	0,293	0,247	0,105	0,040	0,441	—

**О4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, крахмал**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,357	0,340	0,039	0,056	0,036	0,039	0,060	–	–
X ₂ (N ²)	0,790	0,804	–	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,354	0,337	0,326	0,013	0,015	0,016	0,026	0,172	0,327
X ₄ (P ²)	0,362	0,345	0,345	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,173	0,158	0,143	0,136	0,139	0,133	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,173	0,132	0,119	0,155	0,270	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,063	0,055	0,034	0,051	0,029	0,031	0,036	0,329	–
X ₈ (NK)	0,909	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,220	0,204	0,190	0,310	–	–	–	–	–

**О5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, зола**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,912	0,904	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,399	0,373	0,222	0,323	0,782	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,961	–	–	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,264	0,242	0,217	0,181	0,143	0,137	–
X ₆ (K)	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₇ (NP ^{0,5})	0,426	0,405	0,381	0,325	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,494	0,474	0,450	–	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000

**О6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, зола**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,952	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,627	0,489	0,459	0,450	–	–	–
X ₃ (P)	0,397	0,381	0,366	0,360	0,346	0,364	–
X ₄ (P ²)	0,032	0,026	0,022	0,018	0,020	0,027	0,000
X ₅ (K)	0,775	0,765	0,758	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,021	0,017	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₇ (NP)	0,316	0,299	0,284	0,270	0,336	–	–
X ₈ (NK)	0,821	0,814	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000

**О7 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, лизин**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,446	0,434	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,085	0,075	0,062	0,075	0,215	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,256	0,227	0,259	–	–	–
X ₄ (P)	0,021	0,016	0,011	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,039	0,004	0,003	0,003	0,007	0,008
X ₆ (K)	0,915	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₈ (NK ^{0,5})	0,232	0,176	0,162	0,179	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,018	0,009	0,007	0,008	0,003	0,003

**О8 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, лизин**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,165	0,150	0,141	0,138	0,577	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,166	0,151	0,163	0,158	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,617	0,606	0,593	–	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,129	0,115	0,097	0,003	0,006	0,001	0,002	0,008
X ₅ (K)	0,326	0,106	0,097	0,086	0,097	0,096	–	–
X ₆ (K ²)	0,921	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,050	0,042	0,037	0,033	0,092	0,000	0,001	0,001
X ₈ (NK)	0,628	0,611	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,065	0,040	0,024	0,020	0,024	0,022	0,084	–

**О9 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, метионин**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,597	0,594	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,093	0,082	0,039	0,053	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,195	0,168	0,176	–	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,056	0,048	0,034	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,055	0,008	0,006	0,007	0,034	0,057	–	–
X ₆ (K)	0,891	–	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,004	0,003	0,002	0,003	0,020	0,000	0,000	0,000
X ₈ (NK ^{0,5})	0,069	0,042	0,036	0,044	0,304	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,055	0,032	0,027	0,034	0,023	0,013	0,094	–

**О10 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, метионин**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,183	0,167	0,170	0,169	0,508	–	–
X ₂ (N ²)	0,159	0,159	0,157	0,221	–	–	–
X ₃ (P)	0,465	0,458	–	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,175	0,177	0,006	0,004	0,007	0,001	0,001
X ₅ (K)	0,511	0,144	0,130	0,186	0,197	0,202	–
X ₆ (K ²)	0,686	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,099	0,089	0,084	0,080	0,179	0,001	0,002
X ₈ (NK)	0,392	0,434	0,421	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,064	0,054	0,049	0,027	0,030	0,028	0,030

**О11 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, триптофан**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,478	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,088	0,068	0,071	0,096	0,198	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,245	0,265	0,220	–	–	–
X ₄ (P)	0,022	0,015	0,015	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,460	0,499	–	–	–	–
X ₆ (K)	0,182	0,140	0,007	0,009	0,012	0,012
X ₇ (NP ^{0,5})	0,008	0,006	0,006	0,008	0,005	0,001
X ₈ (NK ^{0,5})	0,234	0,202	0,214	0,271	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001

**О12 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, триптофан**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,152	0,137	0,125	0,121	0,566	–
X ₂ (N ²)	0,178	0,163	0,145	0,139	–	–
X ₃ (P)	0,639	0,627	0,616	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,097	0,086	0,076	0,003	0,006	0,001
X ₅ (K)	1,000	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,282	0,098	0,047	0,041	0,047	0,044
X ₇ (NP)	0,147	0,133	0,121	0,113	0,324	0,010
X ₈ (NK)	0,780	0,773	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,012	0,009	0,007	0,006	0,007	0,006

**О13 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, СКА**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа				
	1	2	3	4	5
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,456	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,067	0,044	0,056	0,212	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,203	0,219	–	–	–
X ₄ (P)	0,019	0,009	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,055	0,003	0,003	0,010	0,011
X ₆ (K)	0,860	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000
X ₈ (NK ^{0,5})	0,142	0,110	0,126	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,011	0,005	0,006	0,003	0,003

**О14 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, СКА**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,151	0,136	0,127	0,126	0,541	–	–
X ₂ (N ²)	0,150	0,148	0,155	0,151	–	–	–
X ₃ (P)	0,564	0,558	0,544	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,118	0,116	0,098	0,002	0,005	0,001	0,001
X ₅ (K)	0,450	0,116	0,103	0,091	0,104	0,105	–
X ₆ (K ²)	0,709	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,063	0,055	0,049	0,044	0,128	0,001	0,001
X ₈ (NK)	0,571	0,642	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,040	0,030	0,018	0,015	0,018	0,017	0,046

О15 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$\text{Сырой белок} = 11,62 - 0,360 \times P^{0,5} + 0,265 \times NP^{0,5} \quad (\text{O15.1})$$

$$\text{Сырой белок} = 11,32 + 0,143 \times N \quad (\text{O15.2})$$

$$\text{Крахмал} = \text{const} \quad (\text{O15.3})$$

$$\text{Крахмал} = \text{const} \quad (\text{O15.4})$$

$$\text{Зола} = 0,94 + 0,048 \times P + 0,040 \times K - 0,057 \times PK^{0,5} \quad (\text{O15.5})$$

$$\text{Зола} = 0,97 + 0,009 \times P^2 + 0,008 \times K^2 - 0,013 \times PK \quad (\text{O15.6})$$

$$\text{Лизин} = 4,90 - 0,122 \times P - 0,130 \times K^{0,5} + 0,102 \times NP^{0,5} + 0,100 \times PK^{0,5} \quad (\text{O15.7})$$

$$\text{Лизин} = 4,81 - 0,012 \times P^2 + 0,020 \times NP \quad (\text{O15.8})$$

$$\text{Метионин} = 2,23 - 0,035 \times P + 0,046 \times NP^{0,5} \quad (\text{O15.9})$$

$$\text{Метионин} = 2,23 - 0,008 \times P^2 + 0,007 \times NP + 0,005 \times PK \quad (\text{O15.10})$$

$$\text{Триптофан} = 1,45 - 0,040 \times P - 0,019 \times K + 0,022 \times NP^{0,5} + 0,042 \times PK^{0,5} \quad (\text{O15.11})$$

$$\text{Триптофан} = 1,44 - 0,007 \times P^2 - 0,004 \times K^2 + 0,004 \times NP + 0,009 \times PK \quad (\text{O15.12})$$

$$\text{СКА} = 8,63 - 0,216 \times P - 0,214 \times K^{0,5} + 0,167 \times NP^{0,5} + 0,179 \times PK^{0,5} \quad (\text{O15.13})$$

$$\text{СКА} = 8,46 - 0,029 \times P^2 + 0,030 \times NP + 0,017 \times PK \quad (\text{O15.14})$$

О16 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение													
	O15.1	O15.2	O15.3	O15.4	O15.5	O15.6	O15.7	O15.8	O15.9	O15.10	O15.11	O15.12	O15.13	O15.14
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,779	0,678	—	—	0,839	0,840	0,873	0,664	0,755	0,719	0,831	0,724	0,869	0,718
$R^2_{\text{множ}}$	0,608	0,460	—	—	0,705	0,706	0,762	0,441	0,570	0,517	0,690	0,524	0,755	0,516
R^2_{adj}	0,570	0,435	—	—	0,660	0,662	0,712	0,387	0,529	0,444	0,625	0,424	0,704	0,443
$F_{\text{факт}}$	16,3	18,7	—	—	15,9	16,0	15,2	8,3	13,9	7,1	10,6	5,2	14,6	7,1
$F_{\text{теор}}$	3,5	4,3	—	—	3,1	3,1	2,9	3,5	3,5	3,1	2,9	2,9	2,9	3,1
p	0,000	0,000	—	—	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,005	0,000	0,002
$S_{\text{ух}}$	0,241	0,277	—	—	0,032	0,032	0,079	0,115	0,045	0,049	0,027	0,034	0,137	0,188
ε	1,4	1,6	—	—	2,4	2,4	1,0	1,8	1,4	1,3	1,4	1,6	1,0	1,5

О17 Расчётные значения сырого белка, формула О15.1

Показатель		Дозы Р, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Сырой белок, %					
Дозы N, кг/га д.в.	0	11,6	11,3	11,1	11,0	10,9	10,8
	30	11,6	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4
	60	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7
	90	11,6	11,7	11,8	11,8	11,8	11,8
	120	11,6	11,8	11,9	11,9	12,0	12,0
	150	11,6	11,9	11,9	12,0	12,1	12,1

О18 Расчётные значения золы, формула О15.6

Показатель		Дозы Р, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		Зола, %					
Дозы К, кг/га д.в.	0	0,97	0,98	1,01	1,05	1,11	1,20
	30	0,98	0,97	0,99	1,02	1,07	1,14
	60	1,00	0,99	0,99	1,01	1,04	1,10
	90	1,04	1,01	1,00	1,01	1,03	1,07
	120	1,10	1,06	1,03	1,02	1,03	1,06
	150	1,17	1,11	1,08	1,06	1,05	1,07

О19 Расчётные значения суммы критических аминокислот, формула О15.13

Показатель		Дозы РК, кг/га д.в.					
		0	30	60	90	120	150
		СКА, г/кг					
Дозы N, кг/га д.в.	0	8,63	8,38	8,25	8,15	8,05	7,97
	30	8,63	8,55	8,49	8,44	8,39	8,34
	60	8,63	8,62	8,59	8,56	8,53	8,49
	90	8,63	8,67	8,66	8,65	8,63	8,61
	120	8,63	8,71	8,73	8,73	8,72	8,71
	150	8,63	8,75	8,78	8,80	8,80	8,80

Приложение II

**Матрица линейной корреляции между агрохимическими свойствами, урожайностью и показателями качества
зерна озимой ржи сорта Фалёнская 4**

Показатели	Урожай- ность зерна	Урожай- ность з.м., выход в трубку	Урожай- ность з.м., колоше- ние	pH	Hг	S	Гумус	P ₂ O ₅	K ₂ O	Лизин	Мети- онин	Трипто- фан	СКА	Белок	Зола	Крах- мал	Масса 1000 зёрен	Натура зерна, г/л	Число падения
Лизин	0,20	0,14	0,21	-0,32	0,40	-0,33	0,39	-0,09	0,04	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Метионин	0,19	0,04	0,21	-0,24	0,31	-0,35	0,37	-0,18	0,10	0,96	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—
Триптофан	0,15	0,19	0,19	-0,30	0,38	-0,35	0,30	-0,12	0,11	0,88	0,90	1,00	—	—	—	—	—	—	—
СКА	0,19	0,13	0,21	-0,30	0,38	-0,35	0,38	-0,12	0,07	0,99	0,98	0,92	1,00	—	—	—	—	—	—
Белок	0,33	0,25	0,35	-0,39	0,47	-0,38	0,36	0,07	0,08	0,92	0,90	0,79	0,91	1,00	—	—	—	—	—
Зола	-0,03	-0,03	0,23	-0,11	0,22	0,13	0,28	0,61	0,40	-0,25	-0,23	-0,34	-0,26	-0,04	1,00	—	—	—	—
Крахмал	0,41	0,29	0,26	-0,25	0,02	-0,22	0,04	0,13	-0,24	-0,14	-0,12	-0,25	-0,16	0,03	0,25	1,00	—	—	—
Масса 1000 зёрен	-0,04	0,02	0,09	-0,10	0,25	0,13	0,13	0,70	0,35	-0,07	-0,13	-0,30	-0,13	0,14	0,54	0,16	1,00	—	—
Натура зерна, г/л	-0,60	-0,53	-0,77	0,45	-0,47	0,21	-0,17	-0,28	0,20	-0,36	-0,30	-0,32	-0,35	-0,47	-0,15	-0,27	-0,04	1,00	—
Число падения	-0,44	-0,51	-0,58	0,45	-0,54	0,34	-0,34	-0,15	-0,08	-0,60	-0,50	-0,43	-0,55	-0,62	-0,08	-0,22	-0,12	0,71	1,00

Приложение Р

Результаты регрессионного анализа содержания NPK в зелёной массе и зерне озимой ржи сорта Фалёнская 4 от изучаемых в опыте видов и соотношений минеральных удобрений

Р1 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, N з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа				
	1	2	3	4	5
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,556	0,542	0,528	0,477	–
X ₂ (N)	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₃ (P ^{0,5})	0,897	0,884	–	–	–
X ₄ (P)	0,962	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,030	0,023	0,019	0,018	0,019
X ₆ (K)	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₇ (NP ^{0,5})	0,011	0,005	0,001	0,001	0,001
X ₈ (NK ^{0,5})	0,599	0,587	0,573	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,004	0,002	0,000	0,000	0,000

Р2 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, N з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,192	0,177	0,159	0,144	0,154	0,000	0,000	0,000
X ₂ (N ²)	0,138	0,124	0,115	0,124	0,315	–	–	–
X ₃ (P)	0,822	0,617	0,596	–	–	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,901	–	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,724	0,717	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,274	0,242	0,153	0,089	0,001	0,001	0,003	0,005
X ₇ (NP)	0,099	0,068	0,060	0,049	0,055	0,089	–	–
X ₈ (NK)	0,198	0,183	0,170	0,160	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,143	0,084	0,076	0,015	0,018	0,026	0,141	–

Р3 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, P з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,037	0,004	0,003	0,001	0,001	0,000
X ₂ (N)	0,915	–	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,047	0,038	0,029	0,023	0,020	0,021
X ₄ (P)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,802	0,806	–	–	–	–
X ₆ (K)	0,747	0,739	0,817	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,005	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₈ (NK ^{0,5})	0,747	0,692	0,675	0,718	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,710	0,687	0,696	0,464	0,471	–

Р4 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, Р з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,106	0,094	0,083	0,074	0,067	0,058	0,017
X ₂ (N ²)	0,544	0,530	0,513	0,504	0,491	0,472	–
X ₃ (P)	0,555	0,541	0,527	0,511	0,503	–	–
X ₄ (P ²)	0,024	0,019	0,015	0,012	0,009	0,000	0,000
X ₅ (K)	0,976	–	–	–	–	–	–
X ₆ (K ²)	0,869	0,824	0,667	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,076	0,066	0,057	0,051	0,045	0,041	0,008
X ₈ (NK)	0,896	0,892	–	–	–	–	–
X ₉ (PK)	0,667	0,655	0,645	0,859	–	–	–

Р5 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, К з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,549	0,528	0,510	0,163	0,132	0,102	0,077	–	–
X ₂ (N)	0,733	0,724	0,736	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,664	0,492	0,482	0,369	0,059	0,045	0,056	0,139	–
X ₄ (P)	0,987	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,369	0,345	0,326	0,333	0,318	0,333	–	–	–
X ₆ (K)	0,039	0,033	0,022	0,018	0,016	0,004	0,000	0,000	0,000
X ₇ (NP ^{0,5})	0,733	0,702	0,726	0,799	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,490	0,472	0,465	0,499	0,441	–	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,842	0,830	–	–	–	–	–	–	–

Р6 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, К з.м. выход в трубку

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,347	0,338	0,328	0,319	0,005	0,007
X ₂ (N ²)	0,333	0,346	0,354	0,515	–	–
X ₃ (P)	0,369	0,349	0,295	0,065	0,064	0,047
X ₄ (P ²)	0,669	0,708	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,089	0,032	0,020	0,022	0,010	0,010
X ₆ (K ²)	0,681	–	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,397	0,383	0,415	–	–	–
X ₈ (NK)	0,035	0,027	0,021	0,020	0,019	0,025
X ₉ (PK)	0,590	0,414	0,279	0,347	0,361	–

Р7 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, N з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,449	0,455	0,397	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N)	0,071	0,036	0,032	0,007	0,006	0,008	0,010	0,022	0,009
X ₃ (P ^{0,5})	0,578	0,541	0,174	0,169	0,237	0,082	0,029	0,130	–
X ₄ (P)	0,660	0,688	–	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,242	0,239	0,196	0,150	0,250	–	–	–	–
X ₆ (K)	0,513	0,386	0,381	0,318	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,079	0,075	0,071	0,063	0,046	0,061	0,096	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,685	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,427	0,388	0,279	0,290	0,112	0,245	–	–	–

Р8 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, N з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,876	–	–	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,585	0,500	0,419	0,325	0,415	–	–
X ₃ (P)	0,557	0,548	0,534	0,436	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,790	0,786	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,259	0,239	0,227	0,017	0,009	0,005	0,012
X ₆ (K ²)	0,607	0,597	0,614	–	–	–	–
X ₇ (NP)	0,169	0,154	0,082	0,080	0,099	0,128	–
X ₈ (NK)	0,071	0,062	0,054	0,050	0,055	0,001	0,001
X ₉ (PK)	0,086	0,076	0,058	0,056	0,009	0,009	0,027

Р9 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, P з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,293	0,280	0,271	0,181	0,175	0,052	–	–	–
X ₂ (N)	0,737	0,741	0,660	–	–	–	–	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,894	–	–	–	–	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,027	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,385	0,374	0,367	0,316	–	–	–	–	–
X ₆ (K)	0,279	0,265	0,258	0,248	0,532	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,849	0,834	–	–	–	–	–	–	–
X ₈ (NK ^{0,5})	0,367	0,343	0,313	0,191	0,208	0,049	0,475	–	–
X ₉ (PK ^{0,5})	0,099	0,088	0,080	0,064	0,047	0,034	0,189	0,242	–

Р10 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, Р з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,157	0,144	0,033	0,016	0,015	0,014
X ₂ (N ²)	0,678	0,722	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,089	0,078	0,071	0,064	0,000	0,000
X ₄ (P ²)	0,526	0,543	0,525	0,552	–	–
X ₅ (K)	0,293	0,277	0,259	0,166	0,101	0,024
X ₆ (K ²)	0,697	0,687	0,725	–	–	–
X ₇ (NP)	0,807	–	–	–	–	–
X ₈ (NK)	0,090	0,079	0,028	0,011	0,010	0,009
X ₉ (PK)	0,468	0,453	0,440	0,478	0,613	–

Р11 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, К з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,116	0,101	0,090	0,081	0,079	0,422	–
X ₂ (N)	0,104	0,092	0,082	0,073	0,112	–	–
X ₃ (P ^{0,5})	0,831	0,818	0,825	–	–	–	–
X ₄ (P)	0,909	0,906	–	–	–	–	–
X ₅ (K ^{0,5})	0,434	0,250	0,214	0,205	0,060	0,173	0,039
X ₆ (K)	0,967	–	–	–	–	–	–
X ₇ (NP ^{0,5})	0,094	0,081	0,051	0,022	0,016	0,028	0,008
X ₈ (NK ^{0,5})	0,111	0,082	0,068	0,062	0,038	0,008	0,004
X ₉ (PK ^{0,5})	0,523	0,491	0,473	0,322	–	–	–

Р12 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, К з.м. колошение

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,220	0,209	0,373	–	–	–	–
X ₂ (N ²)	0,411	0,358	–	–	–	–	–
X ₃ (P)	0,642	0,264	0,173	0,225	–	–	–
X ₄ (P ²)	0,730	–	–	–	–	–	–
X ₅ (K)	0,007	0,006	0,005	0,005	0,006	0,010	0,035
X ₆ (K ²)	0,010	0,008	0,005	0,006	0,009	0,056	–
X ₇ (NP)	0,126	0,059	0,088	0,016	0,002	0,008	0,026
X ₈ (NK)	0,009	0,007	0,001	0,001	0,000	0,001	0,003
X ₉ (PK)	0,044	0,032	0,036	0,026	0,052	–	–

**Р13 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, N зерно**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,038	0,032	0,025	0,023	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
X ₂ (N)	0,685	0,646	0,625	0,649	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,587	0,570	0,562	0,541	0,564	0,516	—	—	—
X ₄ (P)	0,759	0,744	0,677	—	—	—	—	—	—
X ₅ (K ^{0,5})	0,688	0,674	0,670	0,629	0,669	—	—	—	—
X ₆ (K)	0,363	0,339	0,279	0,244	0,221	0,101	0,095	0,264	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,976	—	—	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,455	0,435	0,424	0,395	0,256	0,234	0,196	—	—
X ₉ (PK ^{0,5})	0,917	0,917	—	—	—	—	—	—	—

**Р14 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, N зерно**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
X ₂ (N ²)	0,063	0,055	0,034	0,020	0,017	0,014	0,012	0,014
X ₃ (P)	0,896	—	—	—	—	—	—	—
X ₄ (P ²)	0,824	0,616	0,579	0,568	0,645	0,694	—	—
X ₅ (K)	0,591	0,582	0,569	0,558	0,626	0,159	0,163	—
X ₆ (K ²)	0,665	0,656	0,646	0,697	—	—	—	—
X ₇ (NP)	0,885	0,880	—	—	—	—	—	—
X ₈ (NK)	0,798	0,791	0,784	—	—	—	—	—
X ₉ (PK)	0,682	0,671	0,661	0,652	0,758	—	—	—

**Р15 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, Р зерно**

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,160	0,042	0,009	0,008	0,006	0,006
X ₂ (N)	0,947	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,582	0,557	0,537	0,568	—	—
X ₄ (P)	0,006	0,004	0,002	0,002	0,000	0,000
X ₅ (K ^{0,5})	0,641	0,633	0,632	—	—	—
X ₆ (K)	0,054	0,046	0,043	0,011	0,010	0,000
X ₇ (NP ^{0,5})	0,723	0,714	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
X ₉ (PK ^{0,5})	0,332	0,306	0,282	0,291	0,247	—

Р16 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, Р зерно

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,391	0,193	0,176	0,177	0,025	0,024
X ₂ (N ²)	0,981	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,141	0,127	0,116	0,116	0,115	0,000
X ₄ (P ²)	0,116	0,099	0,088	0,153	0,298	—
X ₅ (K)	0,909	0,905	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,180	0,158	0,022	0,000	0,000	0,000
X ₇ (NP)	0,335	0,274	0,259	0,260	—	—
X ₈ (NK)	0,008	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002
X ₉ (PK)	0,335	0,318	0,302	—	—	—

Р17 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 0,5-1 степени, К зерно

Член регрессии	Этап регрессионного анализа					
	1	2	3	4	5	6
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N ^{0,5})	0,210	0,062	0,017	0,024	0,006	0,007
X ₂ (N)	0,991	—	—	—	—	—
X ₃ (P ^{0,5})	0,064	0,053	0,045	0,056	0,056	—
X ₄ (P)	0,009	0,007	0,004	0,003	0,004	0,009
X ₅ (K ^{0,5})	0,245	0,224	0,213	0,412	—	—
X ₆ (K)	0,356	0,339	0,338	—	—	—
X ₇ (NP ^{0,5})	0,800	0,784	—	—	—	—
X ₈ (NK ^{0,5})	0,095	0,067	0,059	0,090	0,018	0,027
X ₉ (PK ^{0,5})	0,044	0,036	0,029	0,010	0,007	0,007

Р18 Уровень значимости коэффициентов регрессии на различных этапах
регрессионного анализа для уравнения 1-2 степени, К зерно

Член регрессии	Этап регрессионного анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
Свободный член	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
X ₁ (N)	0,131	0,027	0,025	0,026	0,002	0,003	0,004
X ₂ (N ²)	0,949	—	—	—	—	—	—
X ₃ (P)	0,102	0,089	0,086	0,090	0,091	—	—
X ₄ (P ²)	0,030	0,023	0,028	0,028	0,042	0,133	—
X ₅ (K)	0,392	0,376	0,371	—	—	—	—
X ₆ (K ²)	0,096	0,079	0,022	0,003	0,004	0,005	0,008
X ₇ (NP)	0,401	0,351	0,346	0,338	—	—	—
X ₈ (NK)	0,016	0,006	0,006	0,005	0,007	0,009	0,010
X ₉ (PK)	0,416	0,400	—	—	—	—	—

Р19 Регрессионные уравнения, полученные по итогам проведения регрессионного анализа

$$N_{\text{выход в трубку}} = 3,16 + 0,084 \times N + 0,126 \times K^{0,5} - 0,122 \times K - 0,070 \times NP^{0,5} + 0,081 \times PK^{0,5} \quad (\text{P19.1})$$

$$N_{\text{выход в трубку}} = 3,19 + 0,053 \times N - 0,006 \times K^2 \quad (\text{P19.2})$$

$$P_{\text{выход в трубку}} = 0,82 + 0,074 \times N^{0,5} - 0,075 \times P^{0,5} + 0,103 \times P - 0,051 \times NP^{0,5} \quad (\text{P19.3})$$

$$P_{\text{выход в трубку}} = 0,85 + 0,023 \times N + 0,013 \times P^2 - 0,009 \times NP \quad (\text{P19.4})$$

$$K_{\text{выход в трубку}} = 5,56 + 0,239 \times K \quad (\text{P19.5})$$

$$K_{\text{выход в трубку}} = 5,76 - 0,149 \times N + 0,060 \times P + 0,140 \times K + 0,039 \times NK \quad (\text{P19.6})$$

$$N_{\text{колошение}} = 1,74 + 0,046 \times N \quad (\text{P19.7})$$

$$N_{\text{колошение}} = 1,82 - 0,059 \times K + 0,016 \times NK + 0,010 \times PK \quad (\text{P19.8})$$

$$P_{\text{колошение}} = 0,39 + 0,022 \times P \quad (\text{P19.9})$$

$$P_{\text{колошение}} = 0,42 - 0,013 \times N + 0,022 \times P - 0,012 \times K + 0,004 \times NK \quad (\text{P19.10})$$

$$K_{\text{колошение}} = 2,65 + 0,178 \times K^{0,5} - 0,104 \times NP^{0,5} + 0,159 \times NK^{0,5} \quad (\text{P19.11})$$

$$K_{\text{колошение}} = 2,73 + 0,075 \times K - 0,017 \times NP + 0,032 \times NK \quad (\text{P19.12})$$

$$N_{\text{зерно}} = 1,87 + 0,151 \times N^{0,5} \quad (\text{P19.13})$$

$$N_{\text{зерно}} = 1,86 + 0,163 \times N - 0,021 \times N^2 \quad (\text{P19.14})$$

$$P_{\text{зерно}} = 0,83 - 0,060 \times N^{0,5} + 0,040 \times P - 0,039 \times K + 0,052 \times NK^{0,5} \quad (\text{P19.15})$$

$$P_{\text{зерно}} = 0,81 - 0,021 \times N + 0,041 \times P - 0,007 \times K^2 + 0,010 \times NK \quad (\text{P19.16})$$

$$K_{\text{зерно}} = 0,57 - 0,020 \times N^{0,5} + 0,009 \times P + 0,010 \times NK^{0,5} - 0,013 \times PK^{0,5} \quad (\text{P19.17})$$

$$K_{\text{зерно}} = 0,58 - 0,011 \times N - 0,002 \times K^2 + 0,003 \times NK \quad (\text{P19.18})$$

П20 Статистические показатели регрессионных уравнений

Показатель	Уравнение																	
	P19.1	P19.2	P19.3	P19.4	P19.5	P19.6	P19.7	P19.8	P19.9	P19.10	P19.11	P19.12	P19.13	P19.14	P19.15	P19.16	P19.17	P19.18
$\Gamma_{\text{множ}}$	0,926	0,797	0,949	0,923	0,845	0,910	0,523	0,760	0,845	0,897	0,862	0,866	0,773	0,791	0,925	0,919	0,664	0,619
$R^2_{\text{множ}}$	0,857	0,635	0,900	0,853	0,713	0,828	0,274	0,578	0,714	0,804	0,742	0,750	0,598	0,626	0,856	0,845	0,441	0,383
R^2_{adj}	0,818	0,600	0,879	0,831	0,700	0,791	0,241	0,515	0,701	0,763	0,704	0,713	0,579	0,591	0,826	0,812	0,323	0,290
$F_{\text{факт}}$	21,7	18,3	42,8	38,6	54,8	22,8	8,3	9,1	54,8	19,5	19,2	20,0	32,7	17,6	28,3	25,8	3,7	4,1
$F_{\text{теор}}$	2,8	3,5	2,9	3,1	4,3	2,9	4,3	3,1	4,3	2,9	3,1	3,1	4,3	3,5	2,9	2,9	2,9	3,1
p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,020
$S_{\text{ух}}$	0,051	0,076	0,032	0,038	0,270	0,226	0,133	0,107	0,024	0,022	0,187	0,184	0,096	0,094	0,035	0,036	0,014	0,015
ε	1,0	1,7	2,3	3,0	3,8	2,7	6,0	4,2	4,3	3,8	3,6	4,3	3,4	3,3	2,5	2,9	1,9	1,9

Приложение С

Матрица линейной корреляции между агрохимическими свойствами, урожайностью, показателями качества зерна и содержанием NPK в зелёной массе и зерне озимой ржи сорта Фалёнская 4

Показатель	Урожайность зерна	Урожайность з.м. выход в трубку	Урожайность з.м. колошение	pH _{KCl}	Hг	S	Гумус	P ₂ O ₅	K ₂ O	Лизин	Метионин	Триптофан	СКА	Белок	Зола	Крахмал	Масса 1000 зёрен	Натура зерна	ЧП
N _{вых.тр.}	0,30	0,41	0,48	-0,64	0,64	-0,50	0,15	0,18	-0,14	0,26	0,18	0,27	0,25	0,31	-0,18	0,10	-0,06	-0,64	-0,57
N _{кол}	0,10	-0,01	0,02	-0,11	0,31	-0,09	0,21	0,40	0,36	0,17	0,15	0,07	0,15	0,22	0,23	0,14	0,29	-0,29	-0,44
P _{вых.тр.}	0,19	0,20	0,33	-0,40	0,48	0,01	0,13	0,85	0,21	-0,10	-0,21	-0,12	-0,13	0,10	0,62	0,29	0,60	-0,40	-0,27
P _{кол}	-0,23	0,06	-0,02	-0,13	0,25	0,12	0,27	0,86	0,28	-0,07	-0,14	-0,13	-0,10	0,03	0,60	0,20	0,59	-0,16	-0,07
K _{вых.тр.}	-0,24	-0,25	-0,17	0,01	0,25	0,09	0,28	0,37	0,82	0,04	0,07	0,11	0,06	0,03	0,53	-0,26	0,29	0,19	-0,01
K _{кол}	-0,03	-0,23	-0,13	0,03	0,21	-0,15	0,29	0,06	0,83	0,21	0,30	0,25	0,24	0,26	0,14	-0,23	0,26	0,19	-0,09
N/P _{вых.тр.}	-0,09	-0,04	-0,18	0,17	-0,25	-0,19	-0,07	-0,78	-0,26	0,21	0,28	0,25	0,24	0,02	-0,72	-0,28	-0,63	0,17	0,06
N/K _{вых.тр.}	0,33	0,38	0,33	-0,26	0,06	-0,27	-0,16	-0,23	-0,69	0,09	0,03	0,03	0,06	0,12	-0,49	0,25	-0,24	-0,40	-0,23
P/K _{вых.тр.}	0,41	0,41	0,48	-0,41	0,28	-0,08	-0,09	0,50	-0,46	-0,12	-0,24	-0,21	-0,17	0,09	0,18	0,51	0,33	-0,55	-0,28
N/P _{кол}	0,38	-0,05	0,06	0,02	0,01	-0,22	-0,13	-0,57	-0,04	0,23	0,28	0,20	0,24	0,17	-0,47	-0,06	-0,40	-0,12	-0,32
N/K _{кол}	0,09	0,20	0,16	-0,13	0,02	0,07	-0,15	0,24	-0,62	-0,10	-0,22	-0,24	-0,16	-0,11	0,07	0,35	-0,04	-0,42	-0,24
P/K _{кол}	-0,16	0,18	0,09	-0,13	0,01	0,16	-0,05	0,53	-0,46	-0,22	-0,35	-0,33	-0,28	-0,19	0,36	0,32	0,22	-0,25	0,01
N _{зерно}	0,39	0,13	0,59	-0,38	0,41	-0,30	0,47	0,08	0,19	0,58	0,59	0,54	0,59	0,58	0,21	0,07	-0,07	-0,61	-0,67
P _{зерно}	-0,18	-0,06	0,03	-0,29	0,40	-0,02	-0,01	0,80	0,01	-0,01	-0,10	-0,10	-0,05	0,06	0,42	0,10	0,51	-0,33	-0,16
K _{зерно}	-0,35	-0,52	-0,26	0,34	-0,43	0,25	-0,06	0,13	-0,02	-0,40	-0,33	-0,43	-0,40	-0,34	0,13	0,06	0,29	0,43	0,49

Окончание приложения С

Показатели	N _{вых.тр.}	N _{кол}	P _{вых.тр.}	P _{кол}	K _{вых.тр.}	K _{кол}	N/P _{вых.тр.}	N/K _{вых.тр.}	P/K _{вых.тр.}	N/P _{кол}	N/K _{кол}	P/K _{кол}	N _{зерно}	P _{зерно}	K _{зерно}
N _{вых.тр.}	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N _{кол}	0,27	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P _{вых.тр.}	0,22	0,35	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P _{кол}	0,00	0,52	0,70	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K _{вых.тр.}	-0,37	0,32	0,37	0,41	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K _{кол}	-0,05	0,46	0,05	0,09	0,64	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N/P _{вых.тр.}	0,16	-0,25	-0,92	-0,70	-0,52	-0,08	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—
N/K _{вых.тр.}	0,68	-0,13	-0,20	-0,34	-0,93	-0,51	0,47	1,00	—	—	—	—	—	—	—
P/K _{вых.тр.}	0,53	0,08	0,65	0,31	-0,47	-0,47	-0,45	0,57	1,00	—	—	—	—	—	—
N/P _{кол}	0,28	0,32	-0,42	-0,64	-0,22	0,25	0,53	0,31	-0,20	1,00	—	—	—	—	—
N/K _{кол}	0,25	0,29	0,22	0,31	-0,43	-0,71	-0,13	0,43	0,56	-0,02	1,00	—	—	—	—
P/K _{кол}	0,03	0,02	0,44	0,62	-0,20	-0,71	-0,43	0,14	0,57	-0,63	0,79	1,00	—	—	—
N _{зерно}	0,37	0,40	0,21	0,07	0,26	0,30	-0,09	-0,06	0,01	0,29	0,03	-0,14	1,00	—	—
P _{зерно}	0,26	0,41	0,67	0,77	0,14	-0,10	-0,55	-0,04	0,49	-0,46	0,42	0,61	0,04	1,00	—
K _{зерно}	-0,30	0,02	0,06	0,28	-0,06	0,07	-0,15	-0,10	0,06	-0,30	-0,03	0,18	-0,30	0,30	1,00

Приложение Т
Экономическая эффективность возделывания озимой ржи

Вариант	2018-2019 гг.					2020-2021 гг.					В среднем за 2 года				
	Затраты, руб.		Стоимость продукции	Прибыль	Рентабельность	Затраты, руб.		Стоимость продукции	Прибыль	Рентабельность	Затраты, руб.		Стоимость продукции	Прибыль	Рентабельность
	на 1 т	на 1 га				на 1 т	на 1 га				на 1 т	на 1 га			
Без удобрений	5453	12925	22515	9590	74	6631	11605	16625	5020	43	5954	12264	19570	7306	60
K ₉₀	6543	16737	24301	7564	45	8232	15229	17575	2346	15	7238	15995	20995	5000	31
P ₉₀	6963	18662	25460	6798	36	9795	16554	16055	-499	-3	8045	17618	20805	3187	18
P ₉₀ K ₉₀	8384	21468	24326	2858	13	11281	19742	16625	-3117	-16	9578	20593	20425	-168	-1
N ₉₀	6516	18773	27371	8598	46	6328	19048	28595	9547	50	6413	18920	28025	9105	48
N ₉₀ K ₉₀	7716	21681	26695	5014	23	7879	21511	25935	4424	21	7796	21596	26315	4719	22
N ₉₀ P ₉₀	9544	22348	22244	-104	0	10094	22004	20710	-1294	-6	9812	22174	21470	-704	-3
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	11047	25299	21755	-3544	-14	11009	25320	21850	-3470	-14	11061	25291	21722	-3569	-14
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	6415	18754	27773	9019	48	8240	16893	19475	2582	15	7181	17809	23560	5751	32
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	7621	21634	26970	5336	25	9696	19974	19570	-404	-2	8492	20805	23275	2470	12
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	8270	23238	26695	3457	15	10587	21597	19380	-2217	-10	9266	22401	22966	565	3
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	8747	26853	29165	2313	9	11849	24764	19855	-4909	-20	10003	25808	24510	-1298	-5
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	7996	22604	26856	4251	19	9667	21268	20900	-368	-2	8710	21950	23940	1990	9
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	9893	25033	24039	-994	-4	11854	23945	19190	-4755	-20	10783	24478	21565	-2913	-12
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	10922	26470	23024	-3446	-13	9453	27507	27645	138	1	10141	26974	25270	-1704	-6
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	12341	29452	22672	-6779	-23	11291	30034	25270	-4764	-16	11815	29727	23902	-5825	-20
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	8925	21638	23033	1395	6	9023	21564	22705	1141	5	8955	21615	22930	1316	6
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	9555	25138	24994	-144	-1	10969	24241	20995	-3246	-13	10235	24667	22895	-1772	-7
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	9738	27135	26472	-663	-2	11899	25821	20615	-5206	-20	10678	26481	23560	-2921	-11
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	10760	30248	26707	-3541	-12	13157	28945	20900	-8045	-28	11834	29584	23750	-5834	-20
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	10188	25957	24205	-1752	-7	12194	24875	19380	-5495	-22	11106	25401	21729	-3673	-14
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	10803	29384	25840	-3544	-12	12756	28319	21090	-7229	-26	11681	28851	23465	-5386	-19
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	12108	30647	24046	-6601	-22	13305	30069	21470	-8599	-29	12697	30346	22705	-7641	-25
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	14776	33085	21272	-11813	-36	14335	33257	22040	-11217	-34	14549	33172	21660	-11512	-35

Приложение У

Энергетическая эффективность возделывания озимой ржи по вариантам опыта, в среднем за 2019 и 2021 гг.

Вариант	Выход энергии с урожаем, ГДж/га						Полные затраты техногенной энергии, ГДж/га	Прирост техногенной энергии, ГДж/га		Коэффициент энергетической эффективности производства				Энергоемкость производства единицы урожая о.п., ГДж/т		
	о.п.		п.п.		всего					о.п.		общий				
	1	2	1	2	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2	
Без удобрений	27,7		14,6		42,3		22,7		19,6		1,22		1,86		11,0	
K ₉₀	29,7	2,0	15,7	1,1	45,4	3,1	23,9	1,2	21,4	1,8	1,24	0,02	1,90	0,03	10,8	-0,19
P ₉₀	29,4	1,7	15,5	0,9	45,0	2,7	23,9	1,2	21,1	1,5	1,23	0,01	1,88	0,02	10,9	-0,10
P ₉₀ K ₉₀	28,9	1,2	15,3	0,7	44,2	1,9	24,3	1,6	19,8	0,3	1,19	-0,03	1,82	-0,05	11,3	0,29
N ₉₀	39,6	12,0	20,9	6,3	60,6	18,3	32,8	10,1	27,8	8,2	1,21	-0,01	1,85	-0,01	11,1	0,08
N ₉₀ K ₉₀	37,2	9,5	19,7	5,1	56,9	14,6	32,7	10,0	24,2	4,6	1,14	-0,08	1,74	-0,12	11,8	0,78
N ₉₀ P ₉₀	30,4	2,7	16,0	1,4	46,4	4,1	31,0	8,3	15,4	-4,2	0,98	-0,24	1,50	-0,37	13,7	2,70
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	30,8	3,1	16,3	1,7	47,0	4,7	31,6	8,9	15,4	-4,2	0,97	-0,25	1,49	-0,38	13,8	2,79
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	33,3	5,6	17,6	3,0	50,9	8,6	27,1	4,4	23,8	4,2	1,23	0,01	1,88	0,02	10,9	-0,09
N ₃₀ P ₃₀ K ₁₂₀	32,9	5,2	17,4	2,8	50,3	8,0	27,5	4,8	22,8	3,2	1,20	-0,02	1,83	-0,04	11,2	0,22
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₃₀	32,5	4,8	17,2	2,6	49,7	7,4	27,5	4,8	22,2	2,6	1,18	-0,04	1,81	-0,05	11,4	0,34
N ₃₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	34,7	7,0	18,3	3,7	53,0	10,7	28,6	5,8	24,4	4,9	1,21	0,00	1,86	-0,01	11,1	0,04
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₃₀	33,9	6,2	17,9	3,3	51,8	9,5	33,9	11,2	17,9	-1,7	1,00	-0,22	1,53	-0,34	13,4	2,43
N ₁₂₀ P ₃₀ K ₁₂₀	30,5	2,8	16,1	1,5	46,6	4,3	33,6	10,9	13,0	-6,5	0,91	-0,31	1,39	-0,47	14,8	3,77
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₃₀	35,8	8,1	18,9	4,3	54,6	12,3	34,9	12,2	19,7	0,1	1,02	-0,20	1,56	-0,30	13,1	2,11
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	33,9	6,2	17,9	3,3	51,8	9,5	35,0	12,3	16,8	-2,8	0,97	-0,25	1,48	-0,38	13,9	2,86
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	32,4	4,7	17,1	2,5	49,5	7,2	29,5	6,8	20,0	0,5	1,10	-0,12	1,68	-0,18	12,2	1,20
N ₆₀ P ₆₀ K ₁₅₀	32,5	4,8	17,1	2,5	49,6	7,3	30,0	7,3	19,6	0,0	1,08	-0,14	1,65	-0,21	12,4	1,38
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₆₀	33,3	5,6	17,6	3,0	50,9	8,6	30,3	7,6	20,7	1,1	1,10	-0,12	1,68	-0,18	12,2	1,18
N ₆₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	33,6	5,9	17,7	3,1	51,3	9,1	30,9	8,2	20,5	0,9	1,09	-0,13	1,66	-0,20	12,3	1,32
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₆₀	30,8	3,1	16,3	1,7	47,0	4,7	35,7	13,0	11,3	-8,2	0,86	-0,36	1,32	-0,55	15,6	4,57
N ₁₅₀ P ₆₀ K ₁₅₀	33,2	5,5	17,5	2,9	50,7	8,4	36,8	14,1	13,9	-5,7	0,90	-0,32	1,38	-0,49	14,9	3,89
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₆₀	32,1	4,4	17,0	2,4	49,1	6,8	36,6	13,9	12,5	-7,1	0,88	-0,34	1,34	-0,52	15,3	4,30
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	30,6	3,0	16,2	1,6	46,8	4,5	36,8	14,1	10,1	-9,5	0,83	-0,39	1,27	-0,59	16,1	5,10

Примечание – о.п. – основная продукция, п.п. – побочная продукция, 1 – значение показателя, 2 – отклонение от контроля

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова»
(ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ)

СОГЛАСОВАНО
Ректор ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ,
Андреев Алексей Петрович

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Предуралье»
Валиев Васим Варисович

«20» сентября 2023 г.

«20» сентября 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и
технологических работ

Заказчик Общество с ограниченной ответственностью «Предуралье»
(наименование организации)

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы
Агрохимические параметры дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, урожайность и
показатели качества зерна озимой ржи в результате длительного применения минеральных
удобрений в Среднем Предуралье
(государственной темы, № госрегистрации 121041500110-4)

выполненной Шишковым Д.Г., аспирантом кафедры агрохимии ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ
(наименование учебного вуза)

выполняемой 2019-2023 гг.

(срок выполнения)

внедрены в ООО «Предуралье», Пермский край, Пермский муниципальный округ, село Лобаново
(наименование предприятия, где осуществлялось внедрение)

1. Вид внедренных работ технология удобрения озимой ржи сорта Фалёнская 4
(технология)
2. Характеристика масштаба внедрения массовое
3. Форма внедрения:
Метод полевой производственный опыт
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ
Разработана адаптивная технология применения удобрений под озимую рожь сорта
Фалёнская 4 в Среднем Предуралье.
5. Внедрены в сельскохозяйственное производство в ООО «Предуралье» Пермского
муниципального округа Пермского края
6. Годовой экономический эффект
ожидаемый
фактический 1100-2130 руб/га
7. Объем внедрения 10 га, что составляет 100% от объема внедрения, положенного в основу
расчета гарантированного экономического эффекта, рассчитанного по окончании НИР. При
заключении договора:

От ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ
Проректор по научной и инновационной работе
международному сотрудничеству
кандидат с.-х. наук, доцент

 (Александр А. Герасимов)

Исполнитель научной работы
 (Шишков Д.Г.)



От организации
Директор организации
ООО «Предуралье»

 (Валиев В.В.)
