

На правах рукописи

Волкова Марина Алексеевна

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОГО КАРБАМИДА ПРИ
ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ЕГО ТРАНСФОРМАЦИЯ В
ПОЧВЕ**

Специальность: 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин
растений

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре агрономической, биологической химии и радиологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

Научный руководитель **Лапушкин Всеволод Михайлович**, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры агрономической, биологической химии и радиологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Никитин Сергей Николаевич**, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.С. Немцева – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук
Пасынкова Елена Николаевна, доктор биологических наук, директор Ленинградского научно-исследовательского института сельского хозяйства «Белогорка» – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»

Защита диссертации состоится 08 сентября 2026 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 35.2.030.05 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-21-84

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент



И.М. Митюшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном агропроизводстве основным способом повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и сохранения плодородия земель является увеличение норм внесения минеральных удобрений. Однако недостаточное развитие технологий рационального применения удобрений приводит не только к снижению их эффективности, но иногда и к усилению негативного воздействия на экологическое состояние окружающей среды (Кирюшин, 2016).

Особенно остро стоит вопрос повышения эффективности азотсодержащих минеральных удобрений. Азотные удобрения занимают преобладающую долю в структуре мирового потребления минеральных удобрений, так как азот по-прежнему остается наиболее недостающим элементом питания, лимитирующим урожаи и производство сельскохозяйственной продукции (Завалин, 2022; IFA Market Intelligence Service, 2021; Cross, Gruère, 2022; Алферов и др., 2023; Никитин, 2024; Лапушкин и др., 2023-2025). Коэффициент использования азота из традиционных азотных удобрений в среднем составляет всего 40% от внесенного количества (Сабилов и др., 2015; Цыбулько, 2018; Завалин, Соколов, 2019; Завалин, 2022). Значительная доля вносимого в почву азота подвергается биологической трансформации с последующей миграцией в окружающую среду в виде газообразных продуктов или нитратной формы, которая в почве очень подвижна. Совокупные непроизводительные потери азота удобрений в результате процессов аммонификации, нитрификации и денитрификации в среднем составляют 30-50% (Гамзиков, 2013; Шеуджен и др., 2013а; Сабилов и др., 2015; Завалин, 2022; Волкова, Лапушкин, 2023, 2024а,б, 2025; Волкова, 2023, 2024, 2025а,б).

Одним из приемов, направленным на снижение потерь азота из удобрений, является разработка и применение азотных удобрений пролонгированного действия. Среди пролонгированных удобрений наибольшей популярностью пользуются капсулированные и стабилизированные формы карбамида (мочевины).

Однако доступность данных продуктов как на российском, так и на мировом рынках остается крайне ограниченной. Основными факторами, сдерживающими распространение удобрений пролонгированного действия, являются высокая стоимость некоторых сырьевых компонентов, сложность их технологии, а также потенциальная экологическая опасность ряда материалов и химических веществ, используемых при их изготовлении (Лапушкин и др., 2023, 2024; Shaviv, 2001; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021). В связи с этим разработка и исследование новых технологичных, экономически эффективных и экологически безопасных форм удобрений пролонгированного действия является актуальным направлением.

Степень разработанности темы. Исследованию различных форм карбамида (мочевины) пролонгированного действия посвящены работы многих авторов: Лаврова И.А.; Филисюк Г.Н.; Козел Е.Г.; Барабанщикова Л.Н., Баранова Л.А.; Смирнов П.М.; Шаляпин В.В.; Шеуджен А.Х.; Каплунова Л.С.; Li Q.; Gil-

Ortiz R.; Versino F.; Babar S.K. и другие. Несмотря на обилие работ, посвященных изучению пролонгированных форм мочевины, ассортимент коммерчески и практически значимых модификаций остается ограниченным. Это дает повод к дальнейшему поиску, исследованию и внедрению эффективных и экономически рентабельных форм пролонгированных удобрений.

Цель исследования. Изучить влияние новой формы капсулированного карбамида на урожай и качество яровой пшеницы и сравнить ее эффективность с обычным и стабилизированным карбамидом.

Задачи исследования:

1. Оценить влияние капсулированного монокальцийфосфатом, а также стабилизированного ингибиторами нитрификации и уреазы карбамида на формирование урожая и качества зерна яровой пшеницы в условиях вегетационных и мелкоделяночных полевых опытов;

2. Изучить влияние капсулированного и стабилизированного карбамида на динамику поглощения растениями элементов питания, вынос питательных веществ урожаем и коэффициенты использования азота удобрений;

3. Определить экономическую эффективность применения изучаемых форм карбамида пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы;

4. Исследовать динамику превращения азотных удобрений в почве и влияние их модификации на размеры эмиссии закиси азота в условиях модельных лабораторных опытов.

Научная новизна работы. Впервые установлено, что новая капсулированная форма карбамида с покрытием на основе монокальцийфосфата по сравнению с обычным карбамидом стабильно увеличивает урожай яровой пшеницы как в условиях вегетационных, так и в полевых опытах на 6-7% и на 8-14%, соответственно. Показано, что покрытие на основе монокальцийфосфата повышает коэффициент использования азота на 14-17%, а стабилизаторы азота – на 13-19% по сравнению с обычной мочевиной. Установлено, что капсулированный карбамид с толщиной покрытия 50 мкм в агрономическом и экономическом отношении является наиболее эффективной формой удобрения.

Впервые в условиях модельных лабораторных опытов на дерново-подзолистой и каштановой почвах изучена динамика трансформации азота модифицированных форм карбамида. Показано, что стабилизированные формы наиболее эффективно замедляют процессы трансформации амидного азота мочевины. Установлено, что на дерново-подзолистой почве покрытие снижает интенсивность аммонификации на 13-75% в течение первых 3-х суток, нитрификации – на 17-62 % с 14-х по 35-е сутки и денитрификации – на 15-48% в течение 35 суток. На каштановой почве через 35 суток после внесения капсулированного карбамида содержание минерального азота было выше на 15-18% по сравнению с обычной формой удобрения, а эмиссия закиси азота снижалась на 7-60% в течение первых 7-ми суток опыта.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследований могут быть использованы для разработки новых форм

азотсодержащих минеральных удобрений повышенной эффективности с замедленным и регулируемым высвобождением элементов питания.

Методология и методы исследования. Исследования проведены в условиях вегетационных, полевых мелкоделяночных и модельно-лабораторных опытов. Определение агрохимических показателей почв, содержания макроэлементов в растительном материале, качественных характеристик урожая пшеницы, интенсивности аммонификации, нитрификации, эмиссии закиси азота проводили в соответствии с действующими ГОСТами, методическими указаниями и другими утвержденными методиками, обеспечивающими необходимую точность и достоверность результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Повышение урожайности и качества зерна яровой пшеницы при применении капсулированного и стабилизированного карбамида.
2. Увеличение хозяйственного выноса питательных веществ урожаем яровой пшеницы и повышение коэффициента использования азота капсулированного и стабилизированного карбамида.
3. Капсулированный карбамид не уступает стабилизированным формам по агрономической и экономической эффективности.
4. Снижение интенсивности процессов аммонификации, нитрификации и денитрификации азота карбамида с покрытием на основе монокальцийфосфата, и карбамида, стабилизированного ингибиторами уреазы и нитрификации, на дерново-подзолистой и каштановой почве.

Степень достоверности результатов. Исследования проведены в условиях вегетационных (2022-2023 гг.), полевых мелкоделяночных (2023-2024 гг.), модельно-лабораторных опытов (2023-2025 гг.) с соблюдением требований, в установленных методиках. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с общепринятыми методами в математической статистике посредством программы MS Excel 2021, что подтверждает достоверность выявленных закономерностей (при уровне значимости $p \leq 0,05$).

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертации подтверждены в ходе обсуждения на научных конференциях, конкурсах и в публикациях в рецензируемых научных журналах.

Результаты научных исследований доложены на: 56-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием молодых ученых, специалистов-агрохимиков и экологов, посвященной 150-летию со дня рождения академика Константина Каэтановича Гедройца (ВНИИА), Москва, 28 ноября 2022 года; 57-й Всероссийской конференции с международным участием молодых учёных, специалистов-агрохимиков и экологов (к 300-летию Российской академии наук и 220-летию со дня рождения Юстуса фон Либиха), Москва, 29 ноября 2023 г.; Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича, Москва, 03–05 июня 2024 г.; Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии, г. Москва, 2-4 июня 2025 г; 59-й Всероссийской конференции с

международным участием молодых учёных, специалистов-агрохимиков и агроэкологов «Из прошлого в будущее: идеи Д.Н. Прянишникова и современная агрохимическая наука» посвященная 160-летию со дня рождения Дмитрия Николаевича Прянишникова, Москва, 17 декабря 2025 г.; XXII Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организаций России в номинации «Агрономия», 2025 г. (по результатам конкурса работа заняла первое место).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 научные работы в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 1 работа входящая в международные базы данных WoS и Scopus.

Личный вклад автора. Диссертационное исследование было проведено в рамках обучения автора в аспирантуре ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с 2022 по 2026 гг. Автор принимал личное участие в планировании, закладке, проведении вегетационных, полевых и лабораторных опытов. Анализ научной литературы, статистическая обработка результатов, их интерпретация, формулировка выводов осуществлены автором самостоятельно. Публикации по теме диссертации подготовлены при участии научного руководителя исключительно в части обсуждения и редактирования.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 170 страницах компьютерного текста и состоит из введения, трех глав основной части (обзор литературы, объекты и методы исследования, экспериментальная часть), заключения и списка литературы. Работа содержит 34 таблицы и 15 рисунков. Список использованных источников литературы включает 292 наименований, в том числе 128 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы.

В первой главе описаны хозяйственное значение яровой пшеницы и роль азотного режима питания в формировании ее урожая и качества. Рассмотрены основные проблемы потерь азота из почвы и удобрений. Проведен обзор литературы по основным формам удобрений пролонгированного действия. Рассмотрены механизм действия, модификации и эффективность, достоинства и недостатки разных групп удобрений пролонгированного действия.

Глава 2. Объекты и методы исследования.

Объекты исследования: 1. Стандартная и модифицированные формы карбамида (стандартная форма карбамида (вариант сравнения) – далее Nm, содержание N – 46%; капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 50 мкм (разработчик и производитель АО «НИУИФ») – Nm +МКФ 50 мкм, содержание N – 38%, P₂O₅ – 10%; капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 100 мкм (разработчик и производитель АО «НИУИФ») – Nm +МКФ 100 мкм, содержание N – 31%, P₂O₅ – 18%; карбамид с ингибитором уреазы Limus (производитель BASF) – Nm + инг. ур., содержание N – 46%; карбамид с ингибитором нитрификации Vibelsol

(производитель BASF) – Nм + инг. нитр., содержание N – 46%; карбамид с ингибитором уреазы Limus и ингибитором нитрификации Vibelsol, содержание N – 46%). 2. Яровая пшеница сорта Любава.

Вегетационные опыты проводили в вегетационном домике на кафедре агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МХСА имени К.А. Тимирязева в 2022-2023 гг. Растения выращивали в сосудах Митчерлиха с массой абсолютно сухой почвы 5 кг. Для набивки сосудов использовали пахотный горизонт дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, отобранной на территории дендрологического сада имени Р. И. Шредера., агрохимическая характеристика которой в среднем за 2022-2023 гг. после известкования представлена следующими показателями: гумус (по ГОСТ 26213) – 3,68%; $pH_{\text{сол.}}$ (ГОСТ 26483) – 5,46; Нг (ГОСТ 26212) – 1,77 мг-экв/100 г почвы; S (ГОСТ 27821) – 15,9 мг-экв/100 г почвы; V – 90%, содержание обменного фосфора (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 47 мг/кг, обменного калия (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 165 мг/кг.

Схема опыта включала в себя 7 вариантов: 1. РК-фон (Ф); 2. Ф + Nм (вариант сравнения); 3. Ф + Nм +МКФ 50 мкм; 4. Ф + Nм +МКФ 100 мкм; 5. Ф + Nм + инг. ур.; 6. Ф + Nм + инг. нитр.; 7. Ф + Nм + инг. ур.+нитр.

Повторность опыта четырехкратная. Дозы вносимых удобрений в вегетационном опыте устанавливались в соответствии с рекомендациями Журбицкого З.И. (1968) для зерновых культур из расчета N – 150 мг, P_2O_5 – 100 мг, K_2O – 100 мг д.в./кг почвы. В качестве источника фосфора и калия были выбраны двуводный монокальцийфосфат и хлорид калия. При расчете доз удобрений учитывалось снижение содержания азота в капсулированных удобрениях и содержание фосфора в нанесенных покрытиях. Содержание фосфора выравнивалось добавлением двуводного монокальцийфосфата и было одинаковым во всех вариантах.

Обработку навесок карбамида препаратами-ингибиторами проводили в день закладки опыта перед внесением и заделкой удобрений в почву. Дозы ингибиторов соответствовали предельным уровням, установленным постановлением ЕС № 2003/2003: ингибитор уреазы – 0,3% от общего содержания вносимого азота, ингибитор нитрификации – 1,6% от общего содержания вносимого азота.

В сосуды высевали по 30 зерен пшеницы. Перед уборкой урожая в каждом сосуде оставляли по 20 растений.

Мелкоделяночные полевые опыты проводили в 2023-2024 гг. на территории опытного поля РГАУ-МХСА имени К.А. Тимирязева. Агрохимическая характеристика почвы за 2023-2024 гг. представлена следующими показателями: гумус (по ГОСТ 26213) – 2,72%; $pH_{\text{сол.}}$ (ГОСТ 26483) – 5,56; Нг (ГОСТ 26212) – 2,05 мг-экв/100 г почвы; S (ГОСТ 27821) – 12,6 мг-экв/100 г почвы; V – 86%, содержание обменного фосфора (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 271 мг/кг, обменного калия (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 113 мг/кг.

Схема опыта включала в себя 6 вариантов: 1. РК-фон (Ф); 2. Ф + Nм (вариант сравнения); 3. Ф + Nм +МКФ 50 мкм; 4. Ф + Nм +МКФ 100 мкм; 5. Ф +Nм + инг. ур.; 6. Ф +Nм + инг. нитр.

Повторность опыта – пятикратная. Учетная площадь делянки составляла 1 м², общая площадь делянки – 1,96 м². Расположение делянок – многорядное ступенчатое.

Перед посевом в почву вручную вносили и заделывали удобрения из расчета N₉₀P₅₂K₉₀ на гектар. В качестве калийного и фосфорного удобрения применяли 60% KCl и чистый Ca(H₂PO₄)₂ • 2H₂O. Дозу и навески фосфорного удобрения устанавливали исходя из максимального содержания фосфора в капсулированной форме карбамида. Обработку навесок карбамида препаратами-ингибиторами проводили в день закладки опыта, непосредственно перед внесением и заделкой удобрений в почву, в нормах, регламентированных ЕС №2003/2003.

Посев пшеницы осуществляли с помощью 7-ми рядковой сеялки из расчета нормы высева семян 5,0 млн./га.

В периоды наступления основных фенологических фаз развития пшеницы в вегетационных и полевых опытах отбирали растительные образцы для проведения листовой диагностики минерального питания.

В течение вегетационных и полевых опытов велись фитосанитарные наблюдения за посевами пшеницы. При обнаружении сорняков, вредителей или болезней принимались меры борьбы с помощью химических средств защиты растений согласно регламентам их применения.

Уборку урожая яровой пшеницы проводили при достижении зерном восковой или полной спелости. Определяющим фактором в сроках уборки урожая были погодные условия. При анализе урожайных данных учитывались следующие показатели: высота растения, длина колоса, масса колоса, количество зерен в колосе, масса зерна с колоса, масса соломы, масса 1000 зерен, отношение соломы к зерну, коэффициент хозяйственной эффективности.

В растительном материале после мокрого озоления по Кьельдалю определяли содержание азота (ГОСТ 13496.4), фосфора (ГОСТ 26657, колориметрически) и калия (ГОСТ 30504, пламенно-фотометрически). Содержание белка в зерне определяли по ГОСТ 10846 (коэффициент пересчета 5,7), клейковину – методом ближней инфракрасной спектроскопии.

Метеорологические условия 2022-2024 гг. отличались от среднепогодных. Сезон 2022-го г. характеризовался повышенными температурами и дефицитом влаги в августе, что способствовало ускорению созревания пшеницы, гидротермический коэффициент (ГТК) за период вегетации составил 1,3. В 2023 г. температурный режим был близок к норме, но избыток осадков в июле способствовал развитию мучнистой росы, ГТК = 1,6. 2024 год характеризовался наиболее теплыми и влажными условиями (ГТК = 1,7), что также требовало дополнительных мер по борьбе с развитием мучнистой росы в посевах.

Модельные лабораторные опыты были проведены в лабораторных условиях кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева на дерново-подзолистой и каштановой почве.

Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой почвы: гумус (по ГОСТ 26213) – 3,35%; рН_{сол.} (ГОСТ 26483) – 5,50; Нг (ГОСТ 26212) – 3,33 мг-

экв/100 г почвы; S (ГОСТ 27821) – 11,1 мг-экв/100 г почвы; V – 77%, содержание обменного фосфора (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 124 мг/кг, обменного калия (ГОСТ 54650, метод Кирсанова) – 189 мг/кг, аммонийного азота (по ГОСТ 26489) – 1 мг/кг, нитратного азота (спектрофотометрически) – 50 мг/кг.

Агрохимическая характеристика каштановой почвы: гумус (по ГОСТ 26213) – 2,41%; $pH_{водн.}$ (ГОСТ 26423) – 7,70; Нг (ГОСТ 26212) – 0 мг-экв/100 г почвы; S (ГОСТ 27821) – 27,2 мг-экв/100 г почвы; V – 100%, содержание обменного фосфора (ГОСТ 26205, метод Мачигина) – 23 мг/кг, обменного калия (ГОСТ 26205, метод Мачигина) – 379 мг/кг, аммонийного азота (по ГОСТ 26489) – 3 мг/кг, нитратного азота (спектрофотометрически) – 87 мг/кг.

Схема модельных лабораторных опытов включала в себя 6 вариантов: 1. Контроль (без удобрений); 2. Nm (вариант сравнения); 3. Nm + МКФ 50 мкм; 4. Nm + МКФ 100 мкм; 5. Nm + инг. ур.; 6. Nm + инг. нитр.

Модельный опыт по оценке минерализации азота пролонгированных форм карбамида проводили согласно методическим указаниям (Самохвалов и др., 1984, 1993). В стаканы объемом 100 см³ помещали 20 г почвы, вносили навеску удобрения, содержащую около 5 мг азота, и компостировали при 20°C в течение 35 суток. Отбор образцов для определения аммонийного, нитритного и нитратного азота проводили на 1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28 и 35-е сутки. Опыт закладывали в трехкратной повторности для каждого срока наблюдения, общая повторность опыта 27-кратная.

Для изучения денитрификации в сосуды объемом 75 см³ помещали 20 г почвы и навеску удобрения с 5 мг азота. Почву увлажняли до 60% капиллярной влагоемкости и компостировали при 25°C в аэробных условиях. Через 7-14 суток (в зависимости от типа почвы) вносили 3 см³ 2%-ного раствора декстрозы, сосуды герметично закрывали и вводили 8 см³ ацетилена для блокировки редукции закиси азота (N₂O). Концентрацию N₂O определяли методом газовой хроматографии через 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 и 35 суток после предварительной инкубации. Опыт проводили в трехкратной повторности.

Все результаты приводили к эквивалентной дозе внесенного азота – 200 мг/кг.

Статистическую обработку данных вегетационных, полевых и лабораторных опытов проводили методом однофакторного дисперсионного анализа с расчетом наименьшей существенной разности (НСР₀₅) и доверительных интервалов (95%). Расчеты выполняли с использованием программы Microsoft Excel 2021.

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1 Влияние разных форм карбамида пролонгированного действия на продуктивность и качество яровой пшеницы

3.1.1 Динамика потребления азота яровой пшеницей в зависимости от формы карбамида пролонгированного действия

В вегетационных (2022-2023 гг.) и полевых (2023-2024 гг.) опытах в основные фазы развития пшеницы отбирали растительные образцы для изучения потребления азота.

Все модификации карбамида обеспечили растения азотом на протяжении всего периода интенсивного поглощения – от выхода в трубку до колошения. Максимум поглощения в вегетационном опыте пришелся на фазу выхода в трубку. Наибольшее количество азота (31 мг N/растение) усваивалось растениями в вариантах «Nм», «Nм + МКФ 100 мкм» и «Nм + инг. ур.+ нитр.» (рис 1 а).

В остальных вариантах с азотными удобрениями величина поглощенного растениями азота составила 27-29 мг N/растение, минимум (27 мг N/растение) – у карбамида с ингибитором нитрификации. К фазе колошение-цветение в вариантах с капсулированными формами карбамида растения поглощали на 1-6 мг азота больше, чем на обычной мочевины (25 мг N/растение), в вариантах со стабилизированными формами – на 1-4 мг (рис. 1а).

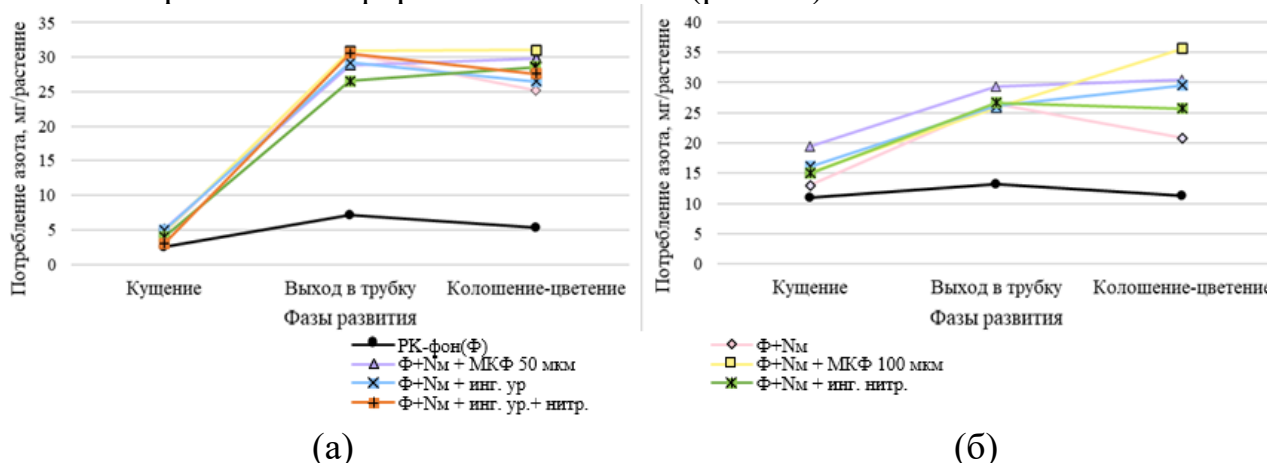


Рисунок 1 – Динамика потребления азота яровой пшеницей в зависимости от формы карбамида (а – вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.; б – полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.)

В полевых исследованиях модифицированные формы также обеспечивали сбалансированное азотное питание, подтвердив тенденции, выявленные в вегетационных опытах (рис. 1б).

Традиционный карбамид отличался ранним пиком поглощения со снижением к фазе колошения-цветения, тогда как модифицированные формы обеспечили более равномерное и пролонгированное поступление с максимумом в период колошения-цветения. В фазу трубкования максимальное поглощение азота растениями (29 мг N/растение) было отмечено в варианте с капсулированным карбамидом с покрытием 50 мкм. В вариантах с внесением мочевины с покрытием 100 мкм и мочевины с ингибитором уреазы растения поглощали 26 мг N/растение. К фазе колошения-цветения потребление азота в вариантах с модифицированными формами составило 26-36 мг N/растение, что на 24-71% выше, чем у традиционного карбамида (21 мг N/растение). Наибольшая интенсивность поглощения азота (36 мг/растение) отмечена у варианта «Nм + МКФ 100 мкм» (рис. 1б).

Результаты подтверждают, что модифицированные формы карбамида, особенно капсулированные с покрытием на основе монокальцийфосфата, обеспечивают продолжительное азотное питание в фазы максимального потребления, что положительно сказывается на урожайности и качестве продукции.

3.1.2 Формирование урожая яровой пшеницы при использовании разных форм карбамида пролонгированного действия

Данные вегетационных и полевых исследований демонстрируют, что применение пролонгированных форм карбамида обеспечивает комплексный положительный эффект на формирование урожая яровой пшеницы.

Согласно данным таблицы 1 в вегетационных опытах все формы азотных удобрений обеспечили достоверную прибавку урожая по сравнению с фоном «РК».

Таблица 1 – Прибавки урожая яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Урожай, г/сосуд	Прибавка к контролю		Прибавка к варианту сравнения	
		г/сосуд	%	г/сосуд	%
2022 г.					
РК-фон (Ф)	11,2	-	-	-	-
Ф + Nм (вар. срав.)	25,7	14,5	129	-	-
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	27,4	16,2	145	1,8	7
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	27,8	16,6	148	2,1	8
Ф + Nм + инг. ур	28,8	17,6	157	3,1	12
Ф + Nм + инг. нитр.	28,4	17,2	153	2,8	11
Ф + Nм + инг. ур.+ нитр.	25,7	14,5	130	0,1	0
НСР 05	1,7	-	-	-	-
2023 г.					
РК-фон (Ф)	6,7				
Ф + Nм (вар. срав.)	19,0	12,4	185	-	-
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	20,5	13,8	207	1,5	8
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	19,7	13,0	195	0,7	3
Ф + Nм + инг. ур	18,4	11,7	175	-0,7	-4
Ф + Nм + инг. нитр.	18,0	11,3	169	-1,1	-6
Ф + Nм + инг. ур.+ нитр.	18,7	12,0	180	-0,4	-2
НСР 05	1,0	-	-	-	-
Среднее за 2 года					
РК-фон (Ф)	8,9	-	-	-	-
Ф + Nм (вар. срав.)	22,4	13,4	150	-	-
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	24,0	15,0	168	1,6	7
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	23,7	14,8	166	1,4	6
Ф + Nм + инг. ур	23,6	14,6	164	1,2	5
Ф + Nм + инг. нитр.	23,2	14,3	159	0,8	4
Ф + Nм + инг. ур.+ нитр.	22,2	13,3	148	-0,2	-1
НСР 05	1,2	-	-	-	-

В среднем за два года все формы азотных удобрений существенно повысили урожай зерна яровой пшеницы по сравнению с фоном. Традиционный карбамид повысил урожай на 13,4 г/сосуд (150%), модифицированные формы – на 13,3-15,0 г/сосуд (148-168%). Наиболее высокие средние показатели урожайности (23,2-24,0 г/сосуд) были получены в вариантах «Nм + МКФ 50 мкм», «Nм + МКФ 100 мкм», «Nм + инг. ур.», «Nм + инг. нитр.» (табл. 1).

В среднем за два года вегетационных опытов максимальный урожай зерна (24,0 г/сосуд) был получен в варианте «Nм + МКФ 50 мкм», что превысило на

1,6 г/сосуд или 7% урожай, полученный в варианте с внесением стандартной формы карбамида. Прибавка урожая зерна в данном варианте опыта была статистически достоверная при $НСР_{05} = 1,2$ г/сосуд. Капсулированный карбамид с покрытием 100 мкм и форма с ингибитором уреазы также обеспечили достоверные прибавки по сравнению с традиционным карбамидом – 1,4 г/сосуд (6%) и 1,2 г/сосуд (5%), соответственно (табл. 1).

Карбамид с ингибитором нитрификации обеспечил достоверную прибавку к фону (14,3 г/сосуд или 159%), однако превышение над обычным карбамидом (0,8 г/сосуд, 4%) не было статистически достоверным. Форма карбамида с комбинацией двух ингибиторов в среднем не показала достоверной прибавки к традиционному карбамиду (-1%), а ее эффективность была нестабильной по годам, что может указывать на избыточное торможение трансформации азота в почве. В более благоприятном 2022 году наибольшая прибавка урожая была отмечена в варианте с внесением карбамида с ингибитором уреазы (12% к «Nм»), в то время как в 2023 году наилучшие результаты показали капсулированные формы – 3-8% к «Nм» (табл. 1).

В полевых опытах все модифицированные формы карбамида в среднем за два года обеспечили получение существенных прибавок урожая в сравнении как с фоновым вариантом, так и с обычным карбамидом (табл.2).

Таблица 2 – Прибавки урожая яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Урожай, г/м ²	Прибавка к контролю		Прибавка к варианту сравнения	
		г/м ²	%	г/м ²	%
1	2	3	4	5	6
2023 г.					
РК-фон (Ф)	375	-	-	-	-
Ф + Nм (вар. срав.)	510	135	36		
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	581	206	55	71	14
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	568	193	51	57	11
Ф + Nм + инг. ур	618	243	65	108	21
Ф + Nм + инг. нитр.	601	226	60	91	18
НСР₀₅	64	-	-	-	-
2024 г.					
РК-фон (Ф)	391				
Ф + Nм (вар. срав.)	552	161	41		
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	627	236	60	76	14
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	583	192	49	32	6
Ф + Nм + инг. ур	500	109	28	-52	-9
Ф + Nм + инг. нитр.	544	153	39	-7	-1
НСР₀₅	34	-	-	-	-

Таблица 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
Среднее					
РК-фон (Ф)	383				
Ф + N _м (вар. срав.)	531	148	39		
Ф + N _м + МКФ 50 мкм	604	221	58	73	14
Ф + N _м + МКФ 100 мкм	575	192	50	44	8
Ф + N _м + инг. ур	559	176	46	28	5
Ф + N _м + инг. нитр.	573	190	50	42	8
НСР₀₅	40	-	-	-	-

В среднем за два года традиционный карбамид обеспечил урожай 531 г/м² и прибавку к фону «РК» 39%. Модифицированные формы превзошли этот результат, обеспечив прибавку к фону на уровне 46-58%. Прибавки от капсулированных форм и карбамида с ингибитором нитрификации были существенно выше, чем от традиционной формы карбамида (табл.2).

Наибольшая среднегодовая урожайность (604 г/м²) и максимальная прибавка к традиционному карбамиду (73 г/м² или 14%) получены при применении капсулированного карбамида с покрытием 50 мкм. Капсулированный карбамид с покрытием 100 мкм и карбамид с ингибитором нитрификации также обеспечили достоверные прибавки 42-44 г/м² относительно обычного карбамида (при НСР₀₅=40 г/м²) (табл. 2).

Эффективность ингибиторов варьировала по годам. Ингибитор нитрификации во влажный 2024 год не показал преимущества перед традиционным карбамидом. Ингибитор уреазы в 2023 году обеспечил максимальную прибавку (108 г/м² или 21% к «N_м»), но в 2024 году уступил традиционной форме (урожайность ниже на 52 г/м² или 9%) (табл.2). Это подтверждает, что эффективность стабилизаторов азота существенно зависит от условий среды, что характерно для всех медленнодействующих азотных удобрений (Shaviv, 2000; Trenkel, 2010; Lakshani et al., 2023; Govil et al., 2024; Priya et al., 2024).

3.1.3 Вынос элементов питания урожаем яровой пшеницы и коэффициенты использования азота удобрений

В вегетационном опыте в среднем за два года наибольшим поглощением элементов питания отличались растения, выращиваемые в вариантах «N_м + МКФ 50 мкм», «N_м + МКФ 100 мкм» и «N_м + инг. ур.+ нитр.». Максимальный вынос азота пшеницей отмечен в варианте с мочевиной с покрытием 100 мкм – 703 мг/сосуд, что на 18% выше, чем в варианте с внесением традиционного карбамида. В вариантах «N_м + инг. ур.+ нитр.» и «N_м + МКФ 50 мкм» вынос азота растениями составил 691-699 мг/сосуд, что на 16-17% выше, чем в варианте сравнения «N_м». Максимальный вынос фосфора установлен в вариантах «N_м + МКФ 50 мкм» (237 мг/сосуд) и «N_м + инг. ур.+ нитр.» (244 мг/сосуд), что на 19-23% выше в варианте с применением обычного карбамида (199 мг/сосуд). Наибольший вынос калия отмечен в варианте с внесением мочевины с ингибитором уреазы – 525 мг/сосуд (448 мг/сосуд в варианте с обычным карбамидом); в вариантах с капсулированными формами и с мочевиной,

обработанной с двумя ингибиторами, вынос калия был также заметно выше (на 10-12%), чем в варианте сравнения «Nм» (табл. 3).

Таблица 3 – Хозяйственный вынос NPK и коэффициенты использования азота урожаем яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида

Вариант	Вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.				Полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.			
	Хозяйственный вынос, мг/сосуд			КИ _N , %	Хозяйственный вынос, г/м ²			КИ _N , %
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
РК-фон (Ф)	177	104	216	-	9,0	4,4	6,0	-
Ф + Nм (вар. срав.)	596	199	448	56	14,3	7,0	9,8	59
Ф + Nм + МКФ 50 мкм	699	237	494	70	15,9	7,6	12,3	76
Ф + Nм + МКФ 100 мкм	703	227	500	70	15,6	8,0	12,0	73
Ф + Nм + инг. ур	657	206	525	64	15,5	7,6	11,0	72
Ф + Nм + инг. нитр.	663	229	471	65	16,1	7,9	10,2	78
Ф + Nм + инг. ур.+ нитр.	691	244	495	69	-	-	-	-

Коэффициент использования азота (КИ_N) для обычного карбамида составил 56%. Все модифицированные формы повысили этот показатель. При применении капсулированных форм был установлен наибольший КИ_N, который составил 70%, что на 14% выше по сравнению с традиционным карбамидом. Это свидетельствует о сокращении потерь азота и его более полном вовлечении в биологический круговорот. Высокий КИ_N также отмечен в варианте «Nм + инг. ур.+ нитр.» – 69%, что на 13% выше, чем у обычного карбамида. Раздельное применение ингибиторов повысило КИ_N всего на 8-9% (табл. 3).

В полевом опыте наибольший суммарный вынос NPK питания отмечен у растений, удобренных капсулированными формами карбамида (табл.3).

Максимальный вынос азота в среднем за два года зафиксирован в варианте «Nм + инг. нитр.» – 16,1 г/м², что на 13% выше по сравнению с обычной мочевиной. Варианты с покрытием МКФ 50 мкм и 100 мкм обеспечили вынос азота 15,9 и 15,6 г/м², соответственно (выше на 11% и 9% по сравнению с «Nм»). В этих вариантах также отмечен больший вынос калия (12,0-12,3 г/м², при 9,8 г/м² в варианте «Nм»). Наибольший вынос фосфора зафиксирован в вариантах «Nм + МКФ 100 мкм» (8,0 г/м²) и «Nм + инг. нитр.» (7,9 г/м²), тогда как в варианте сравнения «Nм» он составил 7,0 г/м² (табл. 3).

Средний коэффициент использования азота для традиционного карбамида составил 59%. Все пролонгированные формы обеспечили его заметное повышение. Максимальный КИ_N отмечен для формы мочевины с ингибитором нитрификации (78%), что указывает на эффективное торможение нитрификации и сокращение потерь азота. Среди капсулированных форм наибольший КИ_N (76%) установлен в варианте с покрытием 50 мкм, что подтверждает эффективность покрытия на основе монокальцийфосфата для пролонгации и оптимизации питания. Обе эти формы повысили КИ_N на 17-19% по сравнению с традиционным карбамидом. В вариантах «Nм + МКФ 100 мкм» и «Nм + инг. ур» КИ_N составил 72-73%, что на 13-14% выше, чем у обычного карбамида (табл. 3.).

3.1.4 Качественные показатели яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида пролонгированного действия

Анализ качественных показателей зерна показал, что модифицированные формы карбамида положительно влияют не только на урожайность, но и на качество продукции.

В вегетационных опытах все формы азотных удобрений повысили содержание белка по сравнению с фоном «РК» (9,3%). Традиционный карбамид увеличил этот показатель до 12,7%. Капсулированные формы обеспечили содержание белка в зерне на уровне 13,7-13,8%, что на 1,0-1,1% выше, чем в варианте с внесением традиционной формы карбамида. Варианты с раздельным применением ингибиторов обеспечили содержание белка в зерне на уровне 13,5%. Максимальное содержание белка (14,3%) было отмечено в варианте с двумя ингибиторами, однако этот вариант уступал другим по урожайности (табл.4).

Таблица 4 – Качественные показатели яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида

Вариант	Вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.		Полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.	
	Белок, %	Клейковина, %	Белок, %	Клейковина, %
РК-фон (Ф)	9,3	13	12,9	18
Ф + Nm (вар. срав.)	12,7	29	14,5	27
Ф + Nm + МКФ 50 мкм	13,8	30	14,3	29
Ф + Nm + МКФ 100 мкм	13,7	30	14,9	29
Ф + Nm + инг. ур	13,5	28	15,3	27
Ф + Nm + инг. нитр.	13,5	31	15,4	30
Ф + Nm + инг. ур.+ нитр.	14,3	30	-	-

Минимальное содержание клейковины в зерне (13%) было в фоновом варианте. При внесении азотных удобрений оно варьировало от 28% до 31%. Наибольшее содержание клейковины в зерне (31%) отмечено в варианте «Nm + инг. нитр.», тогда как в варианте сравнения «Nm» оно составило 29%. Высокое содержание клейковины (30%) также отмечалось в вариантах с капсулированными формами и с двумя ингибиторами, наименьшее (28%) – у мочевины с ингибитором уреазы. Все формы карбамида обеспечили получение зерна 2 класса (табл.4).

Результаты полевых опытов подтвердили тенденции, выявленные в вегетационных опытах. В среднем за два года традиционный карбамид повысил содержание белка с 12,9% (фон «РК») до 14,5%. Наибольшее содержание белка отмечено в вариантах, в которых мочевина вносилась с ингибитором нитрификации (15,4%) и с ингибитором уреазы (15,3%), что на 0,8-0,9% было выше, чем в варианте сравнения «Nm». Капсулированные формы обеспечили содержание белка в зерне на уровне 14,3-14,9%. Содержание клейковины на фоне «РК» составляло 18%, при внесении традиционного карбамида – 27%. Максимальное содержание клейковины (29-30%) отмечено в вариантах с капсулированным карбамидом и мочевиной с ингибитором нитрификации, что на 2-3% выше варианта сравнения. Капсулированные формы и карбамид с ингибитором нитрификации обеспечили получение зерна 2 класса. Традиционный карбамид и карбамид с ингибитором уреазы – 3 класса (табл.4).

3.2 Экономическая эффективность применения карбамида пролонгированного действия при возделывании яровой пшеницы

Капсулированная мочевина с покрытием 50 мкм обеспечила наибольший условный чистый доход – 57 603,5 руб./га, что на 19% выше традиционного карбамида (48 595,8 руб./га). Эта же модификация показала максимальную окупаемость – 25 ц зерна/ц N (на 56% выше, чем у традиционной формы – 16 ц/ц N) и минимальную себестоимость 1 ц зерна – 566,7 руб./ц (на 6% ниже «Nm» – 604,8 руб./ц). Рентабельность составила 168%, превысив обычный карбамид на 17%, а другие модификации – на 15-30%. Формы с покрытием 100 мкм и с ингибитором нитрификации были на одном уровне. По сравнению с традиционной мочевиной чистый доход увеличился на 8% (52 418,0–52 589,2 руб./га), рентабельность составила 150-152% (сопоставимо с традиционным карбамидом – 151%). По окупаемости данные формы превосходили обычную мочевину на 5 ц зерна/ц N (31%). Самая высокая себестоимость зерна отмечена в варианте с ингибитором уреазы, который был наименее эффективным с экономической стороны.

3.3 Минерализация азота разных форм карбамида пролонгированного действия в почвах различного генезиса

3.3.1 Интенсивность аммонификации и нитрификации на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Изучение динамики процессов трансформации азота разных форм карбамида в первую очередь осуществлялось на дерново-подзолистой почве, характерной для центральной части Нечерноземной зоны, где и проводились вегетационные и полевые исследования.

Наиболее интенсивно аммонификация протекала на обычной мочеvine «Nm». Уже на 2-е сутки содержание аммония возросло до 115,0 мг/кг (57% азота (N) от внесенного), пик достигнут на 14-е сутки – 150,6 мг/кг (74% N от внесенного), после чего началось снижение, вследствие его вовлечения в процесс нитрификации (рис. 2).

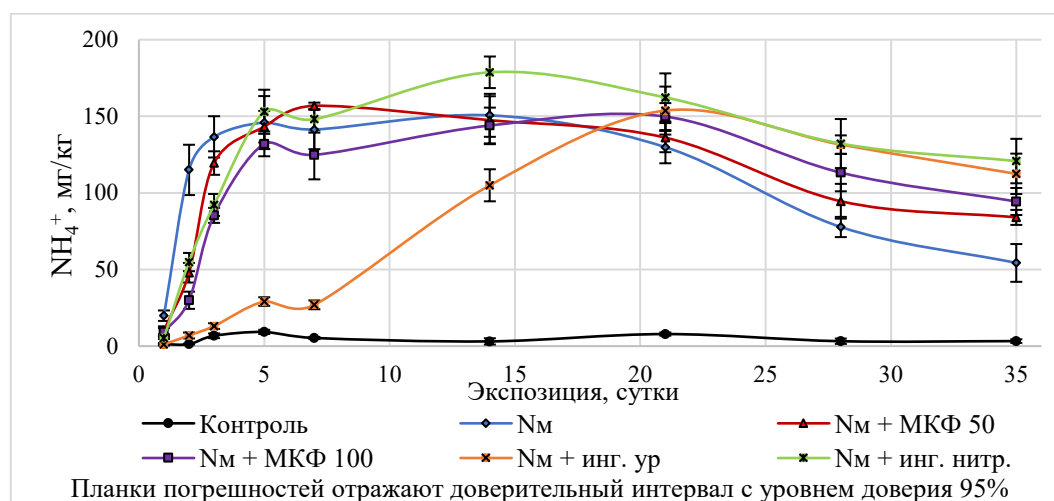


Рисунок 2 – Динамика накопления аммонийного азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Покрытие на основе монокальцийфосфата замедляло превращение мочевины. В варианте с покрытием 50 мкм в первые 3-е суток содержание аммония было на 41% ниже, чем на обычной мочеvine, к 7-м суткам достигло 156,8 мг/кг. Форма с покрытием 100 мкм сдерживала процесс в первые 5 суток (содержание аммония ниже на 46%), максимум отмечен на 21-е сутки – 149,8 мг/кг (71% N от внесенного), повышенные концентрации аммония в почве сохранялись до 35-х суток (рис. 2).

Наибольшей способностью сдерживать начальные этапы трансформации карбамида обладали формы со стабилизаторами азота. Ингибитор уреазы практически полностью блокировал гидролиз карбамида в первые 7 суток (содержание аммония 1,2-29,1 мг/кг, 0-11% N от внесенного). По сравнению с обычным карбамидом содержание аммония на 5-7-е сутки экспозиции было ниже в 5 раз, после чего началось активное накопление с максимумом на 21-е сутки – 153,7 мг/кг (73% N от внесенного) (рис. 2).

Ингибитор нитрификации замедлял аммонификацию в первые 5 суток менее выражено, но к концу опыта обеспечил самое высокое содержание аммония (120,8 мг/кг на 35-е сутки) благодаря торможению нитрификации и накоплению аммония в почве (рис.2).

Процесс нитрификации активизировался на 3-5-е сутки и шел параллельно аммонификации, наиболее выражено – с 14-х суток. В варианте с обычным карбамидом содержание нитратов активно росло с 14-х суток, достигнув к 35-м суткам 142,6 мг/кг, что соответствовало 44% N от внесенного (рис. 3).

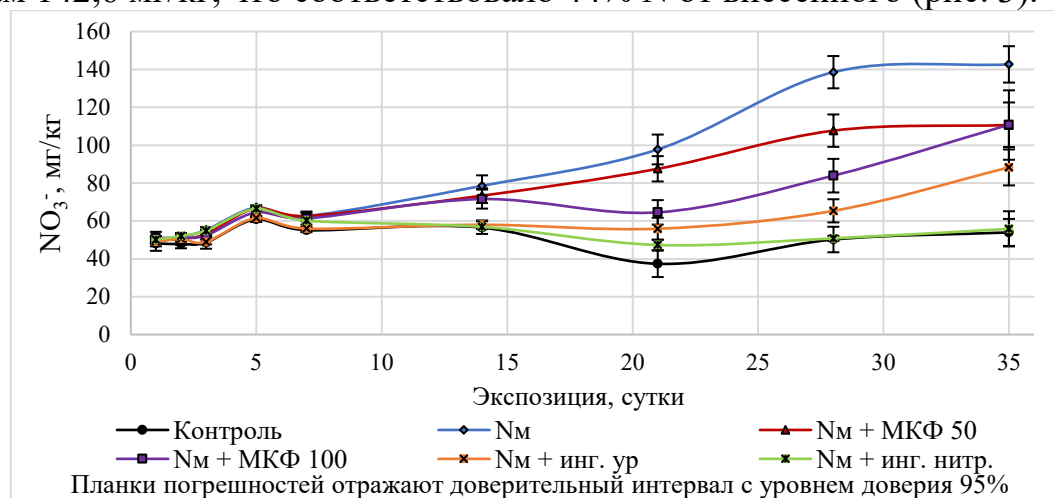


Рисунок 3 – Динамика накопления нитратного азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

У капсулированных форм карбамида нитрификация протекала медленнее. К 35-м суткам в этих вариантах накопилось 110,6-110,8 мг/кг нитратов (28% N от внесенного). Наиболее выраженный эффект отмечен у формы с покрытием 100 мкм: накопление нитратов шло медленнее, чем у формы с покрытием 50 мкм (на 21-28-е сутки в ниже на 41-46%). По сравнению с традиционным карбамидом в период 14-35-х суток содержание нитратов в вариантах «Nm + МКФ 50» и «Nm + МКФ 100» было в среднем ниже на 28% и 46%, соответственно (рис.3).

Наиболее эффективно нитрификацию тормозили стабилизаторы азота. В варианте с ингибитором уреазы к 35-м суткам содержание нитратов составило 88,2 мг/кг (17% N от внесенного), что на 61% ниже, чем в варианте с обычным

карбамидом. Ингибитор нитрификации практически полностью блокировал процесс: к 35-м суткам нитратов накопилось 55,8 мг/кг, что лишь незначительно превысило контроль без удобрения и соответствовало 1% от внесенного азота (рис.3). Это согласуется с литературными данными о способности ингибиторов нитрификации длительно сохранять азот в аммонийной форме (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010; Маннхайм, Бергер, 2015; Lewu et al., 2021).

3.3.2 Интенсивность аммонификации и нитрификации на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

На каштановой почве гидролиз обычного карбамида протекал интенсивно, но накопление аммония было ниже, что может быть связано с газообразными потерями аммиака в щелочной среде (Кореньков, 1999; Визирская и др., 2020). Содержание аммонийного азота достигло максимума к 5-м суткам – 121,3 мг/кг (59% N от внесенного), к 35-м суткам снизилось до 68,5 мг/кг (рис.4).

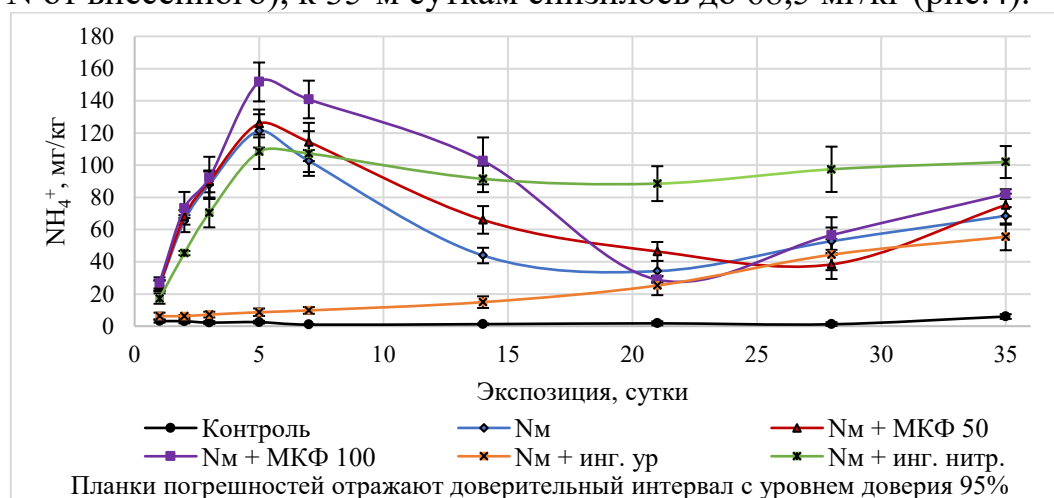


Рисунок 4 – Динамика накопления аммонийного азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Среди капсулированных форм наиболее эффективно замедляло превращение карбамида покрытие МКФ толщиной 50 мкм. В первые 5 суток динамика была близка к обычной мочеvine, но на 7-21 сутки содержание аммония было на более высоком уровне (114,4–46,4 мг/кг против 102,6–34,2 мг/кг в варианте «Nm»), что указывает на более растянутый период аммонификации и меньшие потери азота (рис. 4).

Неожиданные результаты получены на варианте с покрытием 100 мкм: вместо замедления наблюдалась интенсификация гидролиза. Максимум содержания аммония (151,7 мг/кг или 75% N от внесенного) достигнут уже к 5-м суткам, что превысило показатели других вариантов. Это может быть связано с подкислением почвенного раствора вокруг гранулы за счет гидролиза покрытия из монокальцийфосфата, создавшего оптимальные условия для разложения мочевины (рН 7,0) (Сапожников, 1973). При этом, на 7-е и 14-е сутки содержание аммония также было выше по сравнению с обычной мочевиной, что косвенно указывает на меньшие потери аммиака (рис.4).

Наиболее эффективно аммонификацию на каштановой почве сдерживали формы с ингибиторами. Ингибитор уреазы практически полностью блокировал гидролиз в первые 14 суток (содержание аммония 6,3–14,9 мг/кг), максимум (55,5 мг/кг или 25% N

от внесенного) достигнут только к 35-м суткам. Ингибитор нитрификации замедлял аммонификацию в первые 5 суток, а с 7-х по 35-е сутки содержание аммония сохранялось на уровне 88,5-107,3 мг/кг, к концу опыта составив 102 мг/кг (48 % N от внесенного), что указывает на сдерживание нитрификации (рис.4).

Активное накопление нитратов в варианте с обычным карбамидом на каштановой почве началось с 7-х суток, максимум достигнут к 21-м суткам – 229,7 мг/кг (66% N от внесенного), к 35-м суткам снизилось до 182,2 мг/кг (рис.5).

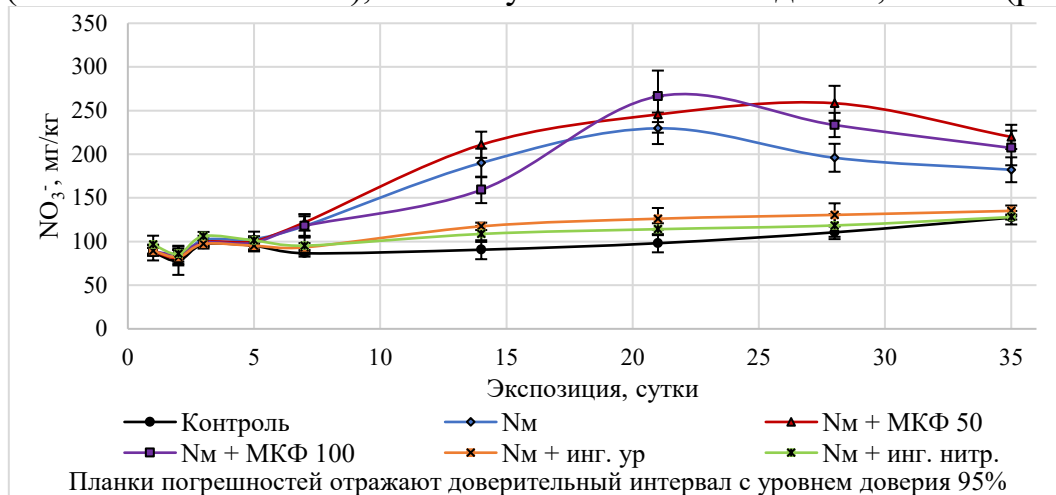


Рисунок 5 – Динамика накопления нитратного азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Капсулированные формы обеспечили более высокое содержание минерального азота в течение всего эксперимента, что свидетельствует о снижении газообразных потерь. В варианте с покрытием 100 мкм пик содержания нитратов также пришелся на 21-е сутки – 266,3 мг/кг (84% N от внесенного), к 35-м суткам наблюдалось снижение до 207,2 мг/кг. В варианте с покрытием 50 мкм максимум достигнут только к 28 суткам – 258,4 мг/кг (74% N от внесенного), к 35-м суткам содержание нитратов снизилось до 219,8 мг/кг. Снижение содержания нитратов в поздние сроки инкубирования (21-35 суток) является косвенным признаком активизации денитрификации (рис. 5).

Наиболее эффективно нитрификацию тормозили ингибиторы. В варианте с ингибитором уреазы к 35-м суткам накопилось всего 135,1 мг/кг нитратов (4% N от внесенного). Ингибитор нитрификации практически полностью тормозил процесс нитрификации на протяжении всего опыта. К 35-м суткам содержание N-NO₃ составило 128,0 мг/кг, что сопоставимо с контрольным вариантом без внесения удобрения (127,3 мг/кг) (рис.5).

Трансформация азота на каштановой почве имеет особенности по сравнению с дерново-подзолистой, обусловленные щелочной реакцией и высокой биологической активностью. Накопление минерального азота из обычной мочевины было ниже из-за увеличения потерь аммиака. Эффективность модификаций карбамида существенно зависела от типа почвы. На дерново-подзолистой почве капсулированные формы показали хороший пролонгирующий эффект, на каштановой их применение требует дополнительного изучения и корректировки технологии, тогда как ингибиторы остаются стабильно эффективными на различных типах почв.

3.4 Денитрификация азота разных форм карбамида пролонгированного действия в почвах разного генезиса

3.4.1 Интенсивность денитрификации на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

На дерново-подзолистой почве пик выделения закиси азота (N_2O) во всех вариантах пришелся на 3-и сутки после создания анаэробных условий. Динамика эмиссии соответствовала тенденциям процессов минерализации. Наибольшее количество N_2O на протяжении всего опыта выделялось в варианте с традиционным карбамидом. На 3-и сутки количество выделившегося $N-N_2O$ составило 15,6 мг/кг (8% N от внесенного), высокий уровень сохранялся до 14-х суток (14,0–15,4 мг/кг), к 35-м суткам отмечалось снижение до 11,8 мг/кг (рис. 6).

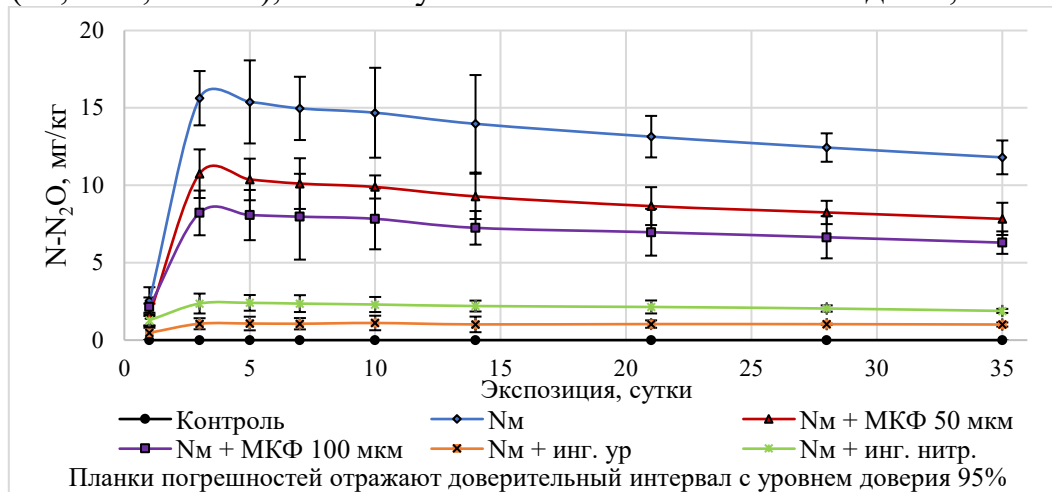


Рисунок 6 – Динамика эмиссии закиси азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Капсулирование мочевины монокальцийфосфатом существенно снижало эмиссию, причем с увеличением толщины покрытия эффект усиливался. В варианте с покрытием 50 мкм на 3-и сутки количество выделившегося $N-N_2O$ составило 10,8 мг/кг (на 31% ниже обычной мочевины), с покрытием 100 мкм – 8,2 мг/кг (на 47% ниже обычной мочевины). В период 3-5 суток в этих вариантах выделилось 4-5% азота от внесенного, что почти вдвое ниже, чем у традиционной формы карбамида. В течение всего опыта (35 суток) покрытие на основе монокальцийфосфата снижало интенсивность денитрификации на 15-48% по сравнению с обычной мочевиной (рис. 6).

Наиболее эффективно денитрификацию сдерживали ингибиторы. В варианте с ингибитором нитрификации на 3-5-е сутки количество выделившегося $N-N_2O$ составило 2,4 мг/кг (1,2% N от внесенного), что в 6,5 раз ниже, чем у обычного карбамида, и в 3,4–4,5 раза ниже, чем у капсулированных форм. Ингибитор уреазы практически полностью подавлял образование закиси: на протяжении всего опыта количество закиси не превышало 1,1 мг/кг (0,5% N от внесенного) (рис. 6).

С 5-х суток эмиссия закиси азота во всех вариантах постепенно снижалась вследствие редукции до молекулярного азота (N_2). К 35-м суткам количество $N-N_2O$ составило: в вариантах с капсулированными формами – 6,3-7,8 мг/кг, с ингибиторами – 1,0-1,9 мг/кг, на традиционном карбамиде – 11,8 мг/кг (рис. 6).

3.4.2 Интенсивность денитрификации на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Каштановая почва отличалась более высоким уровнем денитрификации по сравнению с дерново-подзолистой. В результате высокого содержания нитратов в исходном образце почвы и активного микробиоценоза даже на контроле без удобрений количество выделившегося $N-N_2O$ оставалось повышенным на протяжении всего опыта: на 5-7-е сутки – 53,7-53,8 мг/кг, к 35-м суткам – 43,8 мг/кг (рис. 7).

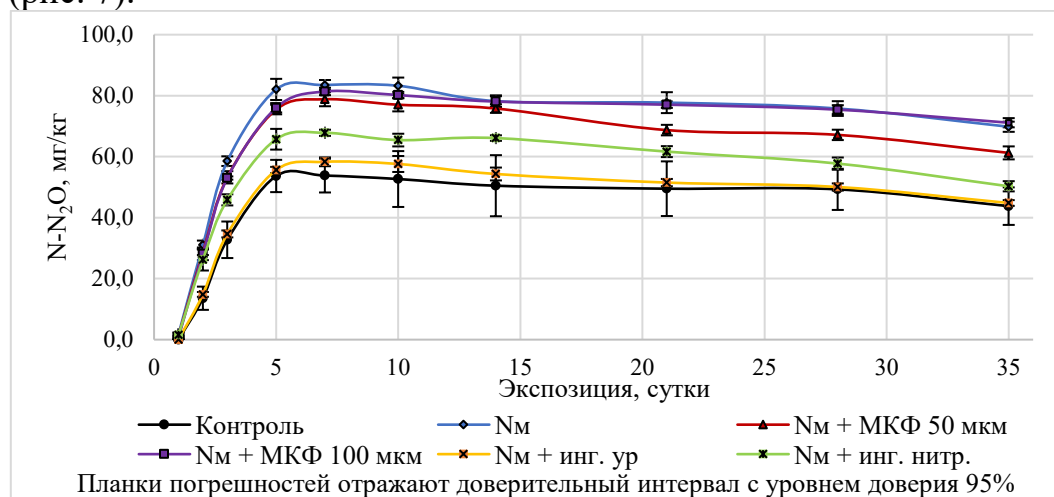


Рисунок 7 – Динамика эмиссии закиси азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Внесение обычного карбамида резко усиливало денитрификацию. В пиковый период (5-10-е сутки) количество $N-N_2O$ достигало 82,0-83,5 мг/кг. Потери азота достигли 14-15% от внесенного, что вдвое выше, чем на дерново-подзолистой почве (рис. 7).

Все модифицированные формы сдерживали денитрификацию до 5 суток, к 7-м суткам эмиссия достигала пика, но была ниже, чем у обычной мочевины. Капсулированные формы на каштановой почве показали иную закономерность, чем на дерново-подзолистой. До 5 суток их эффективность была одинаковой. В дальнейшем лучше работала форма карбамида с покрытием МКФ 50 мкм: на 7-е сутки количество $N-N_2O$ – 78,8 мг/кг (12,5% N от внесенного), у формы с покрытием МКФ 100 мкм – 84,1 мг/кг (14% N от внесенного). В целом за 7 дней опыта эмиссия закиси азота в данных вариантах опыта была ниже на 7-60% (рис.7).

Наиболее эффективно работали ингибиторы. Ингибитор уреазы практически полностью блокировал эмиссию: максимальное количество выделившегося $N-N_2O$ установлено на 7-е сутки и составило 58,3 мг/кг (всего на 8% выше контроля), потери азота составили 2% от внесенного, что в 7,5 раз меньше, чем у обычного карбамида. Ингибитор нитрификации также снижал эмиссию, но в меньшей степени: на 7-е сутки потери – 7% от внесенного азота (вдвое меньше, чем у обычного карбамида, но в 3,5 раза больше, чем у ингибитора уреазы) (рис.7).

Начиная с 7-10 суток и до конца наблюдений на всех вариантах, включая контроль, отмечалось постепенное снижение N_2O , что связано с ее редукцией до N_2 в условиях длительного анаэробнозиса (рис.7).

Таким образом, все модифицированные формы карбамида эффективно снижали эмиссию закиси азота по сравнению с традиционной формой, однако степень снижения зависит от типа почвы и вида модификации.

Полученные данные позволяют рассматривать использование модифицированных форм карбамида как эффективный агротехнологический прием снижения непродуктивных потерь азота. В полевых условиях, где отсутствуют идеальные условия для денитрификации, эффективность сдерживания процессов может быть еще выше, а период сохранения азота в доступной форме – более продолжительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Карбамид с покрытием на основе монокальцийфосфата и карбамид, стабилизированный ингибиторами уреазы и нитрификации, способствуют повышению доступности азота растениям пшеницы в течение вегетации и усиливают накопление азота в биомассе в фазе колошения-цветения на 3 и 10 мг/растение, соответственно, в условиях вегетационного и полевого опыта.

2. Капсулированный карбамид положительно влияет на формирование элементов структуры урожая и достоверно повышает урожайность яровой пшеницы относительно обычной мочевины на 6-7%, в условиях вегетационных, и на 8-14% – в условиях полевых опытов. Стабилизированные формы карбамида оказывали неоднозначное влияние на урожайность яровой пшеницы: в условиях вегетационных опытов достоверную прибавку урожая на уровне 5% относительно стандартной формы обеспечивало применение карбамида, модифицированного ингибитором уреазы, а в полевых условиях, карбамид с ингибитором нитрификации достоверно повышал урожайность на 8%.

3. Применение модифицированных форм карбамида повышает вынос элементов питания урожаем, что способствует увеличению коэффициента использования азота, в среднем за два года относительно обычной мочевины, на 9-14% и 14-19%, соответственно в вегетационных и полевых опытах. Максимальные значения KI_N отмечены при применении капсулированного карбамида с толщиной покрытия 50 мкм (70 и 76%).

4. Модифицированные формы карбамида способствуют повышению качества зерна яровой пшеницы. В вегетационных опытах содержания белка увеличилось на 0,8-1,6%_{абс.}, а клейковины на 1-2%_{абс.}. В полевых условиях содержание белка в зерне повысилось на 0,4-0,9%_{абс.}, а клейковины на 2-3%_{абс.}. Наибольший сбор белка получен при применении капсулированного карбамида с толщиной покрытия 50 мкм.

5. Капсулированный карбамид с толщиной покрытия 50 мкм – наиболее экономически эффективная форма удобрения, обеспечивающая наибольшую прибавку урожая, условно чистый доход на уровне 57,6 тыс. руб./га, наименьшую себестоимость продукции (566,7 руб./ц), максимальную окупаемость азота (25 ц зерна/ц N) и уровень рентабельности 168%.

6. Модифицированные формы карбамида снижают интенсивность аммонификации и нитрификации. На дерново-подзолистой почве покрытие на основе монокальцийфосфата замедляет гидролиз карбамида до 3-5 суток и его

дальнейшее окисление до нитратной формы в течение 35 суток. На каштановой почве применение капсулированного карбамида способствует более интенсивному накоплению и сохранению минеральных форм азота по сравнению с обычной мочевиной. На 14-е сутки содержание аммония превышало вариант сравнения в 1,5-2,3 раза, а нитратного азота на 35-е сутки – в 1,1-1,2 раза. Независимо от типа почвы наиболее интенсивно трансформацию азота удобрений замедляют ингибиторы нитрификации и уреазы.

7. Размеры эмиссии закиси азота зависят как от формы применяемого удобрения, так и от типа почвы. На дерново-подзолистой почве максимум выделения N_2O зафиксирован на 3-и сутки эксперимента, при этом покрытие гранул на основе монокальцийфосфата снижает интенсивность денитрификации в течение 35 суток на 15-48% по сравнению с обычной мочевиной. На каштановой почве наиболее интенсивное выделение закиси азота наблюдалось в течение 7-ми суток, а капсулирование карбамида снижало эмиссию N_2O на 7-60%. Ингибиторы уреазы и нитрификации наиболее сильно подавляли процесс денитрификации вне зависимости от типа почвы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лапушкин, В. М. Использование яровой пшеницей азота капсулированной мочевины / В. М. Лапушкин, **М. А. Волкова**, А. А. Лапушкина // Плодородие. – 2023. – № 6(135). – С. 15-19.
2. Лапушкин, В. М. Агрономическая эффективность мочевины пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы / В. М. Лапушкин, **М. А. Волкова**, А. А. Лапушкина, С.П. Торшин, Ф.Г. Игалиев, А.М. Норов, Д.А. Пагалешкин, П.С. Федотов, В.В. Соколов, И.М. Кочетова, Е.А. Рыбин // Агрохимия. – 2024. – № 4. – С. 35-40.
3. **Волкова, М. А.** Трансформация карбамида пролонгированного действия в почве и его эффективность в посевах яровой пшеницы / М. А. Волкова, В. М. Лапушкин // Плодородие. – 2024. – № 5(140). – С. 32-38.
4. **Волкова, М. А.** Эффективность мочевины с замедленным высвобождением азота при выращивании яровой пшеницы / М. А. Волкова, В. М. Лапушкин // Агрохимический вестник. – 2025. – № 1. – С. 3-9.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных

5. Lapushkin, V. M. The effect of slow-release coated fertilizers on the yield of spring wheat / V. M. Lapushkin, A. A. Lapushkina, F. G. Igraliev, S.P. Torshin, **M.A. Volkova** // Ensuring sustainable development in the context of agriculture, energy, ecology and earth science (ESDCA-III-2023) (IOP Conference series: Earth and environmental science). – 2023. – Vol. 1212. – P. 12021.

Публикации в других научных изданиях

6. **Волкова, М. А.** Эффективность капсулированного карбамида при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве / М. А. Волкова, В. М.

Лапушкин, А. А. Лапушкина // Современные проблемы агрохимии, агропочвоведения и агроэкологии: Материалы 56-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием молодых ученых, специалистов-агрохимиков и экологов, посвященной 150-летию со дня рождения академика Константина Каэтановича Гедройца (ВНИИА), Москва, 28 ноября 2022 года / Под редакцией А.А. Завалина. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2023. – С. 39-44.

7. **Волкова, М. А.** Эффективность различных форм мочевины пролонгированного действия в посевах яровой пшеницы сорта Любава / М. А. Волкова, В. М. Лапушкин // Актуальные проблемы и инновационные решения в области агрохимии: Материалы 57-й Всероссийской конференции с международным участием молодых учёных, специалистов-агрохимиков и экологов (к 300-летию Российской академии наук и 220-летию со дня рождения Юстуса фон Либиха), Москва, 29 ноября 2023 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2024. – С. 129-135.

8. **Волкова, М. А.** Влияние различных форм мочевины на урожайность яровой пшеницы / М. А. Волкова // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 425-429.

9. **Волкова, М. А.** Эффективность капсулированной и ингибированной мочевины в посевах яровой пшеницы / М. А. Волкова // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии: Сборник статей, Москва, 02–04 июня 2025 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2025. – С. 433-436.

10. **Волкова, М.А.** Влияние медленнодействующей формы мочевины на урожайность яровой пшеницы / М.А. Волкова // «Из прошлого в будущее: идеи Д.Н. Прянишникова и современная агрохимическая наука» Материалы 59-ой Всероссийской конференции с международным участием молодых учёных, специалистов-агрохимиков и агроэкологов, посвященная 160-летию со дня рождения Дмитрия Николаевича Прянишникова, Москва, 17 декабря 2025 г. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2025. – С. 26-29.