

УДК 631.445.24:633.14:631.82(470.53)

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата сельскохозяйственных наук

Пермь – 2025

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова» в 2019-2023 гг.

Научный руководитель: **Олехов Владимир Радомирович**
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Официальные оппоненты: **Ушаков Роман Николаевич**
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
агротехнологический университет имени П.А.
Костычева», кафедра агрономии и защиты
растений, профессор

Попов Федор Александрович
кандидат сельскохозяйственных наук,
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр
Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»,
лаборатория земледелия, агрохимии,
кормопроизводства, старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБНУ «Верхневолжский Федеральный
аграрный научный центр»

Защита диссертации состоится «17» декабря 2025 г. в 09⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 35.2.017.01 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65, зал заседаний, тел. 8 (843) 598-40-50, e-mail: info@kazgau.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», адрес: 420011, г. Казань, ул. Р. Гареева, д. 62 и на сайте университета www.kazgau.ru

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420011, г. Казань, ул. Ферма-2, д. 53 Институт агробиотехнологий и землепользования Казанского ГАУ, ученому секретарю диссертационного совета Амирову М.Ф., e-mail: dissovet_kazgau@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета

Амиров Марат Фуатович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. 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 (Пасынков, Пасынкова, 2011; Полетаев и др., 2022). Озимая рожь является одной из важнейших стратегических сельскохозяйственных культур России и Европы, наиболее полно, среди других озимых, реализует свой потенциал в зоне малоплодородных дерново-подзолистых почв (Сысуев и др., 2014, 2015; Абашев и др., 2018, 2020). 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). Большое количество зерна для производства продовольствия в связи с этим завозится из Омской и Курганской областей, Алтайского края. Поэтому потребность в высококачественном зерне озимой ржи в Пермском крае высока (Мудрых, 2017).

Залогом повышения урожайности и качества зерна озимой ржи является систематическое применение минеральных удобрений и высокий уровень плодородия почв. При систематическом применении минеральных удобрений происходит существенное изменение агрохимических свойств дерново-подзолистых почв как в сторону их улучшения, так и в сторону их ухудшения. 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 и задачи исследований. 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 биохимический состав 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 1978-1980 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 диссертации. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Современное состояние вопроса

В главе выполнен аналитический обзор научных исследований о влиянии минеральных удобрений на агрохимические показатели дерново-подзолистых почв, а также урожайность, показатели качества, биохимический и элементный состав озимой ржи.

2 Методика и условия проведения исследований

Исследования проводили в 2018-2021 гг. 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. Полевой опыт заложен в 1978 году под руководством С.И. Поповой, в разные годы опытом руководили Ф.М. Зиганьшина, П.А. Лейних, А.И. Косолапова. С 2019 года соискатель является ответственным исполнителем опыта.

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.). Схема опыта представлена в таблице 1

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. Под озимую рожь в шестой ротации 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 половину дозы азотных удобрений вносили перед посевом под культивацию, вторую половину в ранневесеннюю подкормку. Фосфор и калий в полных дозах вносили под предпосевную культивацию. Все удобрения вносили вручную. Норма высева составила 6 млн. всхожих семян на гектар, 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 два типа уравнений 0,5-1 и 1-2 степеней, которые в общем виде выглядят так, как представлено в формулах 1-2.

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

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

где:

y – зависимая переменная (показатель)

a – свободный член, характеризующий значение показателя на контрольном варианте

b₁-b₉ – коэффициенты регрессии, характеризующие действия видов и сочетаний минеральных удобрений

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

R² – множественный коэффициент детерминации;

ε, % – 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 %.

Почвенные образцы были отобраны в слое 0-20 см со всех делянок опыта в конце 5 ротации севооборота (2017 и 2019 гг.). Лабораторные исследования проводили по общепринятым методикам и ГОСТам: pH_{KCl} по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85), гидролитическая кислотность (Нг) по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91, с 2022 года ГОСТ 26212-21), сумма поглощенных оснований (S) по методу Каппена (ГОСТ 27821-2020), содержание гумуса по И.В. Тюрину в модификации Б.А. Никитина, содержание подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 54650-2011), ёмкость катионного обмена (ЕКО) и степень насыщенности почв основаниями (V) расчётным методом.

В течение вегетации озимой ржи отбирали зелёную массу в фазы выхода в трубку и колошения. Содержание валовых форм азота, фосфора и калия определяли методом мокрого озоления по Гинзбург из одной навески (Практикум по агрохимии, 2001).

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, технологические показатели качества определяли выборочно в шести вариантах, представляющих собой блок азотных удобрений. Лабораторные исследования проводили согласно следующим методикам и ГОСТам: сырой белок по ГОСТ 10846-91, натура в микропурке объёмом 10 см³ по ГОСТ 10840-217, масса 1000 зёрен по ГОСТ 10842-89, число падения (ЧП) методом Хагберга-Пертена по ГОСТ ISO 3093-2016, крахмал по ГОСТ 10845-98, зола и содержание критических аминокислот (лизин, метионин, триптофан) методом спектроскопии в ближней инфракрасной области на приборе SpectraStar XT.

Почва опытного участка дерново-подзолистая тяжелосуглинистая на покровных отложениях. При закладке полевого опыта в 1978 и 1980 гг. дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва обладала характеристиками, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Статистические характеристики агрохимических показателей дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы до закладки полевого опыта (в среднем по обоим закладкам), N=24

Показатель	Среднее	Минимальное	Максимальное	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
pH _{KCl}	5,7	5,4	6,2	0,2	3,8
Hг	2,4	1,6	3,1	0,4	16,3
S	19,4	17,1	22,8	1,4	7,1
ЕКО	21,8	19,5	25,0	1,3	5,8
V	89,0	85,5	92,2	1,9	2,2
Гумус	1,98	1,84	2,21	0,10	5,2
P ₂ O ₅	182	126	247	35	19,5
K ₂ O	161	128	213	20	12,6

Погодные условия в период возделывания озимой ржи различались по температурному режиму и влагообеспеченности. Основной особенностью погодных условий 2018-2019 гг. является обильное количество осадков с третьей декады июня до уборки, из-за чего во многих вариантах опыта наблюдалось полегание растений и прорастание зерна на корню. Погодные условия в 2020-2021 гг. отличались сильно засушливыми условиями в первую и вторую декаду мая 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 среднеемноголетних данных на 88,6-43,9 °С. Суммы эффективных температур за весенне-летний период и вегетационный период в целом находились на уровне среднеемноголетних значений.

3 Влияние длительного применения минеральных удобрений на агрохимические показатели дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы

В варианте без применения удобрений pH_{KCl} в среднем по двум закладкам уменьшился с 5,7 до 5,3. При применении различных доз и сочетаний минеральных удобрений величина показателя снизилась в среднем по двум закладкам с 5,7 до 5,1. Наибольшее снижение (более 1,0 ед. pH) происходило в вариантах с применением максимальных доз азотных удобрений – N₁₅₀P₆₀K₆₀, N₁₅₀P₆₀K₁₅₀, N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀.

По регрессионным уравнениям доказуемое влияние на степень кислотности оказали азотные удобрения. Изменение pH по делянкам опыта лишь на 49 % может быть объяснено действием азотных удобрений. Точность прогнозной модели по относительной ошибке аппроксимации хорошая.

$$pH_{KCl}(\text{среднее}) = 5,44 - 0,234 \times N^{0,5} (R^2=0,49; \varepsilon=2,9 \%) \quad (3)$$

На рисунке 1 представлен график снижения величины pH_{KCl} под действием азотных удобрений, построенный на основании регрессионного уравнения 3. Наибольшее снижение величины показателя (около 0,2 единиц

pH) происходило при длительном внесении единичной дозы азотного удобрения (750 кг/га за 40 лет), с увеличением дозы эффект постепенно затухал.

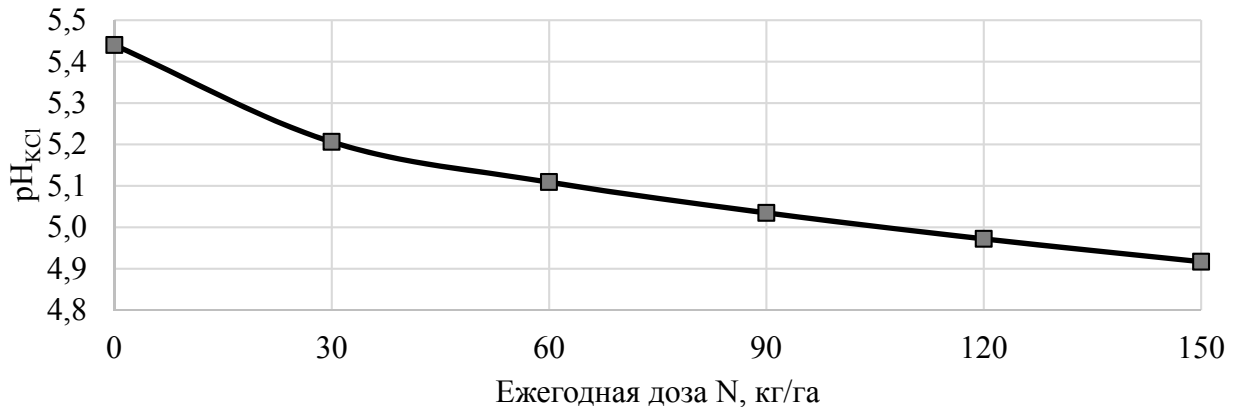


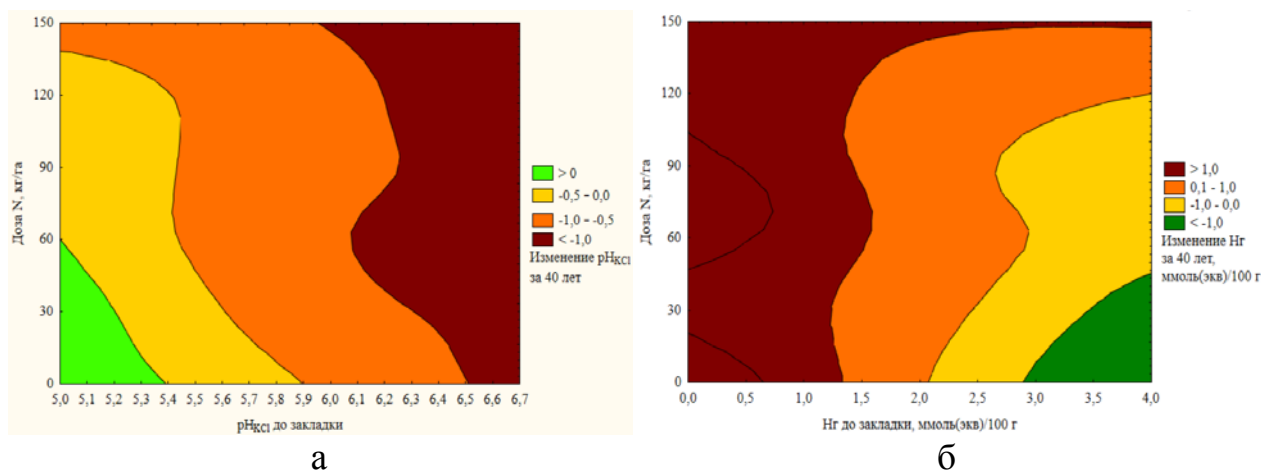
Рисунок 1 – Влияние доз азотных удобрений на pH_{KCl} (расчётные данные)

Величина гидролитической кислотности увеличилась в варианте без применения удобрений. В вариантах опыта, в которых вносили минеральные удобрения, установлена следующая закономерность: при низких дозах минеральных удобрений изменение показателя носило неявный характер, с увеличением доз прослеживается чёткая закономерность на увеличение Нг. Необходимо также отметить сильное варьирование ($V > 20\%$) показателя как до закладки опыта, так и в конце 5 ротации, что может быть косвенным свидетельством значительного влияния исходной неоднородности.

Определяющую роль в увеличении гидролитической кислотности играли азотные удобрения, суммарное действие фосфорных и калийных удобрений было несколько меньше (формула 4). Действием удобрений может быть объяснен 71 % изменения показателя по опыту. Прогнозная точность регрессионной модели удовлетворительная.

$$H_{г(среднее)} = 1,95 + 0,185 \times N + 0,154 \times PK^{0,5} (R^2=0,71; \varepsilon=9,8 \%) \quad (4)$$

В связи с указанным ранее сильным варьированием обоих показателей были построены графические прогнозные модели уровня изменения pH и Нг в зависимости от их исходного уровня (рисунок 2). При добавлении в модель исходных значений для pH_{KCl} коэффициент детерминации увеличился до 0,61, при снижении точности модели ($\varepsilon=8,5\%$). Для Нг была выявлена обратная закономерность: R^2 снизился с 0,79 до 0,56 в модели с дозами азота, и до 0,65. в модели с суммарной дозой NPK. 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.



а – рНКСІ, б – Нг

Рисунок 2 – Графическая прогнозная модель уровня изменения рНКСІ и Нг к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз азотных удобрений (N=48)

Сумма поглощённых оснований, ёмкость катионного обмена и степень насыщенности почвы основаниями за пять ротаций восьмипольного севооборота уменьшились в варианте без применения удобрений на 1,2 ммоль(экв)/100 г, 0,9 ммоль(экв)/100 г и 1,7 % соответственно. При применении минеральных удобрений данные показатели также снижались: в среднем по вариантам с применением удобрений S снизилась с 19,4 до 18,4 ммоль(экв)/100 г, ЕКО с 21,8 до 21,2 ммоль(экв)/100 г, V с 89 до 87 %. Результаты регрессионного анализа представлены в формулах 5-7. Точность прогнознй модели хорошая.

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

$$\text{ЕКО} = 21,45 - 0,112 \times N^2 + 0,107 \times NP \quad (R^2=0,36; \varepsilon=3,6 \%) \quad (6)$$

$$V = 90,85 - 1,089 \times N - 0,527 \times PK^{0,5} \quad (R^2=0,65; \varepsilon=1,6 \%) \quad (7)$$

Содержание гумуса в почве в варианте без удобрений в первой закладке увеличилось с 1,61 до 2,03 %, во второй закладке снизилось с 2,15 до 1,98 %. Увеличение содержания гумуса в вариантах с низким исходным значением отмечается также при внесении минеральных удобрений, однако только в первой закладке опыта. Увеличение показателя по некоторым вариантам первой закладки опыта может быть связано с низким исходным содержанием гумуса в почве, которое при активном сельскохозяйственном использовании восстанавливалось до естественного уровня (1,8-2,2 %), характерного для почв места проведения исследований. В среднем по опыту при применении минеральных удобрений содержание гумуса не изменилось, исключением являются варианты с применением N₁₅₀P₁₅₀K₆₀ и N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀, в которых

отмечена тенденция к увеличению содержания гумуса как отдельно по закладкам, так и в среднем по двум закладкам на 0,14-0,22 %.

Указанная выше закономерность подтверждается значениями коэффициентов корреляции по Пирсону и Спирмену. Между изменением содержания гумуса и его исходным содержанием выявлена обратная высокая связь (-0,82 и -0,76 соответственно), с дозами минеральных удобрений достоверной связи не установлено.

При длительном возделывании культур севооборота без применения минеральных удобрений в опыте отмечено снижение содержания подвижных форм фосфора и калия относительно исходных значений на 45 и 53 мг/кг соответственно. Содержание элементов питания в среднем по всем вариантам с применением удобрений увеличилось на 127 мг/кг по фосфору и на 53 мг/кг по калию. Содержание фосфора в вариантах где фосфорные удобрения не вносили снизилось на 9-45 мг/кг и установилось на уровне 175-206 мг/кг, что может являться минимальным уровнем для данной почвы. Содержание калия без применение калийных удобрений снизилось на 27-53 мг/кг до 116-143 мг/кг.

Регрессионные уравнения, описывающие действие удобрений, представлены в формулах 8-9. Действие азотных удобрений по полученному регрессионному уравнению возможно рассматривать только до дозы 60 кг/га.

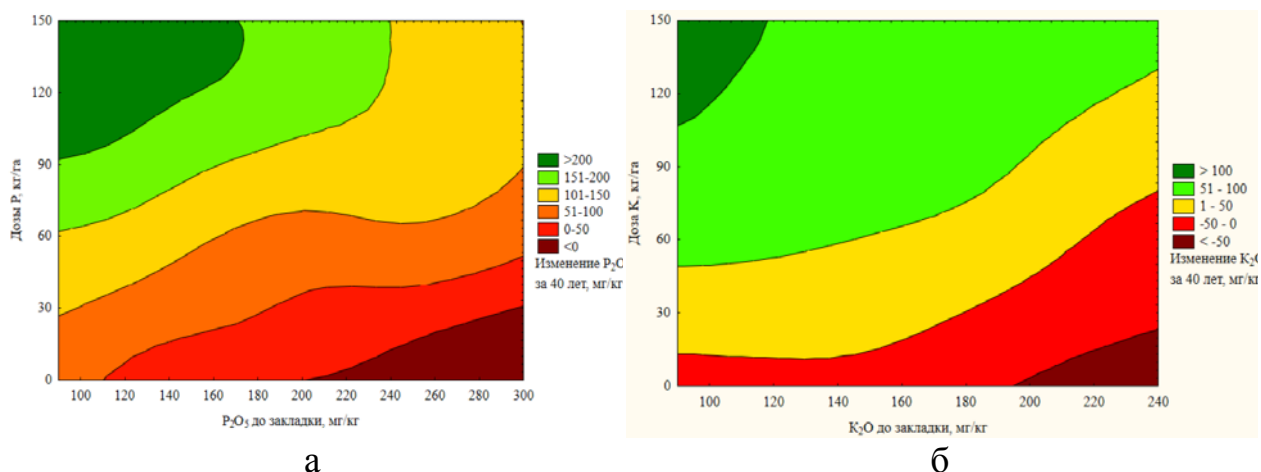
$$P_2O_5 \text{ (средняя)} = 208,79 - 56,849 \times N^{0,5} + 22,039 \times N + 46,980 \times P \quad (8)$$

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

$$K_2O \text{ (среднее)} = 158,66 - 84,496 \times N^{0,5} + 31,865 \times N + 34,721 \times K \quad (9)$$

$$(R^2=0,88; \varepsilon=9,0 \%)$$

При построении модели изменения содержания подвижного фосфора в почве в зависимости от исходного уровня показателя получен более низкий коэффициент детерминации чем в модели только с минеральными удобрениями (R^2 0,56 и 0,94 соответственно) (рисунок 3). Аналогичные модели по изменению содержания калия показали близкие результаты: R^2 составили 0,88 и 0,79 соответственно. Снижение содержания подвижного фосфора произошло только при исходном уровне от 220 до 300 мг/кг без применения фосфорных удобрений. Снижение содержания в почве калия без применения удобрений отмечено на всём диапазоне исходного содержания, представленного в опыте. Полученные данные могут быть подтверждением отмеченной выше закономерности: достижения минимального уровня содержания подвижного фосфора для данных почв и отсутствие такого минимального уровня для содержания калия. Прогнозная точность моделей хорошая для фосфора ($\varepsilon=3,0 \%$) и удовлетворительная для калия ($\varepsilon=14,2 \%$).



а – подвижный фосфор, б – подвижный калий

Рисунок 3 – Графическая прогнозная модель уровня изменения P₂O₅ и K₂O к концу пятой ротации севооборота (40 лет) в зависимости от исходного уровня показателя и доз фосфорных удобрений (N=48)

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 3).

В условиях 2019 года, когда уборка культуры проходила при повышенном количестве осадков, наибольшая величина урожайности получена в варианте N₃₀P₁₂₀K₁₂₀, относительно высокая – в вариантах N₃₀P₃₀K₃₀ и N₉₀. 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 N₉₀ и N₃₀P₃₀K₃₀ (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 среднемноголетних сроков. Применение почти всех исследуемых доз и соотношений минеральных удобрений приводило к увеличению урожайности относительно контроля, за исключением вариантов с односторонним внесением фосфорных и сочетанием 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 N₁₂₀P₁₂₀K₃₀. Наибольшая агрономическая окупаемость минеральных удобрений зерном отмечена в варианте N₉₀.

Таблица 3 – 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/кг

В среднем за два года исследований математически доказуемый эффект оказали азотные и фосфорные удобрения (формула 10). Действием этих удобрений может быть объяснено 73 % изменчивости урожайности по вариантам. Точность прогноза хорошая. При внесении азота урожайность увеличивалась, при внесении фосфора свыше 30 кг/га д.в. снижалась или оставалась на одном уровне (рисунок 4).

$$U_{19-21} = 2,15 + 0,644 \times N^{0,5} - 0,142 \times N - 0,295 \times P^{0,5} + 0,176 \times P - 0,145 \times NP^{0,5} \quad (R^2=0,73; \varepsilon=3,4 \%) \quad (10)$$

По расчётным данным, наибольшая в опыте окупаемость зерном удобрений может быть получена при дозе азотных удобрений 30 кг/га и составить 16,7 кг/кг при урожайности 2,65 т/га. Несмотря на то, что наибольшая в опыте урожайность по расчётным данным отмечена при дозе N₁₅₀, после дозы N₆₀ урожайность зерна озимой ржи практически перестаёт расти.

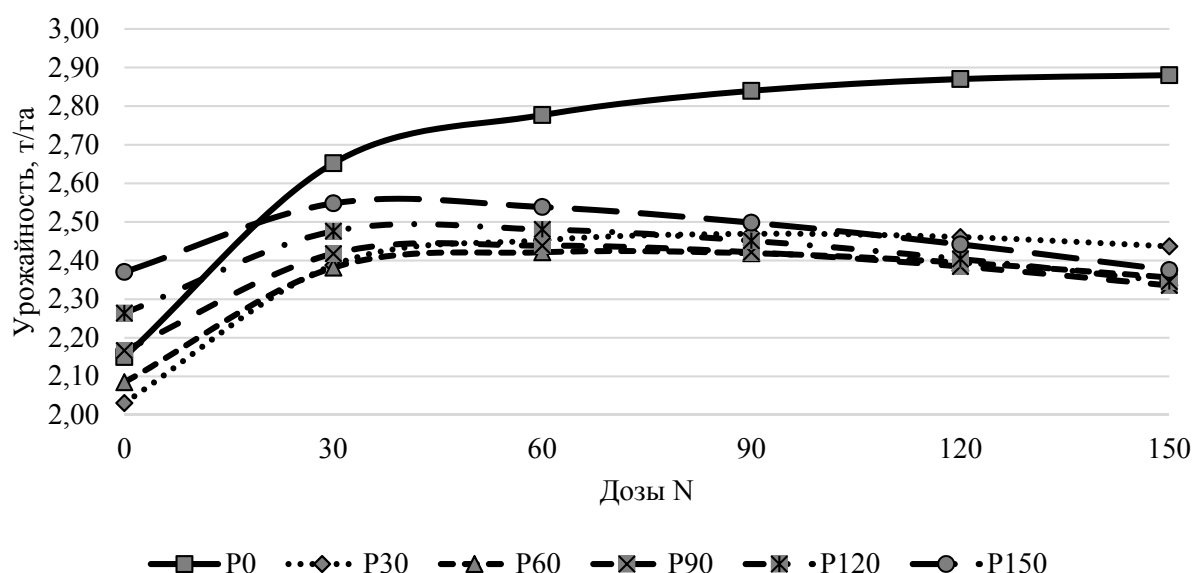


Рисунок 4 – Влияние доз азотных и фосфорных удобрений на урожайность зерна озимой ржи (расчётные данные)

Полученные закономерности по урожайности зерна подтверждаются регрессионными уравнениями, описывающими урожайность надземной массы в фазы выхода в трубку и колошения. Азотные удобрения в данные фазы также являлись основным фактором, повышающим урожайность, но определяли при этом всего 29 и 35 % изменения величины показателя по вариантам.

5 Влияние различных доз и соотношений минеральных удобрений на показатели качества зерна озимой ржи

Сформированное в условиях высокой влажности зерно урожая 2019 года относилось к 4 классу качества. Масса 1000 зёрен изменялась в диапазоне от 21,3 до 25,8 г, натура зерна от 596 до 668 г/л. Величина «Числа падения» по всем вариантам была получена на уровне воды – 60 с. По результатам регрессионного уравнения снижение массы 1000 зёрен и натуры зерна произошло при применении азотных удобрений.

В условиях 2021 года масса 1000 зёрен изменялась от 21,7 г ($N_{120}P_{30}K_{30}$) до 27,2 г ($N_{150}P_{150}K_{150}$), в среднем по вариантам с применением удобрений величина показателя увеличилась относительно контроля на 2,2 г. 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. Среднее значение по всем вариантам с применением удобрений составило 157 с при 203 с на контроле. Наименьшее значение отмечено в варианте $N_{150}P_{60}K_{150}$, наибольшее в варианте K_{90} .

Масса 1000 зёрен в опыте увеличивалась под действием фосфорных удобрений ($R^2=0,40$; $\varepsilon=3,7$ %). Натура зерна и «Число падения» (ЧП) уменьшались при применении азотных удобрений (формулы 11, 12). Применение калийных удобрений снижало негативное воздействие на натуру азотных удобрений. Прогнозная точность уравнений хорошая и удовлетворительная.

$$\text{Натура} = 702,92 - 8,970 \times N + 1,134 \times NK \quad (R^2=0,55; \varepsilon=1,2 \%) \quad (11)$$

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

На рисунке 5 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.

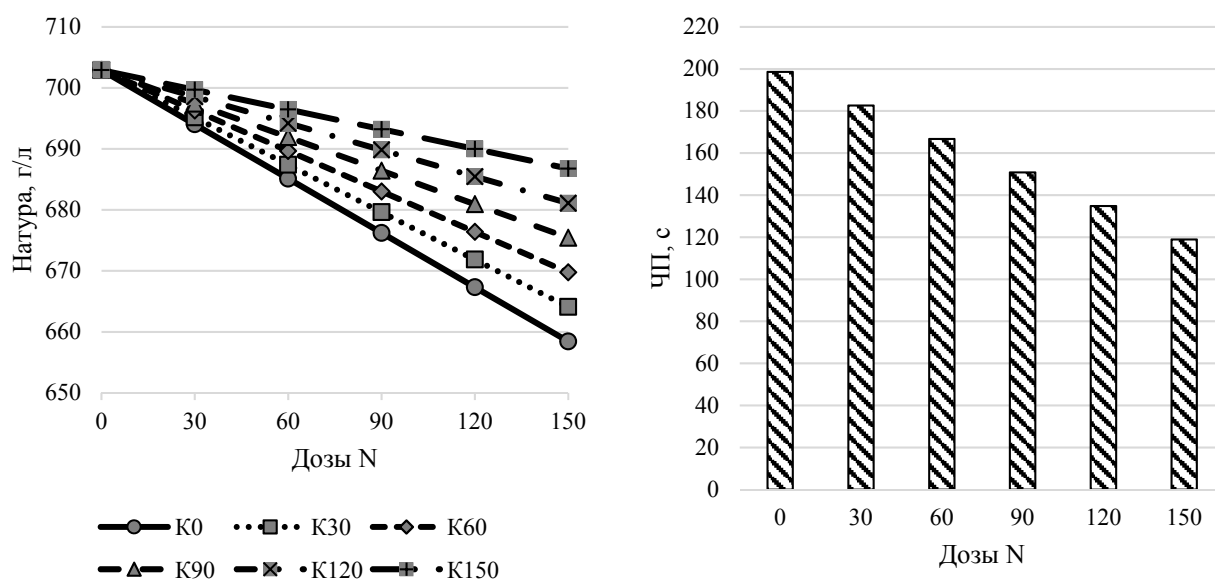


Рисунок 5 – Влияние азотных и калийных удобрений на натуру и «Число падения» зерна озимой ржи (расчётные данные)

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 (формулы 13, 14). Действием удобрений можно объяснить 61 % изменения содержания сырого белка по опыту и 71 % изменения содержания

зольных веществ. 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. Регрессионное уравнение, описывающее содержание суммы критических аминокислот (СКА), имело схожий вид с уравнением, описывающим содержание сырого белка в зерне (формула 15). Прогнозная точность всех уравнений хорошая.

$$\text{Сырой белок} = 11,62 - 0,360 \times P^{0,5} + 0,265 \times NP^{0,5} (R^2=0,61; \varepsilon=1,4 \%) \quad (13)$$

$$\text{Зола} = 0,97 + 0,009 \times P^2 + 0,008 \times K^2 - 0,013 \times PK (R^2=0,71; \varepsilon=2,4 \%) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{СКА} = 8,63 - 0,216 \times P - 0,214 \times K^{0,5} + 0,167 \times NP^{0,5} + \\ + 0,179 \times PK^{0,5} (R^2=0,76; \varepsilon=1,0 \%) \end{aligned} \quad (15)$$

Анализ линейной корреляционной связи показателей качества с агрохимическими показателями, урожайностью зерна и зелёной массы озимой ржи показал следующие результаты:

1. Обратная связь между натурой зерна и ЧП с 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 ЧП 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.

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

4. Содержание белка имеет обратную связь слабой и средней силы с натурой зерна и ЧП (-0,47 и -0,62).

5. Между натурой зерна и ЧП отмечена прямая сильная связь (0,71).

6 Содержание основных элементов питания в растениях озимой ржи

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 по градации В.В. Церлинг (1990). Содержание фосфора и калия в зелёной массе в фазу выхода в трубку изменяется по вариантам опыта в диапазонах 0,80-1,11 и 5,22-6,99 %, соответственно, его можно оценить как избыточное. В фазу колошения содержание NPK в растениях изменялось в следующих диапазонах: азот 1,60-2,23 %, фосфор 0,36-0,54 %, калий 2,32-3,78 %. 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 избыточное для калия (за исключением варианта $N_{90}P_{90}$). По результатам корреляционно-регрессионного анализа установлено, что влияние на накопление NPK в растениях оказывают все изучаемые виды удобрений, однако основная роль принадлежит соответствующим элементам удобрений.

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. К фазе колошения за счёт более резкого снижения концентрации фосфора и калия, чем азота, было получено оптимальное или близкое к оптимальному соотношению элементов. Соотношение P/K в обе фазы развития было оптимальным.

При расчёте коэффициентов линейной корреляции между показателями, приведёнными в работе, и содержанием, а также соотношением, элементов питания были установлены следующие достоверные связи, которые достойны внимания:

1. Между содержанием азота в фазу выхода в трубку и урожайностью зелёной массы в обе фазы отбора связь прямая умеренная ($r=0,41$ и $0,48$). Ввиду отсутствия корреляционной связи с урожайностью зерна, можно предположить, что на ранних этапах развития озимой ржи содержание азота в некоторой степени определяло величину будущей урожайности, однако в более поздние фазы развития сильное влияние оказали погодные условия.

2. Соотношение P/K 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 P/K в фазу выхода в трубку и урожайностью (зерна и надземной массы по обоим 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 сильное 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.

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.

7 Экономическая и энергетическая эффективность применения различных доз и соотношений минеральных удобрений

Наибольшая рентабельность производства и коэффициент энергетической эффективности в опыте получен при возделывании озимой ржи без применения удобрений. Среди расчётных доз удобрений, высокую рентабельность показали варианты с применением N_{30} , N_{60} и $N_{30}K_{30}$ (62, 54 и 52 % соответственно), которая тем не менее была ниже варианта без удобрений (64 %). В то же время, прибыль при использовании указанных доз удобрений повысилась на 610-1630 руб./га (7,6-20,5 %) относительно варианта без применения удобрений. Коэффициент энергетической эффективности для вариантов с применением N_{30} и $N_{30}K_{30}$, полученных расчётным путём, увеличивался относительно контроля на 0,07 и 0,06 соответственно.

Заключение

На основании всех проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Показатель $pH_{КС}$ снизился за 40 лет в варианте без применения удобрений на 0,4, в среднем по вариантам с применением удобрений на 0,6. Математические 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 Фаленская 4 получена в варианте N₉₀ (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 N₃₀: 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 N30, N60 и N30K30 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.

Рекомендации 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 опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Завьялова, Н. Е. Влияние минерального питания на урожайность и качество зерна озимой ржи в условиях Предуралья / Н. Е. Завьялова, Д. Г. **Шишков**, О. В. Иванова // Плодородие. – 2020. – № 2(113). – С. 23-26.

2. **Шишков**, Д. Г. Влияние различных доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность озимой ржи в Среднем Предуралье / Д. Г. **Шишков**, В. Р. Олехов, М. Т. Васбиева // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2023. – Т. 24, № 3. – С. 399-408.

3. **Шишков**, Д. Г. Накопление основных элементов питания в надземной массе озимой ржи сорта Фалёнская 4 в условиях длительного стационарного опыта / Д. Г. **Шишков**, В. Р. Олехов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 7. – С. 49-55.

Статьи в журналах, тематических сборниках и материалах конференций

1. **Шишков, Д. Г.** Влияние длительного применения минеральных удобрений на формирование зеленой массы растений озимой ржи в условиях вегетационного периода 2021 г / **Д. Г. Шишков**, В. Р. Олехов // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, 15 ноября 2021 года, г. Чебоксары – Чебоксары: Чувашский ГАУ, 2021. – С. 253-259.

2. **Шишков, Д. Г.** Экономическая эффективность возделывания озимой ржи на фоне длительного применения удобрений / **Д. Г. Шишков** // Молодёжная наука – 2023: технологии и инновации : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов, 10–14 апреля 2023 года, г. Пермь. В 3 т. – Пермь: От и До, 2023. Т. 1. – С. 413-416.

3. **Шишков, Д. Г.** Показатели качества зерна озимой ржи сорта Фаленская 4 при применении различных доз и соотношений минеральных удобрений / **Д. Г. Шишков**, В. Р. Олехов, Д. Р. Сафиуллина // Агротехнологии XXI века : Стратегии развития, технологии, инновации : Материалы Международной конференции, 11-15 ноября 2024 года, г. Пермь. – Пермь: От и До, 2024. – С. 309-313.

4. **Шишков, Д. Г.** Биохимический состав зерна озимой ржи при длительном применении различных доз и соотношений минеральных удобрений / **Д. Г. Шишков**, В. Р. Олехов, Д. Р. Сафиуллина // Современное состояние и стратегия развития Географической сети опытов с удобрениями : Материалы Международной научной конференции, 28-29 ноября 2024 года, г. Москва. – Москва : ВНИИА, 2024. – С. 270-279.