

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева»

На правах рукописи

ВОЛКОВА МАРИНА АЛЕКСЕЕВНА

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук, доцент
Лапушкин Всеволод Михайлович

Москва, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	10
1.1 Хозяйственное значение яровой пшеницы и роль азотного режима питания в формировании ее урожая и качества при возделывании в Нечерноземной зоне	10
1.2 Проблема потерь азота из почвы и традиционных форм азотных удобрений	15
1.2.1 Содержание соединений азота в почве	15
1.2.2 Превращение и потери азота почвы и удобрений.....	18
1.3 Производство и применение удобрений пролонгированного действия как перспективный способ снижения потерь азота и повышения эффективности азотных удобрений	30
1.3.1 Удобрения с замедленным и контролируемым высвобождением элементов питания: механизм действия, модификации, эффективность.....	35
1.3.2 Стабилизированные азотные удобрения: механизм действия, модификации, эффективность	45
1.3.3 Основные недостатки удобрений пролонгированного действия, ограничивающие их применение в агропромышленном комплексе	53
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	57
2.1 Характеристика объектов исследования	57
2.2 Методы исследований	62
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	75
3.1 Влияние разных форм карбамида пролонгированного действия на продуктивность и качество яровой пшеницы	75
3.1.1 Динамика потребления азота яровой пшеницей в зависимости от формы карбамида пролонгированного действия.....	75
3.1.2 Формирование урожая яровой пшеницы при использовании разных форм карбамида пролонгированного действия.....	82
3.1.3 Вынос элементов питания урожаем яровой пшеницы и коэффициенты использования азота удобрений.....	95
3.1.4 Качественные показатели яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида пролонгированного действия.....	102

3.2 Экономическая эффективность применения карбамида пролонгированного действия при возделывании яровой пшеницы	106
3.3 Минерализация азота разных форм карбамида пролонгированного действия в почвах различного генезиса	111
3.3.1 Интенсивность аммонификации и нитрификации на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида	112
3.3.2 Интенсивность аммонификации и нитрификации на каштановой почве в зависимости от формы карбамида	118
3.4 Денитрификация азота разных форм карбамида пролонгированного действия в почвах разного генезиса	125
3.4.1 Интенсивность денитрификации на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида	126
3.4.2 Интенсивность денитрификации на каштановой почве в зависимости от формы карбамида	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135

ВВЕДЕНИЕ

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 (Сабиров 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; Сабиров 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 г. 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.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доценту кафедры агрономической, биологической химии и радиологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, к.б.н, Всеволоду Михайловичу Лапушкину за ценные рекомендации, профессиональное руководство и всестороннюю поддержку на всех этапах исследований; доценту кафедры агрономической, биологической химии и радиологии к.б.н. Анастасии Андреевне Лапушкиной – за ценные рекомендации по статистическому анализу данных; коллегам из НИУИФ им. Я.В. Самойлова, в особенности начальнику отдела качества и стандартизации, к.т.н. Валерию Васильевичу Соколову – за совместное сотрудничество, поддержку, практическую помощь и доверие; и.о. директора института Агробиотехнологии, д.с.-х.н. Александре Васильевне Шитиковой, и.о. заведующему кафедрой агрономической, биологической химии и радиологии, д.с.-х.н., профессору Алексею Николаевичу Налиухину, д.б.н., профессору Сергею Порфирьевичу Торшину – за бесценную помощь, научные консультации и всестороннее содействие; своей семье, родным, друзьям, коллегам по работе – за поддержку и помощь.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Хозяйственное значение яровой пшеницы и роль азотного режима питания в формировании ее урожая и качества при возделывании в Нечерноземной зоне

Пшеница (род. *Triticum* L., семейство Poaceae Barnhart) вот уже много тысячелетий является наиболее распространенной и самой ценной культурой для мирового сельского хозяйства (Генкель, 1969; Кошкин и др., 2005).

Высокая значимость зерна пшеницы заключается в ее исключительных технологических свойствах. Благодаря синтезу эластичного белка и его питательной ценности зерно пшеницы является основным сырьевым компонентом для огромного количества пищевых (мука различных сортов, крупы, хлебобулочные, кондитерские, макаронные, алкогольные изделия и др.) и кормовых (отруби, кормовая мука и др.) продуктов (Минеев, 1971).

В Российской Федерации среди хлебных злаков одну из главных позиций занимает яровая пшеница. По площади сева яровая пшеница уступает лишь озимой (Росстат, 2023). При этом для продовольственной безопасности страны роль яровой пшеницы особенно высока за счет ее главных преимуществ перед озимой: сокращенного вегетационного периода, повышенной устойчивости к засушливым погодным условиям, хорошей урожайности и отличных хлебопекарных качеств зерна (Генкель, 1969, Амелин и др., 2019). Благодаря вышеперечисленным достоинствам яровая пшеница является своего рода страховой культурой для озимой пшеницы.

По данным Росстата за последнее десятилетие под посевы яровой пшеницы ежегодно отводится в среднем около 13 млн. га пахотных земель (Росстат, 2023). При этом земли, занятые под ее посевами, в основном сосредоточены в Уральском, Сибирском и Приволжском округах нашей страны (Ленточкин, 2019; Росстат, 2023).

На сегодняшний день сельское хозяйство располагает современными технологиями возделывания и высокопродуктивными сортами яровых пшениц,

благодаря чему идет постепенная тенденция расширения посевных площадей яровой пшеницы в условиях Нечерноземья. По последним опубликованным данным в условиях Нечерноземной зоны под посевами яровой пшеницы занято около 1,5 млн. га (Росстат, 2023, 2025).

Известно, что яровая пшеница отличается от других злаковых культур повышенной требовательностью к наличию в почве доступных элементов питания. Это связано с коротким вегетационным периодом и низкой усвояющей способностью ее корневой системы (Вавилов и др., 1986, Кидин, 2009; Гатаулина и др., 2016). На формирование 1 т зерна яровая пшеница потребляет около 35-45 кг азота, 10-15 кг фосфора и 20-35 кг калия (Неттевич, 1976; Анспок и др., 1981; Кидин, 2009; Муравин и др., 2013).

Несмотря на высокую значимость всех макроэлементов в формировании урожая и качества зерновых культур азоту отводится приоритетная роль (Завалин, 2022). Многочисленными полевыми испытаниями было показано, что более 50% прибавки урожая различных сельскохозяйственных полевых культур обусловлено внесением именно азотных удобрений (Гамзиков, 2013).

Азот считается одним из наиболее поглощаемых растениями элементов питания. По этой причине, а также из-за высокой подвижности азота в почве, его недостаток является преимущественным фактором, ограничивающим урожайность культурных растений в сельском хозяйстве и развитие различных организмов в экосистемах (Анспок и др., 1981; Гамзиков, 2013; Кидин, Прасолова, 2014; Алферов и др., 2023; Vitousek et al., 2002; Torres-Olivar et al., 2014; Wang et al., 2024). Как важный макроэлемент, азот по содержанию в сухом веществе большинства растений уступает только углероду и кислороду (Шеуджен и др., 2013а; Wang et al., 2024). Оптимальное содержание азота в растениях колеблется от 1% до 5% в пересчете на сухое вещество (Соколов, 1966; Кретович, 1972; Анспок и др., 1981; Гамзиков, 2013; Torres-Olivar et al., 2014; Сабиров и др., 2015). Зерно пшеницы в среднем содержит 2,5% азота, солома – 0,5% (Кидин и др., 2008).

Прежде всего азот является основным составным элементом важнейших веществ растительной клетки – белка, нуклеиновых кислот, фосфатидов, хлорофилла, гормонов, ферментов, коферментов, витаминов, алкалоидов. Он

участвует во всех фазах роста и развития растений (Павлов,1967; Якубцинер,1970; Минеев,1971; Кретович, 1972, Кретович и др., 1983; Неттевич, 1976; Анспок и др., 1981; Новиков, 2012; Wang et al., 2024).

Злаковые культуры, в том числе и пшеница, чрезвычайно чувствительны к недостатку азота и очень хорошо отзываются на подкормки азотными удобрениями. Пшеница поглощает азот с момента прорастания семян, когда ее корни начинают функционировать, и до тех пор, пока в связи с созреванием не прекратится поглощение всех питательных веществ, которое, как правило, завершается в фазе молочно-восковой спелости зерна (Генкель, 1969; Якубцинер,1970; Кошкин и др., 2005). В фазе всходов содержание общего азота в проростках пшеницы достигает до 5-6%. Максимальное потребление азота растениями яровой пшеницы отмечается в период кущение-колошение. В этот период в растения поступает 50-60% азота, а от начала вегетации – 70-80%, тогда как сухой массы к этому времени формируется лишь 50-60%. В период формирования и налива зерновок азот также необходим, потребность в нем удовлетворяется за счет оттока из вегетативных органов (Шеуджен и др., 2013а)

Недостаток азота серьезно затрудняет рост растений и снижает урожайность и качество продукции (Генкель, 1969; Якубцинер, 1970; Кретович, 1972; Wang et al., 2024). Исследования показывают, что чем раньше растения пшеницы испытывают азотное голодание, тем сильнее его отрицательное воздействие на все последующие этапы развития. При этом высокие дозы азота в ранний период не эффективны. Наиболее эффективно усиление азотного питания пшеницы начиная с фазы кущения (Церлинг, 1978). Минеев В.Г. (1971) в своей работе отмечал, что без дополнительной подкормки азотом в фазу колошения и без оптимального азотного питания пшеницы во второй период вегетации при наливе зерна, получить сильную пшеницу по белку и клейковине не получится.

Решающее значение в обеспечении растений яровой пшеницы азотом имеют его весенние запасы в почве. Недостаток азота проявляется быстро и обнаруживается визуально. Растения пшеницы приобретают бледно-зеленую окраску, нижние листья желтеют и отмирают. При остром дефиците азота снижаются темпы роста, подавляется кущение, листья вырастают мелкими,

формируется слабый колос (Генкель, 1969; Новоселова, 2007; Гамзиков, 2013; Шеуджен и др, 2013а; Петров и др., 2017; Wang et al., 2024). При достаточном уровне азотного питания усиливается процесс образования ассимилятов, ускоряется рост, замедляются процессы старения и отмирания листьев (Петров и др., 2017).

Кроме того, азот существенно влияет на накопление белка в зерне пшеницы и его фракционный состав. Достаточная обеспеченность растений пшеницы азотом способствует не только усилению накопления общего белка в зерне, но и увеличению доли фракции клейковинных белков, которые непосредственно отвечают за хлебопекарные свойства зерна пшеницы (Минеев, 1971; Новоселова, 2007; Новиков, 2012; Лапушкин и др., 2022а,б;).

Растения поглощают азот из почвы в аммонийной (восстановленной) – NH_4^+ и нитратной (окисленной) – NO_3^- формах (Генкель, 1969; Якубцинер, 1970; Неттевич, 1976; Шеуджен и др., 2013а). С физиологической точки зрения аммонийная и нитратная формы азота равноценны для растений. Преимущественное поглощение той или иной формы азота влияет на процессы фотосинтеза, дыхания, роста, интенсивность поглощения других элементов питания, химический состав растений. Широко известны случаи, когда при высокой концентрации аммония в почве наблюдалось угнетение роста растений, а наличие нитратов в качестве единственного источника азота приводит к их избыточному накоплению в некоторых группах сельскохозяйственных культур (Соколов и др., 1992). Прянишниковым Д.Н. было установлено, что быстрее всего растения поглощают азот в аммонийной форме. Однако в почве аммонийный азот достаточно быстро окисляется до нитратной формы, поэтому различные растения, в том числе и пшеница, поглощают азот преимущественно в нитратной форме (Прянишников, 1945; Генкель, 1969; Шеуджен и др., 2013а; Кидин, 2014).

В Нечерноземье величина урожая и качество зерна яровой пшеницы во многом зависит от уровня обеспеченности культуры азотным питанием (Неттевич, 1976; Завалин, 2022). В основном почвенный покров региона представлен дерново-подзолистыми почвами различной степени окультуренности. Несмотря на хорошую влагообеспеченность дерново-подзолистые почвы не отличаются

высоким плодородием. Они чаще всего характеризуются повышенной кислотностью ($pH_{\text{сол.}}$ 4,0-4,8), невысоким содержанием гумуса (1,5-3%), высокой гидролитической кислотностью (3,0-4,5 мг-экв./100 г почвы), низким содержанием азота и фосфора, которых в среднем содержится около 3 т/га в пахотном слое (0-20 см) (Соколов, 1966; Неттевич, 1976; Анспок и др., 1981; Сапожников, 1973; Пасынков, 2021).

Малые запасы азота в дерново-подзолистых почвах не способны полноценно обеспечить потребности пшеницы в данном элементе. Однако при осуществлении систематического известкования, внесении достаточных норм минеральных и органических удобрений в Нечерноземной зоне возможно получать высокие и устойчивые урожаи яровой пшеницы хорошего качества. Как правило, более 50% поступающего азота в почвы данного региона приходится на минеральные удобрения, а для повышения эффективности этих удобрений на каждый кг азота рекомендуется вносить 2,5-3,0 кг извести (Соколов, 1966; Неттевич, 1976).

В целях снижения потерь азота из почвы система азотного питания яровой пшеницы в Нечерноземной зоне, как правило, дробная, и включает в себя основное внесение, на долю которого отводится 2/3 от общей вносимой дозы азота, и все остальное в подкормку. По литературным данным (Неттевич, 1976; Анспок и др., 1981; Муравин и др., 2013), в зависимости от окультуренности дерново-подзолистой почвы и ее гранулометрического состава, для получения урожая яровой пшеницы на уровне 4,0-5,5 т/га в условиях Центрального-нечерноземного региона необходимо вносить 90-130 кг азота на гектар.

Подкормку пшеницы азотом проводят обычно в период от фазы кущения до фазы цветения. Согласно многочисленным исследованиям (Якубцинер, 1970; Минеев, 1971; Неттевич, 1976; Кошкин и др., 2005; Кидин, 2009; Новиков, 2012; Муравин и др., 2013; Пасынкова, 2025), наиболее эффективные результаты в формировании структуры и качества урожая дает некорневая подкормка азотными удобрениями до или в начале фазы колошения.

Основываясь на вышесказанной информации, можно заключить, что для получения хорошего и качественного урожая пшеницы необходимо обеспечить растения оптимальным азотным питанием как минимум до фазы колошения.

1.2 Проблема потерь азота из почвы и традиционных форм азотных удобрений

1.2.1 Содержание соединений азота в почве

За время развития агрохимии различными учеными многократно показывалась и подтверждалась особо важная роль макроэлемента азота в развитии земледелия (Прянишников, 1945; Кидин, 1974, 2009; Гамзиков, 2013; Завалин, 2022).

Запас азота в почвах земного шара изменяется в широких пределах и по разным источникам составляет около 3×10^{11} – 3×10^{17} т. В гумусовых горизонтах содержание азота колеблется от менее 0,05% до 2% и более в почвах, богатых органическим веществом (торф) (Соколов и др., 1990, Кудеяров, 1989).

Круговорот азота в почве подчиняется определенному циклу и состоит в основном из биогенных процессов трансформации, которая включает в себя: фиксацию молекулярного азота из атмосферы симбиотическими и свободноживущими микроорганизмами; минерализацию азотсодержащих соединений в ходе аммонификации; нитрификацию – окисление аммонийного азота до нитратов; денитрификацию – восстановление нитратов до газообразных соединений N_2O и N_2 ; иммобилизацию – ассимиляция неорганического азота растениями и микроорганизмами до органических соединений.

К абиогенным процессам почвенного цикла азота относятся: хемоденитрификация – улетучивание аммиака и других газообразных соединений; фиксация ионов аммония минералами и органическим веществом почвы; миграция нитрат-ионов с поверхностными и грунтовыми почвами. От интенсивности отдельных звеньев азотного цикла зависит накопление азота в почвах. И чем больше почва содержит азота, тем выше ее потенциальное плодородие, которое имеет прямую зависимость с продуктивностью сельскохозяйственных культур (Кудеяров, 1989; Соколов и др., 1990; Завалин, 2022; Robertson, Groffman, 2015; Holz et al., 2023; Luy et al., 2024).

Пополнение почвенных запасов азота осуществляется в основном за счет фиксации молекулярного азота почвенными микроорганизмами и внесения органических и минеральных удобрений (Сапожников, 1973; Соколов и др., 1990; Соколов, Семенов, 1992; Гамзиков, 2013; Завалин, 2022).

В мировом и отечественном агропроизводстве азотные удобрения по сей день занимают ведущую позицию в ассортименте минеральных удобрений. К примеру, в нашей стране на азотные туки приходится более 50% от общего объема произведенных минеральных удобрений (Росстат, 2023).

Тем не менее азот по-прежнему остается наиболее недостающим элементом питания, лимитирующим урожай и производство сельскохозяйственной продукции в нашей стране (Неттевич, 1976; Макаров, Патрикеева, 1974). Особенно это касается Нечерноземной зоны, где чуть более 60% пахотных почв представлено дерново-подзолистыми почвами с низким естественным плодородием (Шафран и др., 2021). Содержание усвояемого азота на дерново-подзолистых почвах в первом минимуме, поэтому отклик сельскохозяйственных культур на внесение азотных удобрений достаточно высокий (Макаров, Патрикеева, 1974, Гамзиков, 2013). Каждый внесенный килограмм азота на дерново-подзолистых почвах способствует повышению урожая зерновых культур в среднем на 12 кг (Завалин, 2022). Основная проблема потерь азота заключается в высокой мобильности его соединений, образующихся после внесения азотных удобрений в почву в результате ряда сложных физико-химических и биологических превращений (Кидин, 1974).

Как известно, соединения азота в почве достаточно разнообразны. Среди них обычно выделяют следующие группы:

Органические соединения. Верхний горизонт почв в основном содержит азот в органической форме, доля которого составляет более 90% от его общего содержания. Азотсодержащие органические соединения преимущественно являются продуктами разложения растительных и животных остатков, микробной биомассы, продуктов метаболизма населяющих почву организмов, а также гумуса. В их состав входят простые и сложные белки, амины и амиды, аминокислоты, мочевины, мочева и гиппуровая кислота, хитин и т. д. (Сапожников, 1973; Емцев,

Мишустин, 2014). Большинство из них трудноусвояемы для растений (Кудеяров, 1989). С точки зрения гидролитической стабильности органические азотсодержащие вещества подразделяются на легкогидролизуемые (выделяемые при обработке 0,5 н. серной кислотой); трудногидролизуемые (выделяемые при обработке 5 н. серной кислотой); негидролизуемый остаток. По данным Э.И. Шконде, Н.И. Болотиной и И.Е. Королевой дерново-подзолистые почвы содержат в среднем 10% минеральных и легкогидролизуемых форм азота, 15% – трудногидролизуемых, 75% – негидролизуемых (Сапожников, 1973).

Минеральные соединения. Сравнительно небольшая часть азота представлена, так называемым «легкоусвояемым» или неорганическим азотом, содержание которого обусловлено количеством вносимых азотных минеральных удобрений и интенсивностью минерализации органических веществ почвы. Неорганический азот включает в себя обменно-поглощенный аммоний; необменно-поглощенный (фиксированный) аммоний; водорастворимые формы – соли аммония, нитрат-ионы и нитрит-ионы, последние из которых содержатся в очень малых количествах или отсутствуют вовсе, так как быстро окисляются до нитратной формы (Кудеяров, 1989; Сапожников, 1973).

Согласно литературным данным, фиксированный аммоний практически не используется растениями. Его содержание в почве зависит в первую очередь от минералогического состава почвы. Дерново-подзолистые почвы содержат в среднем около 4 % фиксированного аммония. В наибольшей степени ионы аммония фиксируются минералами группы гидрослюдов – вермикулитом и иллитом. Также значительное влияние на фиксацию аммония оказывает общее содержание илистой фракции в почве и влажность почвы. При переменном увлажнении интенсивность фиксации азота почвой увеличивается (Сапожников, 1973).

Содержание водорастворимых форм азота и обменного аммония очень изменчиво и зависит от свойств почвы и происходящих в ней биологических и физико-химических процессов, а также от поступления антропогенного азота (Сапожников, 1973).

1.2.2 Превращение и потери азота почвы и удобрений

Эффективное использование азотных удобрений – важнейший инструмент повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Однако оно осложняется значительными потерями азота из почвы, что снижает экономическую целесообразность их применения и одновременно наносит серьезный урон окружающей среде (Кидин, 1974; Руделев, 1992; Гамзиков, 2013).

При внесении азотсодержащих удобрений в почву почвенная микрофлора моментально инициирует сложные биохимические процессы трансформации азота удобрений. Важнейшие пути превращения азота включают минерализацию, иммобилизацию, денитрификацию. Данные процессы определяют степень доступности азота для усвоения растениями, а также потенциальные пути его потерь в окружающую среду. Каждый из этих процессов может привести к значительным потерям азота, что негативно сказывается как на урожайности сельскохозяйственных культур, так и на экологической обстановке окружающей среды. Рядом исследователей (Макаров, Патрикеева, 1974; Руделев, 1992; Кореньков, 1999; Завалин и др., 2012; Гамзиков, 2013; Шеуджен и др., 2013а; Сабиров и др., 2015; Маннхайм, Бергер, 2015; Лапушкин и др., 2024; Хузиахметов и др., 2024; Волкова, Лапушкин, 2024а,b, 2025; Naz, Sulaiman, 2016; Ladha et al., 2005; Sato, Morgan 2008; Sempeho et al., 2015; Ahmed et al., 2017; Lapushkin et al., 2023, 2024) было установлено, что от 20% до 70% азота, вносимого в почву с удобрениями, как правило, остается не доступным для растений. Около 20-40% азота удобрений после внесения закрепляется в почве микроорганизмами, 10-50% – теряется из почвы в газообразной форме (NH_3 , N_2O , N_2) в результате аммонификации и денитрификации, 10-30% азота вымывается из пахотного горизонта в виде нитрат-ионов (NO_3^-), образованных в процессе нитрификации.

По сложившемуся в литературе представлению (Сапожников, 1973; Соколов и др., 1990; Руделев, 1992; Кореньков, 1999; Завалин, 2012; Каранкевич, Семененко, 2013; Эмер, 2016) интенсивность всех процессов, обуславливающих трансформацию азота удобрений, зависит от ряда факторов: формы азотного

удобрения, физико-химических свойств почвы, содержания органического вещества, климатических условий и агротехнических приемов.

В почве растения и микроорганизмы постоянно конкурируют за легкоусвояемые формы азота, что обуславливает интенсивность минерализации и иммобилизации – двух непрерывно протекающих процессов (Жигарева, 1972; Сапожников, 1973; Кудеяров, 1989; Завалин, 2022). Для азотного цикла почвы иммобилизация и минерализация являются фундаментальными процессами в регулировании содержания активных форм азота в почве (Ouyang et al., 2008; Lyu et al., 2024).

Минерализация. Минерализация – это процесс превращения сложных органических веществ почвы под действием почвенной микробиоты до простых минеральных соединений. Данный процесс объединяет в себе аммонификацию и нитрификацию (Сапожников, 1973; Соколов, Семенов, 1992; Кореньков, 1999).

В трансформации азотистых органических соединений в почве основное значение имеет аммонификация. В результате аммонификации под действием ферментов, выделяемых анаэробными и аэробными бактериями, актиномицетами и грибами, из азотсодержащих органических веществ высвобождается аммиак, часть которого выделяется в атмосферу, другая – переходит в виде иона аммония в почвенный раствор, где он может быть усвоен растениями или подвергнуться дальнейшему превращению (Сапожников, 1973; Емцев, Мишустин, 2014; De Datta, Buresh, 1989; Vanlauwe et al., 2001; Kaur et al., 2024). При применении азотных минеральных удобрений в результате аммонификации из почвы в виде аммиака теряется от 10 до 60 % вносимого азота (Макаров, 1988; Кореньков, 1999; Маннхайм, Бергер, 2015; Watson, et al., 1992; Naz, et al. 2016).

Процесс аммонификации протекает в аэробных и анаэробных условиях благодаря консорциуму бактерий и грибов родов *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Proteus*, *Penicillium* и *Mucor* (Сапожников, 1973; Емцев, Мишустин, 2014). Аммонификация может быть активна в достаточно широком диапазоне температур, реакции почвенного раствора, влажности, плотности почвы (Третьякова, 1977; Каранкевич, Семененко, 2013; Кидин, 2015; Новоселов, 2015;

Филлипова, 2023). Оптимальный температурный режим для данного процесса лежит в пределах от +15 до +27°C. При этом аммонификационная способность почвы может активироваться уже при -5°C и продолжаться при температуре +70°C, в зависимости от почвы и состава почвенной микрофлоры (Каранкевич, Семененко, 2013; Кидин, 2015, Новоселов, 2015; Филлипова, 2023; Runge, 1983). Развитие микроорганизмов, участвующих в процессах минерализации, тесно связано с реакцией почвенной среды, ввиду их неодинаковой требовательности к условиям обитания. Для деятельности гнилостных бактерий рН почвенного раствора лежит в диапазоне от 4,5 до 9,0 единиц, оптимум – 7,0 единиц. Для плесневых грибов интервал значений рН среды шире и начинается от 1,5 единиц, заканчивается при 9,0 единицах, оптимум также около 7,0 единиц (Сапожников, 1973). Оптимальная влажность для развития и деятельности аммонифицирующих микроорганизмов соответствует 20% (или 60% от полной влагоемкости почвы). При этом плесневые грибы способны развиваться при влажности 20% от полной влагоемкости. Плотность почвы не имеет сильно выраженного значения. Интенсивность аммонификации существенно не изменяется даже при плотности 2,0 г/см³ (Сапожников, 1973; Новоселов, 2015).

В почве аммоний, образующийся в результате разложения органических остатков и (или), поступивший с удобрениями, достаточно быстро окисляется бактериями нитрификаторами до нитратной формы. Процесс окисления аммонийного азота до азотистой, а затем и азотной кислоты под воздействием почвенных облигатных аэрофильных микроорганизмов называют нитрификацией (Сапожников, 1973; Кудеяров, 1989; Кореньков, 1999; Емцев, Мишустин, 2014; Осипов, 2016; Isobe et al., 2011). Нитрификация аммонийного азота осуществляется в аэробных условиях в несколько этапов. На первом этапе за счет представителей родов *Nitromonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrio* происходит окисление аммония до нитрита (Сапожников, 1973; Емцев, Мишустин, 2014; Осипов, 2016; Филлипова, 2023; Isobe et al., 2011). Второй этап заключается в продолжении окисления нитритного азота до нитратного благодаря деятельности бактерий рода *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus*. Нитрифицирующие бактерии

наиболее активно развиваются в нейтральной или слабощелочной реакции среды, при этом оптимум лежит в пределах 7,5-8,0 единиц рН (Кореньков, 1999; Осипов, 2016). Нитрификация зависит от температуры в большей мере, чем аммонификация. Оптимальный температурный интервал для протекания данного процесса составляет +25 – +30°C. При исследованиях в различных почвенно-климатических зонах было установлено, что процесс нитрификации может активно проходить и при температуре меньше +10°C (Сапожников, 1973; Кореньков, 1999; Осипов, 2016; Филлипова, 2023; Mohib et al., 2024). С.И. Новоселов (2015) в своем исследовании по установлению оптимальных условий для аммонифицирующих и нитрифицирующих процессов на дерново-подзолистой почве наблюдал наибольшее содержание нитратного азота при температуре +15°C. В этом же исследовании изучалось влияние влажности и плотности почвы на интенсивность процесса нитрификации. Ученым было показано, что бактерии нитрификаторы очень чувствительны к плотности почвы. При увеличении плотности дерново-подзолистой почвы с 1,1 г/см³ до 2,0 г/см³ количество нитрифицирующих микроорганизмов снижалось почти в 8 раз, что закономерно объясняется ухудшением аэрации почвы. Таким образом, для нитрификаторов наиболее оптимальна плотность почвы равная 1,1-1,2 г/см³. Влагообеспеченность почвы в нитрификационной активности почвы также играет немаловажную роль. Успешное развитие микроорганизмов-нитрификаторов наблюдается при влажности 20-25% (или 60-70% от полной влагоемкости) (Сапожников, 1973; Новоселов, 2015; Осипов, 2016). Избыток влаги отрицательно влияет как на нитрифицирующих, так и на аммонифицирующих бактерий, так как ухудшаются не только условия аэрации, но и накапливаются аммиак и другие восстановленные соединения, повышенная концентрация которых губительно влияет на бактерий, участвующих в процессе минерализации (Сапожников, 1973).

Нитратная форма минерального азота считается самой подвижной. Снижение концентрации нитратов в почве может происходить в результате: вымывания из корневой зоны в нижние горизонты; за счет денитрификации в виде газообразных

продуктов; при использовании растениями; за счет иммобилизации в органические соединения азота (Кореньков, 1999; Гамзиков, 2013).

В основном нитрат-ионы аккумулируются в слое почвы 0-60 см. Однако их вертикальное распределение по профилю почвы в значительной мере зависит от интенсивности осадков, типа почвы, гранулометрического состава, глубины промачивания, наличия растительности. В своих исследованиях Гамзиков Г.П. отмечал, что вертикальное перемещение нитратов происходит только при условии их высокого содержания в почве и избыточном увлажнении. Как правило, большая концентрация нитратов отмечается в почвах с высоким плодородием и потенциалом к минерализации (чернозем, темно-серая лесная, темно-каштановая, лугово-черноземная) или при внесении повышенных доз азотных удобрений (Гамзиков, 2013).

Интенсивность выщелачивания (вымывания) нитратного азота из почвы зависит от формы азотного удобрения. По степени выщелачивания из почвы Кореньков Д.А. (1999 г.) распределял азотные удобрения следующим образом: нитратные формы > амидные > аммонийные > цианамидные.

Максимальные потери нитратного азота из почвы происходят осенью и весной. Тем не менее в среднем по Европе потери азота минеральных удобрений в результате выщелачивания не превышают 10%, хотя в отдельных случаях могут достигать и 90% (на почвах легкого гранулометрического состава) (Соколов, Семенов, 1992; Сабиров и др., 2015). Превышение предельно допустимой концентрации нитратов (45 мг/л) в источниках питьевого водоснабжения представляет угрозу для здоровья человека (Соколов и др., 1990; СанПиН 1.2.3685-21). Загрязнение нитратами поверхностных вод инициирует процесс эвтрофикации, который сопровождается чрезмерным развитием фитопланктона, нарушением окислительно-восстановительных процессов, снижением содержания растворенного кислорода и формированием анаэробных зон, влекущих за собой деградацию биоценозов и потерю биоразнообразия (Даценко, 2007; Педько и др., 2021; Волкова, Лапушкин, 2025). Как правило, при внесении азотных туков в рекомендованных дозах (от 30 до 90 кг/га д.в.), азот удобрений достаточно быстро

закрепляется в почве микроорганизмами в результате процесса иммобилизации, что в свою очередь предотвращает миграционные потери нитратов (Гамзиков, 2013).

Иммобилизация. Иммобилизация (ассимиляция) азота представляет собой процесс преобразования почвенными микроорганизмами минеральных форм (аммонийной и нитратной) азота в органические, за счет включения их в микробную биомассу и последующего закрепления в составе органического вещества почвы (Смирнов, 1970, 1977, 1982; Сапожников, 1973; Кудеяров, 1989; Гамзиков, 2013). Согласно литературным данным, иммобилизацию осуществляют все почвенные микроорганизмы, способные усваивать аммиачный и нитратный азот (Сапожников, 1973; Song et al., 2021).

Иммобилизация и минерализация азота в почве происходят постоянно и одновременно. Интенсивность иммобилизации зависит от водно-воздушно-теплового режима, содержания безазотистого органического вещества, соотношения C:N, дозы и формы азотного удобрения, способа внесения удобрения. Иммобилизация азота, как и в случае с минерализацией, активно протекает при температуре +25°C, хорошей аэрации почвы, и влажности около 60% от полной влагоемкости. Для почвенных микроорганизмов оптимально соотношение C:N равное 20-25 и содержание азота в почве 2%. При данных условиях весь минерализовавшийся азот органического вещества используется микроорганизмами. При недостатке органического вещества (C:N<20), и содержании азота более 2%, разложение органического материала сопровождается частичным высвобождением азота в минеральной форме. Обратная ситуация наблюдается в случае избытка органического вещества в почве и недостатка азота. В таком случае микроорганизмы потребляют не только азот, содержащийся в органическом веществе, но и все минеральные формы азота, содержащиеся в почве, в том числе и минеральный азот удобрений. Внесение органических материалов, богатых клетчаткой (например, соломы), в почву с низким содержанием азота усиливает процесс закрепления минеральных соединений азота почвы и удобрений, что впоследствии ухудшает питательный режим растений. Полевые и

вегетационные исследования многочисленных ученых показали, что содержание биологически закрепленного азота в почве может варьироваться от 20 до 80% от внесенного количества вместе с минеральными удобрениями. Аммонийные формы азотных удобрений в наибольшей степени подвержены биологическому закреплению в почве. При внесении азотных удобрений вразброс доля иммобилизованного азота удобрений почти в два раза больше, чем при локальном внесении (Сапожников, 1973; Смирнов, 1977; Кудеяров, 1989; Соколов, Семенов, 1992; Семенов, 2020; Vinther et al., 2004; Portugal et al., 2020; Cao et al., 2021; Lyu et al., 2024).

Тем не менее иммобилизация минерального азота в почве играет решающую роль в обеспечении растений азотом и может рассматриваться как положительный процесс, препятствующий непроизводительным потерям азота удобрений (Кудеяров, 1989; Li et al., 2021; Cao et al., 2021; Lyu et al., 2024). Иммобилизованный азот считается наиболее активной фракцией органического вещества почвы и со временем становится частично доступным для растений благодаря его реминерализации (Мамай, 2014). Реминерализация – это процесс минерализации иммобилизованного азота (Семенов, 2020). Именно от интенсивности реминерализации зависит последствие азотных удобрений. По данным многочисленных полевых и вегетационных исследований было установлено, что использование растениями иммобилизованного азота в первый год последствия составляет около 3-5% от внесенного и около 8% от закрепившегося в почве, на второй год последствия – 1-2% от внесенного и 3-4% от закрепившегося (Смирнов, 1977; Кудеяров, 1989).

Однако в межвегетационный период (осенью и ранней весной) в результате реминерализации теряется около 20-30% иммобилизованного азота. Потери азота в осенне-весенний период из иммобилизованного состояния чаще всего обусловлены денитрификацией (Кудеяров, 1989).

Исследования показывают, что абсолютное количество минерализованного азота почвы находится в прямо пропорциональной зависимости от содержания иммобилизованного азота удобрений. Известно также, что внесение азотных

удобрений нарушает минерализационно-иммобилизационное равновесие, изменяя энергетический статус почвы. Это приводит к усилению минерализации органического вещества почвы, в результате чего образуется так называемый «дополнительный доступный азот» или «экстра-азот», который растения могут усваивать (Турчин, 1972; Сапожников, 1973; Соколов, Семенов, 1992; Jenkinson et al., 1985). Однако усиление минерализационного процесса при систематическом применении азотных минеральных удобрений не только истощает запасы органического вещества и естественного почвенного азота, но и приводит к увеличению газообразных потерь азота (Кудеяров 1989; Мамай, 2014).

Денитрификация. Если иммобилизация представляет собой процесс аккумуляции минеральных форм азота в составе органических соединений, которые с течением времени вновь становятся доступны для растений, то процессы денитрификации приводят к безвозвратным потерям азота почвы и удобрений (Сапожников, 1973).

В результате денитрификации в атмосферу ежегодно поступает в среднем около 300 млн. т азота (Звягинцев и др., 2005; Егоров, 2008; Aneja et al., 2019). Около сотни лизиметрических и микрополевых исследований различных научно-исследовательских учреждений России показали, что в результате денитрификации в среднем теряется 30% азота, вносимого в почву с различными формами азотсодержащих удобрений (Кудеяров, 1989; Кореньков, 1999; Гамзиков, 2013).

Прямая (биологическая) денитрификация протекает в анаэробных условиях и осуществляется многими видами бактерий, грибов и дрожжей. Выделяют также косвенную денитрификацию (хемоденитрификацию), которая обуславливается восстановлением нитритов и нитратов почве в результате ряда химических реакций. Процесс денитрификации состоит из серии реакций, в которых, нитратный азот последовательно через образование промежуточных продуктов (нитрита – NO_2^- , оксида азота – NO , закиси азота – N_2O), восстанавливается до конечного продукта – молекулярного азота (N_2) (Сапожников, 1973; Смиронов, 1977, 1982; Тихонов, Климентьев, 2005; Senbayrama et al., 2012; Осипов, 2016; Mohib et al., 2024; Lv et al., 2024).

Для развития денитрификации необходимым условием является наличие в почве нитратов и доступных микроорганизмам органических веществ (Соколов, Семенов, 1992; Кидин и др., 2008). Интенсивность биологической денитрификации в основном зависит от температуры, влажности, степени аэрации, кислотности почвы. Процесс активен уже при температуре +10°C. Однако наиболее интенсивнее он протекает в диапазоне температур +30 – +37°C (Макаров, Патрикеева, 1974; Смирнов, 1982; Соколов, 1992; Кореньков, 1999; Егоров, 2008; Мухина и др., 2015). Наиболее важное значение для денитрификации имеют влажность и аэрация почвы (Соколов, Семенов, 1992; Смирнов, 1977, 1982; Кидин, и др. 2008; Осипов, 2016; Senbayrama et al., 2012). Она может происходить в интервале влажности от 40 до 100 % от полной влагоемкости. Причем в зависимости от типа почв оптимум влажности будет различаться (Кудеяров, 1989; Соколов, Семенов, 1992; Кореньков, 1999; Умаров и др., 2007). В опытах Мухиной И.М. (2015) интенсивность денитрификации на дерново-подзолистой супесчаной почве достоверно возрастала с увеличением влажности почвы и содержания минерального азота. Наиболее активно процесс протекал в варианте с внесением азотных удобрений в подпахотном горизонте почвы, что, по мнению автора связано с вымыванием азота из удобрений вниз по профилю.

В большей степени на процесс денитрификации влияет обогащенность почвы кислородом. В.В. Кидин и В.В. Зенкина (2008) в модельных опытах на дерново-подзолистых почвах показали, что в полностью анаэробных условиях нитратный азот восстанавливается почти в 4 раза быстрее, чем когда в почве содержится 10% или 21% кислорода. Также авторами было отмечено, что при рыхлении почвы, денитрификация нитратов как в аэробных, так и в анаэробных условиях проходила более интенсивно, чем в ненарушенных почвах.

Согласно исследованиям (Смирнов, 1977, 1982; Кудеяров, 1989; Van Cleemput, Patck, 1974) реакция почвенного раствора в меньшей степени влияет на интенсивность денитрификации. Основными лимитирующими факторами денитрификации остаются влажность почвы и содержание органического вещества. П.М. Смирнов (1977) в своих исследованиях отмечал, что в аэробных

условиях при кислой реакции почвенного раствора газообразные потери азота были в 1,5 раза больше, чем при нейтральной. А в анаэробных условиях кислотность почвенного раствора практически не влияла на интенсивность данного процесса.

Известно, что биологическая денитрификация наиболее активно протекает в диапазоне рН от 7 до 8 единиц и в кислых почвах при рН ниже 5 единиц ее интенсивность снижается (Кудеяров, 1989; Умаров и др., 2007). В этом случае на смену биологической денитрификации приходит хемоденитрификация, в результате которой нитриты взаимодействуют с аминокислотами или другими органическими веществами, образуя разнообразные газообразные азотистые соединения (Смирнов, 1977, Кудеяров, 1989; Умаров и др., 2007). Таким образом, реакция почвенного раствора в значительной степени влияет на состав выделяющихся газообразных продуктов.

В условиях пониженной аэрации, повышенной влажности, достаточного содержания органического материала, нейтральной реакции почвенного раствора в результате денитрификации основным конечным продуктом является молекулярный азот (N_2) (Сапожников, 1973; Смирнов, 1977, 1982; Кудеяров, 1989; Умаров и др., 2007; Гамзиков, 2013)

Помимо молекулярного азота в атмосферу могут выделяться закись азота N_2O , а иногда и окись азота NO (Торшин, 1982). Состав, соотношение и интенсивность редукции промежуточных газообразных продуктов (N_xO_y или NO_x) до молекулярного азота зависит от типа и свойств почвы. Торшин С.П. (1982) и Кудеяров В.Н. (2020, 2021) в своих наблюдениях отмечали, что очень часто окислы азота не восстанавливаются до N_2 в результате низких значений рН почвенного раствора, недостатка органического вещества, неполного анаэробнобиозиса. Вследствие чего в составе и соотношении газообразных продуктов, выделяемых из почвы, чаще всего повышается доля закиси азота. Исследования показывают, что более интенсивное восстановление закиси азота происходит на черноземах и дерново-подзолистой почве, менее интенсивно – на каштановой почве, сероземе, красноземе. При этом на дерново-подзолистых почвах выделение и редукция закиси азота очень сильно зависит от степени их окультуренности, содержания

гумуса и биологической активности. На окультуренных, гумусированных и слабокислых почвах основным конечным продуктом денитрификации является N_2 . На бедных и кислых почвах, наоборот, преобладает закись азота (Смирнов, 1982, Завалин, 2022).

Закись азота играет важную роль в формировании парникового эффекта и считается одним из самых мощных и опасных парниковых газов из-за своей активности и озоноразрушающей способности в стратосфере (Мухина и др., 2015; Кудеяров, 2020; Норов и др., 2023; Denisova et al., 2019). Несмотря на то, что в атмосфере закиси азота значительно меньше, чем углекислого газа и метана, она характеризуется высокой радиационной активностью. По данным Всемирной метеорологической организации (англ. WMO) за 2024 г. на долю закиси азота приходится около 6% радиационного воздействия. Озоноразрушающее свойство закиси азота заключается в том, что под действием фотореакций из нее образуется атомарный кислород и окись азота. Окись азота впоследствии участвует как катализатор в реакции озона с атомарным кислородом в результате чего образуются две молекулы кислорода. Потенциал глобального потепления для закиси азота за 100-летний период почти в 300 раз выше, чем углекислого газа, а продолжительность жизни в атмосфере составляет по разным источникам 114-121 год (Кидин, Прасолова, 2014, Завалин и др., 2015; Кудеяров, 2020; Норов и др., 2023; Волкова, Лапушкин, 2024a; Ravishankara et al., 2009; Garzón, Cárdenas, 2013; IPCC, 2013; Shcherbak, 2014; Aneja et al., 2019; Sikora et al., 2020; Mohib et al., 2024). Ежегодно содержание закиси азота в атмосфере возрастает на 0,2-0,3 % (Lewu et al., 2021). Согласно оценкам экспертов FAO, к 2030 году выбросы закиси азота в результате сельскохозяйственной деятельности увеличатся на 35-60% в связи с ростом применения азотных удобрений и выхода навоза (Lenka et al., 2016).

Сельскохозяйственная деятельность является основным источником выбросов закиси азота в атмосферу. До 50-60 % общего глобального потока закиси азота зависит от объемов внесения азотсодержащих минеральных и органических удобрений (Турчин, 1972; Кудеяров 2020; Meybeck, Gitz, 2012; Buchkina et al., 2013; Shcherbak et al., 2014, Aneja et al., 2019).

Для оценки выбросов закиси азота в результате внесения азотсодержащих органических и минеральных удобрений рассчитывают эмиссионный фактор ($\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$). Величина эмиссионного фактора изменяется в широких пределах и зависит от множества переменных: дозы, вида и способа внесения азотсодержащих удобрений, возделываемой культуры, физико-химических свойств почвы, содержания азотистых соединений и органического вещества в почве, климатических условий и др. (Кудеяров, 2021; Завалин, 2023; Lesschen et al., 2011; Ball et al., 2014; Charles et al., 2017; Krauss et al., 2017; Rashti et al., 2017; Hoang et al., 2018; Rizhiya et al., 2019).

На основании многочисленных полевых измерений выбросов закиси азота после внесения органических и минеральных азотсодержащих удобрений были установлены средние значения эмиссионного фактора закиси азота, которые варьируются от 0,8 до 1% (Кудеяров, 2020, 2021). Межправительственная группа экспертов по изменению климата (англ. IPCC) приняла за стандартный эмиссионный фактор значение, равное 1% (0,01) от дозы азота, внесенного в почву. То есть, это значит, что с каждого внесенного кг азота в почву с удобрениями теряется 0,01 кг азота в виде закиси азота (N_2O). Однако позже стандартный $\text{ЭФ}_{\text{N}_2\text{O}}$ был скорректирован до 1,25% (0,0125). В Российской Федерации стандартный эмиссионный фактор составляет 1,37% (0,0137) (Кудеяров, 2020, 2021; Завалин, 2023; Senbayrama et al., 2012, Shcherbak et al., 2014). Тем не менее, зачастую, получаемые в ходе исследований значения эмиссии закиси азота существенно ниже стандартных показателей. Исследования показывают, что в России наибольший эмиссионный фактор закиси азота, как правило, отмечается в посевах пропашных и овощных культур (от 0,6 до 2 %), а при возделывании зерновых он составляет около 0,7%. (Кудеяров, 2021).

Таким образом, биологические процессы – это основа трансформации азота в почве. Направленность и интенсивность биологических процессов во многом зависит от состава и численности микроорганизмов, от типа почвы, степени ее окультуренности, гранулометрического состава, физико-химических свойств, влажности, температуры, от формы, дозы и способа внесения азотного удобрения

и прочих факторов биотической и абиотической природы. Биологические процессы метаболизма азота в почве во многом определяют плодородие почвы, эффективность азотных удобрений и величину потенциальных потерь азота из почвы и удобрений.

Согласно вышеуказанными источникам литературы основными причинами непроизводительных потерь азота из почвы и удобрений по существу являются 3 процесса: выделение аммиака при аммонификации; вымывание из пахотного горизонта нитратного азота, поступившего в почву с удобрениями или образовавшегося в результате нитрификации; улетучивание газообразных продуктов трансформации азота удобрений вследствие денитрификации.

Решение вопросов снижения потерь азота из почвы и повышения эффективности азотных удобрений остается одной из наиболее актуальных и приоритетных задач современной агрохимии. Умелое управление внутрипочвенными процессами азотного цикла, совершенствование форм азотных удобрений и техники их внесения может способствовать не только повышению эффективности использования удобрений, но и улучшению экологической обстановки окружающей среды.

1.3 Производство и применение удобрений пролонгированного действия как перспективный способ снижения потерь азота и повышения эффективности азотных удобрений

На протяжении столетия неизменными задачами агрохимической промышленности является совершенствование выпускаемых удобрений и их производства. Решение этих задач сопряжено с проблемой повышения эффективности удобрений и минимизации негативных воздействий на окружающую среду. Эти вопросы особенно остро стоят перед производителями азотных удобрений. Популярными среди агропроизводств традиционные формы азотных туков (удобрения быстрого действия) часто оказываются недостаточно эффективными из-за потерь азота в результате ряда биологических процессов,

постоянно происходящих в почве (Волкова, 2023, 2024, 2025а; Волкова, Лапушкин 2024а,б, 2025; Лапушкин и др., 2024; Хузиахметов и др., 2019, 2024; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021; Patil, 2023). По обобщенным данным коэффициент использования азота удобрений в среднем составляет 30-50% от внесенного количества, остальная часть подвергается трансформации и миграции в окружающую среду различными путями (Кореньков,1982; Сабилов и др., 2015; Цыбулько, 2018; Завалин, Соколов, 2019; Завалин, 2022; Wu, 2011; Xiaoyu et al., 2013; Versino et al., 2019; Iftime et al., 2019).

Таким образом, вопрос о повышении агрономической эффективности и экологической безопасности традиционных азотных удобрений по сей день требует особого внимания со стороны ученых-агрохимиков, разработчиков и производителей удобрений.

Стремление производителей азотных туков повысить эффективность своей продукции привело к появлению в агрохимической промышленности нового перспективного направления – производство удобрений пролонгированного действия (Смирнов, 1987; Мухина и др., 2021; Волкова, Лапушкин, 2024а; Broschat, 1996).

Удобрения пролонгированного действия (длительно действующие) представляют собой специальный тип удобрений, элементы питания из которых высвобождаются и трансформируются в доступные для растений формы постепенно, обеспечивая тем самым равномерное и продолжительное питание в течение периода вегетации (Мухина и др., 2021; Боровков, Демченко 2024; Trenkel, 2010; Patil, 2023).

В настоящее время накопилось большое количество исследований, показывающих, что азотные удобрения пролонгированного действия повышают урожай сельскохозяйственных культур или сохраняют его на прежнем уровне при снижении дозы агрохимиката на 20-30% от рекомендуемой нормы внесения «быстродействующего» удобрения (Сабилов и др., 2015; Shaviv, 2005; Trenkel, 2010; Yang, et.al, 2011; Lewu et al., 2021).

Изначально промышленность удобрений пролонгированного действия была направлена исключительно на совершенствование азотных удобрений. Однако со временем в их числе стали появляться поликомпонентные продукты, содержащие

различные макро- и микроэлементы, а также органическое вещество (Бамбалов, Соколов, 2020; Мухина и др., 2021; Лапушкин, 2023b).

Вместе с тем наиболее широким ассортиментом, по-прежнему, отличаются азотные удобрения пролонгированного действия, в особенности продукция на основе карбамида (мочевины) (Афанасьев и др., 2017; Козел, 2020; Мухина и др., 2021; Волкова, Лапушкин, 2025; Shaviv, 2005; Trenkel, 2010; Dubey, Mailapalli, 2019; Achilea, 2021; Lawrencía et al., 2021).

Среди азотных удобрений в твердой форме карбамид (мочевина) снискал мировую популярность благодаря более простой технологии производства, высокой концентрации легкоусвояемой формы азота в составе удобрения (46% N), хорошим физико-химическим свойствам, меньшим затратам при хранении и транспортировке (Величко, Фанда, 2016; Баранова, 2019; Барабанщикова, Филисюк, 2023; Волкова, Лапушкин, 2025; Dubey, Mailapalli, 2019; Achilea, 2021). С экономической точки зрения карбамид является одним из наиболее важных коммерчески доступных азотных удобрений (Yamamoto, 2016). По данным Международной ассоциации производителей удобрений (IFA) на 2023 год карбамид занимает первое место среди основных применяемых форм азотных удобрений в мире. Ежегодное мировое потребление мочевины составляет около 200 млн. т (IFA, 2023). В России, хотя карбамид и уступает по объему применения аммиачной селитре, его востребованность в агропромышленном комплексе (АПК) остается довольно высокой. Согласно данным Российской ассоциации производителей удобрений (РАПУ) за 2024 и 2025 гг. объем приобретения мочевины агропромышленным комплексом составляет около 6 % от общего количества потребляемых удобрений.

При всех достоинствах карбамид наиболее подвержен газообразным потерям азота. Коэффициент использования азота карбамида в среднем составляет 30-60% (Завалин, Соколов, 2019; Sempeho et al., 2015). Как правило, после внесения карбамида в почву он достаточно быстро подвергается гидролитическому разложению под действием фермента уреазы с образованием аммиака и углекислого газа. Скорость процесса превращения карбамида во многом зависит от

температуры, влажности и реакции почвенного раствора, содержания органического вещества в почве, своевременности заделки удобрения. При повышении температуры окружающей среды, рН почвенного раствора, влагообеспеченности почвы, несвоевременной заделке удобрения потери азота из карбамида существенно возрастают. При температуре +30°C и влажности почвы более 50% от полной влагоемкости мочевины полностью разлагается до аммиака и углекислого газа за сутки (Кореньков, 1976; Визирская и др., 2020). Недостаток влаги в совокупности с высокой температурой также усиливает процесс гидролиза мочевины (Trenkel, 2010). В среднем около 40-50% свободного аммиака, образующегося из мочевины, испаряется, оставшаяся часть – закрепляется почвой. Закрепившийся аммонийный азот может подвергаться дальнейшей трансформации благодаря деятельности нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий. Образующиеся формы азота также могут теряться из корнеобитаемого слоя (Сабиров и др., 2015; Козел, 2020; Волкова, Лапушкин, 2024a,b, 2025; Волкова, 2023, 2024, 2025a,b; Naz et al., 2016; Dubey, Mailapalli, 2019; Versino et al., 2019; Gil-Ortiz et al., 2020; Messiga et al., 2020; Achilea, 2021; Lawrencina et al., 2021).

Таким образом, агрономическая и экономическая эффективность самого высококонцентрированного твердого азотного удобрения в зависимости от почвенно-климатических условий сильно варьируется и зачастую оказывается ниже ожидаемой. Поэтому карбамид является основным объектом для модернизации среди азотных агрохимикатов пролонгированного действия.

На мировой арене доля потребления удобрений пролонгированного действия не превышает 1%, что, как правило, связано с их высокой стоимостью (Morgan et al., 2009; Trenkel, 2010; Naz et al., 2016; Lewu et al., 2021; IFA, 2023; Волкова, 2023; Волкова, Лапушкин, 2024a,b).

Настоящим производственным гигантом удобрений пролонгированного действия по праву считается Китай. На долю Китая приходится около 40% общемирового производства данного типа удобрений. Компания Kingenta является одним из ведущих китайских производителей, специализирующихся на выпуске удобрений пролонгированного действия. В год Kingenta производит около 2

миллионов тонн таких удобрений. Помимо Китая крупными производителями удобрения пролонгированного действия являются Индия (Gujarat State Fertilisers Company), США (Agrium Advanced Technologies), Канада (Koch Agronomic Services), Германия (BASF) (Achilea, 2021; Vamatov, 2024).

Общемировые объемы производства и потребления удобрений пролонгированного действия не известны. Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) и Международной ассоциацией производителей удобрений (IFA) не ведется статистический учет данной категории агрохимикатов.

В России также нигде не представлены статистические данные по производству и применению удобрений пролонгированного действия, что затрудняет объективную оценку масштабов их применения по стране. Известно лишь, что на территории Российской Федерации в качестве удобрений пролонгированного действия в «Реестре пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации» зарегистрировано около 10 продуктов (примеры: Нитроаммофоска ИНТЕК, производства – АО Невинномысский Азот; Сульфоаммофос ИНТЕК, производства – ООО ЕвроХим-БМУ; Удобрение комплексное минеральное стекловидное пролонгированного действия Агровитаква – АВА, производства – ООО «ВИТА-АВА»; Удобрение контролируемого высвобождения Осмокот, производства – Эверрис Интернейшнл Б.В. и др.).

Среди всего ассортимента удобрений пролонгированного действия можно выделить три основные и наиболее распространенные группы продуктов:

- медленнодействующие удобрения или удобрения с медленным (замедленным) высвобождением питательных веществ (с англ. «slow-release fertilizers», аббревиатура – SRFs);

- удобрения контролируемого действия или удобрения с контролируемым высвобождением питательных веществ (с англ. «controlled-release fertilizers», аббревиатура – CRFs);

- стабилизированные удобрения или удобрения с добавлением ингибиторов уреазы и нитрификации (с англ. «stabilized fertilizers», аббревиатура – SFs).

Однако данное разделение является условным. В научной литературе (Shaviv, 2005; Trenkel, 1997, 2010; Fu et al., 2018; Lawrencía et al., 2021) предложено множество вариантов классификации удобрений пролонгированного действия, основанных на различных критериях: механизме высвобождения, химической природе активного компонента, способе производства и др. Несмотря на это, единая унифицированная классификация таких удобрений до настоящего времени отсутствует в международной практике, что затрудняет их сравнительный анализ и стандартизацию.

1.3.1 Удобрения с замедленным и контролируемым высвобождением элементов питания: механизм действия, модификации, эффективность

До недавнего времени термины «медленнодействующие удобрения» и «удобрения контролируемого действия» применялись взаимозаменяемо (Lawrencía et al., 2021). Согласно мнению специалистов Ассоциации американских должностных лиц по контролю за растительными продуктами питания (AAPFCO) – между медленнодействующими удобрениями и удобрениями контролируемого действия никакой разницы нет (Trenkel, 2010). Некоторые ученые (Trenkel, 1997; Shaviv, 2005; Sempeho et al., 2014; Fu et al., 2018; Lawrencía et al., 2021) в своих работах отмечают, что удобрения контролируемого действия являются разновидностью медленнодействующих удобрений. Позже два этих термина стали различать.

Согласно Международному стандарту ISO 8157:2015 ***медленнодействующее удобрение*** – это удобрение, у которого, вследствие гидролиза и/или биодegradации и/или ограниченной растворимости, доступность питательных элементов для растений растянута в течение некоторого периода времени по сравнению со стандартными быстрорастворимыми удобрениями, такими как, сульфат аммония, нитрат аммония или мочевина. Как пишет Yamamoto et al., 2016, основная роль медленнодействующих удобрений заключается в обеспечении растений элементами питания на более длительный период времени,

чем при применении традиционных удобрений. Однако, стоит отметить, что кинетика высвобождения элементов питания из медленнодействующих удобрений полностью определяется почвенно-климатическими условиями. Поэтому точно или приблизительно предсказать интенсивность и длительность поступления элементов питания в почву при применении таких форм удобрений невозможно (Shaviv, 2000; Trenkel, 2010; Liu et al., 2014; Lakshani et al., 2023; Govil et al., 2024; Priya et al., 2024).

Медленнодействующие удобрения условно подразделяются на органические (продукты конденсации мочевины с альдегидами), неорганические соединения с низкой растворимостью, удобрения с физическим барьером (Мухина и др., 2021; Lawrenciа et al., 2021).

Наиболее известными формами удобрений с замедленным высвобождением элементов питания являются низкорастворимые органические соединения мочевины, которые еще называют микробразлагаемыми азотными удобрениями. В эту группу входят мочевино (карбамидо)-формальдегидные удобрения: уреаформ, метиленмочевины с различной длиной полимерной цепи, изобутилмочевина, оксамид, меламин, мочевино-триазон, кротонилидендимочевина и др. (Пироговская, 2020; Хузиахметов и др., 2006, 2024; Шаповал, Боровик, 2021; Мухина и др., 2021; Clapp, 2001; Trenkel, 2010; Lawrenciа et al., 2021). Мочевино-формальдегидные удобрения стали одними из первых азотных медленнодействующих удобрений, вышедших в промышленное производство, и до сих пор остаются популярными продуктами среди удобрений пролонгированного действия. К примеру, в США на долю мочевино-формальдегидных удобрений приходится порядка 40% от общего объема производства удобрений пролонгированного действия, в Китае – около 30% (Хузиахметов и др., 2006; Мухина и др., 2021; Шаповал, Боровик, 2021; Fu et al., 2018; Achilea, 2021). Несмотря на свою повышенную стоимость мочевино-формальдегидные удобрения достаточно эффективные. К примеру, в полевом опыте, проведенном Шаповал О.А. и Боровик Р.А. (2021) на яровой пшенице, благодаря улучшению питательного режима на фоне внесения мочевино-формальдегидного удобрения с цинком

прибавка урожая составила более 20% по сравнению с контролем. По данным Сабирова А.А. и др. (2015), карбамидоформальдегидные удобрения позволяют сокращать дозу внесения азотных удобрений до 30% несмотря на то, что они на 10% дороже традиционной формы мочевины. Также при применении такой формы мочевины допускается исключение азотных подкормок овощных и зерновых культур, что существенно снижает затраты и приводит к снижению себестоимости единицы продукции.

К группе медленнодействующих удобрений на основе неорганических соединений с низкой растворимостью относятся: полифосфат мочевины, металл-аммонийфосфаты, частично подкисленные фосфатные породы (Авдонин, Вольфкович, 1972; Кравец, 1984; Каноатов и др., 2020; Пироговская, 2020; Trenkel, 2010). Среди этой группы некогда распространенным был полифосфат мочевины. Еще в 70-е годы Каплуновой Л.С. и Ампилоговым Н.Е. в вегетационном опыте с яровой пшеницей было показано превосходство полифосфата мочевины в сравнении с обычной ее формой. Так, в вегетационном опыте с яровой пшеницей прибавка урожая зерна в варианте, где применялся полифосфат мочевины, составляла 19% по сравнению с вариантом, где вносилась стандартная форма мочевины.

Механизм действия удобрений на основе низкорастворимых органических соединений азота и слаборастворимых неорганических соединений основан на постепенном высвобождении питательных веществ в почве: в первом случае – за счет химического гидролиза и микробной минерализации полимерной матрицы, во втором – за счет растворения под действием кислот, выделяемых корнями или почвенными микроорганизмами. Интенсивность высвобождения в обоих случаях зависит от температуры, влажности и микробиологической активности почвы. (Авдонин, Вольфкович, 1972; Trenkel, 2010; Sempeho et al., 2014; Fu et al., 2018).

Медленнодействующие удобрения с физическим барьером представляют собой капсулированные (удобрения с покрытием или окклюзированные удобрения) и матричные формы (питательные вещества заключены в матрицу). Однако согласно современным литературным источникам (Trenkel, 2010; Sempeho et al.,

2014; Lawrencía, et al., 2021) большинство модификаций капсулированных и матричных удобрений причисляют к удобрениям контролируемого действия.

Удобрение контролируемого действия – это удобрение, из которого высвобождение питательных веществ происходит контролируемо и соответствует заявленным скорости и времени высвобождения при определенной температуре (ISO 8157:2015). У таких удобрений скорость, закономерность и продолжительность высвобождения питательных веществ заранее задаются на этапе производства (Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021).

Механизм высвобождения элементов питания из удобрений контролируемого действия основан на диффузии растворенных веществ, осмосе, набухании. Диффузия растворенных питательных веществ объясняется перемещением ионов из зоны высокой концентрации (внутри гранулы удобрения) в зону низкой концентрации (в почвенный раствор) через проницаемое или полупроницаемое покрытие. Этот процесс протекает пассивно и зависит от градиента концентрации, температуры и свойств покрытия. Осмос обеспечивает поступление воды внутрь гранулы, где она растворяет питательные вещества, формируя насыщенный раствор, поддерживает осмотическое давление и тем самым способствует диффузии. В удобрениях с гидрофильными покрытиями дополнительно реализуется механизм, управляемый набуханием: при контакте с водой гидрофильное покрытие поглощает влагу, увеличивается в объеме и становится пористым или гелевым. Это приводит к постепенному увеличению проницаемости оболочки, через которую затем происходит диффузия питательных веществ. Скорость высвобождения в этом случае зависит от степени гидрофильности материала, его толщины, температуры и влажности почвы. Таким образом, осмос инициирует процесс, набухание регулирует проницаемость покрытия, а диффузия обеспечивает непосредственное поступление элементов питания в почву (Fu et al., 2018; Lawrencía et al., 2021; Patil, 2023; Lakshani et al., 2023).

Особенностью удобрений контролируемого действия является нелинейный характер высвобождения элементов питания в течение заявленного периода пролонгации. Чаще всего динамика высвобождения питательных веществ из

удобрений контролируемого действия характеризуется полупараболической или сигмоидальной (S-образная) кривыми (рис. 1) (Broschat, 1996; Shaviv, 2001). Оптимально, когда характер высвобождения элементов питания из удобрения подчиняется S-образному графику (Shaviv, 2001; Du et al., 2006; Trenkel, 2010; Xiao et al., 2017; Lakshani et al., 2023).

Процесс высвобождения элементов питания из удобрений контролируемого действия делят на 3 этапа: первый этап – период задержки, когда высвобождение элементов питания практически не наблюдается; 2 этап – период постоянного высвобождения элементов питания; 3 этап – период снижения высвобождения элементов питания (период разложения).

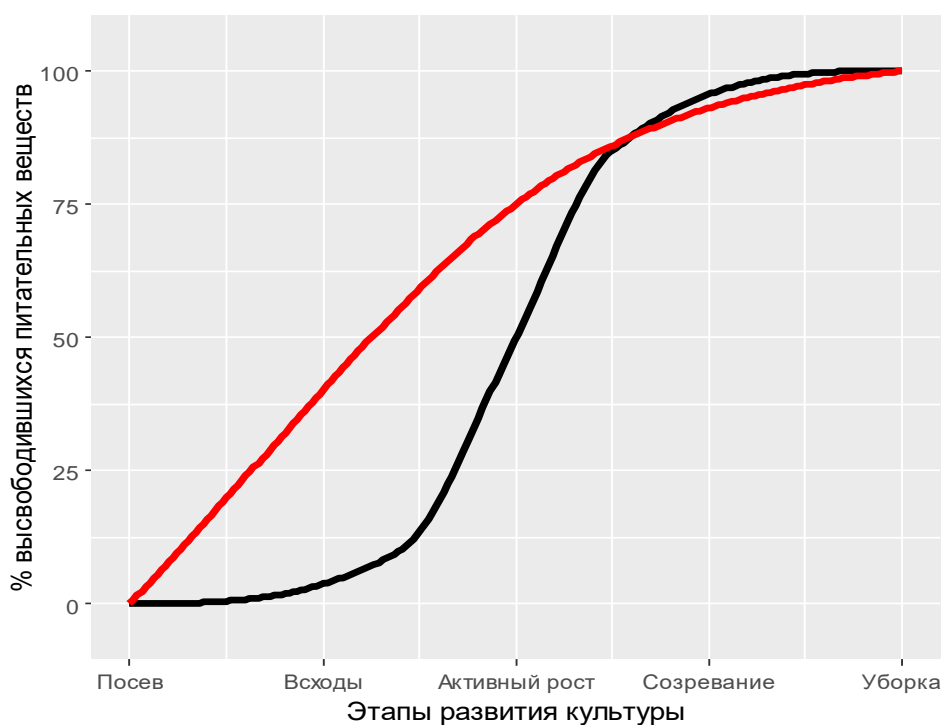


Рисунок 1 – Параболический (красная линия) и сигмоидальный (черная линия) характер высвобождения элементов питания из удобрений контролируемого действия

В так называемый «период задержки» происходит набухание покрытия или проникновение воды сквозь поры или трещины покрытия внутрь гранулы. Требуется значительное количество времени для заполнения внутренних полостей необходимым объемом воды и достижения устойчивого соотношения между водой, проникающей в гранулу, и питательными веществами, покидающими ее. На втором

этапе по мере того, как вода продолжает проникать внутрь гранулы, в раствор переходит все больше питательных веществ, повышается осмотическое давление, накапливается критический объем насыщенного раствора. Наступает период интенсивного выхода питательных веществ, характеризующийся почти линейным увеличением их концентрации в почвенном растворе.

На завершающем этапе происходит замедление высвобождения вследствие истощения запаса питательного вещества внутри гранулы. Таким образом, суммарная кинетическая кривая приобретает классическую S-образную форму, типичную для процессов, ограниченных диффузией и/или реакцией на поверхности раздела фаз (Broschat, 1996; Shaviv, 2001; Du et al., 2006; Xiao et al., 2017; Lakshani et al., 2023).

Несмотря на то, что при производстве удобрений контролируемого действия динамика и длительность высвобождения элементов питания задается в первую очередь исходя из физиологических потребностей сельскохозяйственных культур, Европейским комитетом по стандартизации (CEN) были подготовлены общие критерии соответствия для данной группы удобрений. Согласно рекомендациям Европейского комитета по стандартизации, удобрения контролируемого действия должны соответствовать трем критериям (Trenkel, 2010; Sempeho et al., 2014; Lawrencja et al., 2021; Patil, 2023):

- при температуре 25°C количество высвободившихся доступных питательных веществ из удобрения за сутки не должно превышать 15%;
- количество высвободившихся доступных питательных веществ из удобрения за 28 дней не должно превышать 75%;
- по крайней мере около 75% питательных веществ из удобрения должны стать доступными в течение заявленного срока (40-360 дней).

То есть основным критерием разделения медленнодействующих и контролируемых удобрений с физическим барьером является предсказуемость кинетики высвобождения элементов питания в определенном временном интервале.

Среди производителей и потребителей удобрений пролонгированного действия капсулированные формы пользуются наиболее широкой популярностью, о чем свидетельствует большое число разнообразных модификаций и исследований. Согласно данным литературы, применение капсулированных форм азотных удобрений обеспечивает прибавку урожая сельскохозяйственных культур в диапазоне от 5 до 60% по сравнению с традиционными формами (Баранова, 2019; Пироговская, 2020; Барабанщикова, Филисюк, 2023; Лапушкин и др., 2023, 2024; Волкова, Лапушкин, 2025; Kiran, et al., 2010; Yang et al., 2011; Zheng et al., 2016; Babar et al., 2019; Gil-Ortiz et al., 2020; Zhao et al., 2023).

При изготовлении капсулированных форм удобрений в качестве физического барьера применяют разнообразные органические и неорганические материалы и их комбинации. Доля материала для покрытия обычно составляет 3-15% от общей массы гранулы (Trenkel, 2010, Yang et al., 2011; Lewu et al, 2021).

К наиболее применимым неорганическим материалам для покрытия относят серу, бентонит, фосфогипс, гидроксипатит, цеолит, аттапульгит, монтмориллонит, галлуазит, глауконит, силикаты, фосфат магния-аммония, фосфат калия-аммония, фосфоритная мука и др. (Баранова и др., 2013; Пироговская, 2020; Козел, 2020; Титова, Семенова, 2021; Лапушкин и др., 2023 a,b; Барабанщикова, Филисюк, 2023; Ibrahim et al., 2014; Babadi et al., 2015; Kottegoda et al., 2017; Yu, 2019; Elhassani et al., 2019; Dubey, Mailapalli, 2019; Hermida, Agustian, 2019; Lawrencina, et al., 2021).

Перечень органических материалов для производства капсулированных удобрений более обширен. В производстве капсулированных удобрений наиболее применимы различные синтетические полимеры (полистирол, полиуретан, полиэтилен, полиэфирсульфон, этиленвинилацетат, поливинилацетат, поливинилиденхлорид), полусинтетические полимеры (гидроксипропилметилцеллюлоза, этилцеллюлоза, карбоксиметилцеллюлоза, гидроксиметилцеллюлоза), растительные полимеры (картофельный крахмал, кукурузный крахмал, маниоковый крахмал), поливиниловый спирт, эпоксидные смолы, воски, гидрогели, канифоли, гидрофобизирующие герметики, масло ним, гуминовые вещества

(Trenkel, 2010; Chen et al., 2018; Sarkar, Sen, 2018; Fu et al., 2018; Lawrencía et al., 2021; Emami et al., 2017; Ye et al., 2020; Bi et al., 2020; Song et al., 2024).

Самой известной и востребованной формой капсулированного удобрения с неорганическим материалом покрытия считается мочеви́на, покрытая серой. Механизм действия данной формы мочеви́ны основан на постепенной диффузии растворенного азота в почву вследствие физического растрескивания и биологической деградации серной капсулы. Мочевину с серным покрытием обычно относят к медленнодействующим удобрениям из-за так называемого «взрывного эффекта». Дело в том, что динамика высвобождения азота из сульфурированной мочеви́ны может значительно изменяться в зависимости от партии удобрения. Если в партии много гранул с поврежденным покрытием, то большинство азота мочеви́ны высвободится сразу после контакта с почвой, что не соответствует критериям CEN. Толстое серное покрытие, наоборот, образует так называемый «эффект замка», в результате чего азот мочеви́ны высвобождается слишком медленно, что также противоречит критериям CEN (Trenkel, 2010; Achilea, 2021; Мухина и др., 2021).

Для улучшения эффективности покрытий на основе неорганических веществ их часто комбинируют с другими неорганическими веществами или с органическими материалами. (Lawrencía et al., 2021).

В своем исследовании Ibrahim, K.R.M. и др. (2014) использовали в качестве покрытия серу и гипс, смешанные в равном соотношении, что в результате существенно снизило затраты на производство удобрения пролонгированного действия и повысило его эффективность. Аналогичные результаты были представлены Babadi, F.E. и др. (2015) при нанесении покрытия на основе гипса и магниевой извести. Kottegoda, N. и др. (2017) благодаря нанотехнологиям разработали наногибридное удобрение на основе мочеви́ны и гидроксиапатита, в котором амидная группа мочеви́ны умеренно связывалась с наночастицами гидроксиапатита. Благодаря этой связи высвобождение азота из наногрида мочеви́ны в водной среде происходило в 12 раз медленнее по сравнению с обычной мочеви́ной.

Согласно литературным данным (Yu, Li, 2019; Lawrencía et al., 2021;) наиболее эффективные покрытия получают при комбинировании неорганического материала и гидрофобизирующего герметика на основе парафина или полиола. К примеру, мочеви́на с покрытием на основе фосфогипса и парафина, разработанная Yu, X. и Li, B. (2019), продемонстрировала превосходные свойства удобрения контролируемого действия и соответствовала всем критериям CEN.

Elhassani, C.E. (2019) с соавторами при создании удобрения пролонгированного действия пропитали раствором мочевины гидроксипатит и затем полученную смесь заключили в лигноцеллюлозную оболочку. Такой способ позволил замедлить высвобождение азота мочевины до 55 дней.

Самыми эффективными считаются покрытия на основе полимеров. Кроме того, они считаются лучшими связующими компонентами для неорганических покрытий. Удобрения с полимерными покрытиями чаще всего относят к группе удобрений с контролируемым высвобождением элементов питания. С помощью полимеров гораздо проще задать необходимый и предсказуемый период пролонгации, так как на высвобождение питательных веществ через полимерную мембрану в большей степени влияют водопроницаемость полимерного покрытия и температура, а не свойства почвы. В свою очередь, водопроницаемость и скорость высвобождения корректируют, изменяя либо толщину покрытия, либо состав и соотношение различных материалов покрытия (Trenkel, 2010).

Dubey, A. и Mailapalli, D.R. (2019) использовали для покрытия мочевины цеолит с добавлением акрилового полимера, благодаря которому скорость высвобождения азота из мочевины в водной среде существенно задерживалась. За первый час исследования из удобрения высвободилось всего 10% азота, за 8 часов – 50%. Pereira, E.I. и др. (2015) для создания мочевины с покрытием на основе бентонитового нанокompозита добавляли гидрофильный или гидрофобный полимеры. Модификация с гидрофильным полимером была успешнее всего. За 8 часов из удобрения высвободилось всего 8% азота.

Yang Y.-C., et al. (2017) изучали мочеви́ну, покрытую термопластичной смолой, с толщиной покрытия 6-10% от массы гранулы. В водной среде при

температуре 25 °С наблюдалось замедленное высвобождение азота: в течение первых двух недель оно было незначительным, затем с 14-го по 140-й день усиливалось и снова замедлялось на завершающем этапе. За 192 дня опыта из гранул высвободилось около 90% азота. В полевых условиях на озимой пшенице кинетика высвобождения была более умеренной. От всходов до фазы кущения из капсулированной мочевины выделилось около 23% азота, после чего интенсивность высвобождения возросла, достигнув к уборке урожая 80-90% от общего содержания азота в гранулах. При этом применение мочевины с контролируемым высвобождением в дозе 150 кг д.в. N/га обеспечило прибавку урожая озимой пшеницы на 6,5% по сравнению с вариантом, где обычную мочевины вносили дробно в дозе 225 кг д.в. N/га. Это подтверждает более высокую эффективность использования азота из модифицированных форм и возможность значительного снижения норм внесения без потери продуктивности.

К числу основных проблем, связанных с применением полимерных покрытий, относятся сложность технологического процесса их нанесения и интенсивность их разложения в почве. Некоторые удобрительные продукты с покрытиями на основе синтетических полимеров по-прежнему представляют проблему, связанную с сохранением и накоплением в почве трудно разлагаемых синтетических веществ. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется исследованиям, направленным на разработку биоразлагаемых и экологически безопасных материалов для капсулирования удобрений (Trenkel, 2010; Lawrencía et al., 2021).

Такие исследователи, как Hermida, L. и Agustian, J. (2019) при разработке покрытия для мочевины использовали смесь бентонита с полимерами растительного происхождения (крахмал и гидроксипропилметилцеллюлоза). При тестировании капсул в водной среде за 8 часов выделилось 25% азота удобрения. По сравнению с синтетическими полимерами растительные аналоги уступают по эффекту сдерживания элементов питания, однако они считаются наиболее безопасными для окружающей среды.

Матричные формы удобрений пролонгированного действия – это удобрения, в которых питательные компоненты распределены в матрице-носителе. В качестве матрицы-носителя используются: каучук, термопластичные полимеры, гидрогели, воск и др. материалы. Обычно для достижения эффекта замедленного высвобождения требуется большое количество материала-носителя (до 40%), из-за этого концентрации питательных компонентов в составе матричных удобрений невысокая. По этой причине удобрения матричного типа не вошли в повсеместное производство и использование. В основном их применяют в личных хозяйствах и домашнем садоводстве (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010; Fu et al., 2018; Lewu et al., 2021; Мухина и др., 2021).

1.3.2 Стабилизированные азотные удобрения: механизм действия, модификации, эффективность

Стабилизированные азотные удобрения – это удобрения, в состав которых входят химические вещества (стабилизаторы азота), ингибирующие процессы микробиологической трансформации амидного или аммонийного азота в почве. Благодаря стабилизаторам азот удобрений сохраняется в доступной форме для растений более длительное время (Trenkel, 2010; Маннхайм, Бергер, 2015; Lewu et al., 2021; Achilea, 2021).

В качестве стабилизаторов применяют две группы веществ: ингибиторы уреазы и нитрификации.

В настоящее время стабилизированные удобрения относят к медленнодействующим удобрениям, хотя в некоторых публикациях их выделяют в отдельную группу (Trenkel, 2010; Fu et al., 2018).

Ингибиторы уреазы – это селективные препараты, которые подавляют в течение определенного периода времени (до 2-х недель) превращение амидного азота мочевины в аммонийный за счет гидролитического действия фермента уреазы, выделяемого уреабактериями и корнями растений. В почве молекула мочевины под действием уреазы трансформируется в гидрокарбонат аммония, который считается крайне нестабильным соединением и практически сразу же распадается на углекислый газ, воду и свободный аммиак (NH_3). Большая часть

свободного аммиака выделяется в атмосферу, снижая при этом эффективность удобрений (Величко, Фанда, 2016; Сычев и др., 2019; Шеуджен и др., 2020; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021).

Механизм действия ингибиторов уреазы основан на блокировке фермента уреазы в зоне контакта удобрения с почвенным раствором. Применение ингибиторов уреазы преимущественно направлено на снижение потерь азота мочевины в виде газообразного аммиака (NH_3). Замедление гидролитического разложения мочевины смягчает резкие колебания pH почвенного раствора, способствует более длительному сохранению азота в почве в форме аммония (NH_4^+), и, как следствие, снижает интенсивность его последующей трансформации в нитраты (NO_3^-) и газообразные формы азота (включая молекулярный азот – N_2 , окись азота – NO , закись азота – N_2O) в результате нитрификации и денитрификации. Исследования показывают, что применение ингибиторов уреазы способствует снижению потерь азота мочевины в виде NH_3 и N_2O на 60-80%, что приводит к повышению эффективности удобрений в среднем на 15-30%, увеличению урожайности сельскохозяйственных культур на 5-30% (Филисюк, 2004; Сычев и др., 2019; Шеуджен и др., 2020; Trenkel, 2010; Liu et al., 2022, 2025; Li et al., 2018; Lewu et al., 2021).

Эффективность ингибиторов уреазы определяется условиями окружающей среды – в первую очередь pH почвенного раствора и температурой почвы. Щелочная реакция среды ($\text{pH} \geq 7$) способствует повышению эмиссии NH_3 , тогда как высокая температура увеличивает скорость гидролиза мочевины, что может ослаблять действие ингибитора уреазы (Маннхайм, Бергер, 2015).

Ингибиторы нитрификации – селективные препараты, которые затормаживают биологическое окисление аммиачного азота до нитрата, подавляя активность нитрифицирующих бактерий на срок от 4-х до 10-ти недель (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021). Механизм действия большинства ингибиторов нитрификации основан на блокировании фермента монооксигеназы аммония, выделяемого почвенными бактериями рода *Nitrosomonas*, не оказывая при этом негативного воздействия на сами микроорганизмы. Подавление

активности фермента монооксигеназы аммония тормозит первый этап процесса нитрификации, на котором аммонийный азот окисляется до нитритной формы (NO_2^-), в результате чего азот в форме NH_4^+ дольше сохраняется в почве. В свою очередь, замедление процесса нитрификации способствует сокращению потерь азота в результате вымывания нитрат-ионов, снижению интенсивности процесса денитрификации и риска выброса парникового газа – закиси азота (N_2O) или окиси азота (NO) (Лаврова, 1990; Маннхайм, Бергер, 2015; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021). Результаты ряда работ свидетельствуют, что применение азотных удобрений в сочетании с ингибиторами нитрификации способно уменьшить выбросы N_2O на 10-90%. При этом повышается эффективность удобрений, что позволяет снижать их дозу 10-30% (Лаврова, 1990; Маннхайм, Бергер, 2015; Лапушкин, Лапушкина, 2025; Trenkel, 2010; Lewu et al., 202; Wang et al., 2016; Fan et al., 2018; Barth et al., 2019).

К настоящему времени в качестве ингибиторов уреазы и нитрификации было исследовано и протестировано огромное количество химических веществ, однако лишь немногие доказали свою агрономическую эффективность и подтвердили соответствие необходимым характеристиками. Все ингибиторы уреазы и нитрификации должны:

- обладать специфичностью действия;
- легко интегрироваться в производственные системы, чтобы быть экономически выгодными;
- быть стабильными при производстве, хранении, транспортировке и использовании;
- быть экологически безопасными, не разлагаться до токсичных веществ в почве и не оказывать неблагоприятного побочного действие на плодородие почвы;
- быть безопасными для растений, животных и человека;
- иметь стоимость приемлемую для сельхозпроизводителей (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010).

Наиболее изученными и применяемыми ингибиторами уреазы считаются: N-(н-бутил)-тиофосфорный триамид (NBPT), фенилфосфородиамида

(PPD/PPDA), гидрохинон (HQ), триамид N-(2-нитрофенил) фосфорной кислоты (2-NPT), тиосульфат аммония (ATS) (Trenkel, 2010; Величко, Фанда, 2016; Лапушкин, Лапушкина, 2025; Li et al., 2017; Шеуджен и др., 2020; Achilea, 2021; Chaoru et al., 2022).

В настоящее время единственным ингибитором уреазы, имеющим коммерческое и практическое значение в сельском хозяйстве является NBPT – (н-бутил) тиофосфорный триамид. Впервые ингибитор уреазы NBPT был представлен в 1996 году компанией IMC-Agrico (США) под торговым наименованием Agrotain (Trenkel, 2010). Сегодня NBPT производят во многих странах под различными торговыми марками: Limus (Германия), Sinobio (Китай), N-STAB (Украина) и др. В России NBPT продается под торговым наименованием ЗУЛУ (производитель ТЕТРА ХИМ). Из готовых продуктов, модифицированных ингибитором уреазы NBPT, на российском рынке популярна мочевиная UTEC (Сычев и др., 2019; Шеуджен и др., 2020; Шеуджен, Перепелин, 2023; Шаляпин, Онищенко, 2022). NBPT удобен для использования. Его можно вводить в расплавленную мочевиновую гранулу при производстве гранул или приллы, применять для поверхностной обработки гранул непосредственно перед внесением удобрения или добавлять в жидкие формы удобрений. NBPT является нетоксичным соединением, действует исключительно на фермент уреазу, безопасен для почвенных микроорганизмов, окружающей среды и человека. Разлагается до нетоксичных метаболитов. Не оказывает отрицательного воздействия при формировании урожая сельскохозяйственными культурами. Кроме того, нет достоверной информации о снижении его эффективности при систематическом использовании на одном и том же участке почвы (Trenkel, 2010).

В качестве ингибиторов нитрификации применяют азиды, пиримидины, пиразолы и другие соединения. Практическое значение имеют: дициандиамид (DCD) и его комбинации с 1H-1,2,4-триазолом (TZ) и 1H-1,2,4-триазолом (TZ) + 3-метилпиразолом (3-MP); 3,4-диметил-1H-пиразолфосфат (DMPP); нитрапирин (2-хлор-6-(трихлорметил)-пиридин) (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Achilea, 2021).

Дициандиамид (DCD) производится из цианамида кальция в Китае, Европе и Японии. Коммерчески известен как Eсo-N. Он имеет широкий спектр промышленного применения, не токсичен и безопасен для животных и человека, содержит около 65-67% азота, а конечными продуктами его разложения в почве являются аммиак и углекислый газ (Trenkel, 2010). В почве DCD подавляет активность нитрифицирующих бактерий рода *Nitromonas*, замедляя их метаболические процессы за счет встраивания в цитохромоксидазу в электронно-транспортной системе дыхания. При этом численность нитрифицирующих бактерий не сокращается (Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Tufail et al., 2022, 2023). Применение DCD снижает вероятность потерь азота на 20-60% за счет вымывания нитратов и на 40-80% за счет эмиссии закиси азота. Стабилизирующий эффект DCD варьируется от 4 до 10 недель и, как правило, зависит от количества внесенного минерального азота, влажности и температуры почвы (Смирнов и др., 1987; Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Dai et al., 2013; Sharma et al., 2023). Исследования показывают, что ингибитор нитрификации DCD наиболее эффективен при температуре окружающей среды менее +15°C в районах с небольшим количеством осадков (Qiu et al., 2010; Luo et al., 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Dai et al., 2013). Недостатком DCD является необходимость вносить относительно большое количество ингибитора – около 5–10% от общей массы азота в удобрении. С целью уменьшения дозировки ингибитора без потери эффективности подавления нитрифицирующих микроорганизмов были предложены комбинированные составы на основе DCD и других ингибиторов нитрификации, в частности, смеси DCD с 3-метилпиразолом (MP) и 1H-1,2,4-триазолом (TZ) (Trenkel, 2010). Еще одним недостатком DCD является его миграция из верхнего слоя почвы в нижележащие горизонты и водные объекты. Обнаружение DCD в почвенно-дренажных водах и молочной продукции, полученной с пастбищ, где вносились удобрения, обработанные этим ингибитором, поставило под сомнение его безопасность для здоровья человека (Achilea, 2021). Также в литературе имеются данные, о том, что при применении DCD могут увеличиваться

потери азота в виде аммиака на 3-5%. По этой причине DCD иногда используют с ингибиторами уреазы (Garzón, Cárdenas, 2013).

3,4-Диметил-1Н-пиразолфосфат (DMPP) – современный перспективный ингибитор нитрификации. Был разработан в 90-х годах компанией BASF (Германия). В настоящее время выпускается этой же фирмой под торговым наименованием Vibelsol (BASF, 2025). Не токсичен для растений, животных и человека. По эффективности DMPP превосходит DCD и многие другие ингибиторы нитрификации, так как он обладает более низкой подвижностью и скоростью действия. Средняя рекомендуемая норма внесения DMPP составляет 1% по массе от общего содержания азота, присутствующего в виде аммонийного или амидного азота удобрения (Achilea, 2021; ЕС No 2003/2003). Кроме того, DMPP сохраняет высокую ингибирующую активность при переувлажнении почвы и температуре выше 25°C, что выгодно отличает его от DCD и нитрапирина (Trenkel, 2010; Ribeiro et al., 2025). Однако в некоторых литературных источниках отмечается, что эффективность DMPP может снижаться при повышенной кислотности почвенного раствора (Nauer et al., 2018; Rose et al., 2020). DMPP обладает тем же механизмом действия, что и DCD. Однако он не только связывает фермент монооксигеназы аммония, но и блокирует транспорт электронов внутри цитохромов, что приводит к замедлению процесса окисления NH_4^+ до NO_2^- (Tufail et al., 2022, 2023). В ходе различных полевых экспериментов было установлено, что DMPP задерживает вымывание нитратов до нескольких недель, снижает эмиссию закиси азота в среднем на 50% и повышает продуктивность сельскохозяйственных культур на 10-40% (Trenkel, 2010; Tufail et al., 2022, 2023; Ribeiro et al., 2025).

Нитрапирин или 2-хлор-6-(трихлорметил)пиридин – ингибитор нитрификации узкого избирательного действия. Наиболее известен под торговой маркой N-Serve (Dow Chemical Co, США). Нитрапирин относится к числу малотоксичных соединений. Кумулятивные свойства нитрапирина выражены слабо, тератогенное, гонадо- и эмбриотоксичное действие отсутствует. С точки зрения токсичности и фототоксичности, влияния на окружающую среду, здоровье людей и животных – нитрапирин не имеет никаких противопоказаний к

применению в качестве ингибитора нитрификации (Смирнов и др., 1987; Лаврова, 1990; Trenkel, 2010).

Нитрапилин хорошо себя зарекомендовал в качестве ингибитора нитрификации. В дозах 0,5-1% от общего содержания азота в удобрении он способен задерживать процесс нитрификации в течение 1,5-2 месяцев, снижая выбросы N_2O на 90% при различной температуре и влажности почвы (Смирнов и др., 1987; Garzón, Cárdenas, 2013). Однако нитрапилин имеет ряд недостатков. Нитрапилин очень нестойк, быстро улетучивается, подвергается фотолизу и химическому разложению. Это не позволяет заблаговременно вводить данный ингибитор в состав твердых удобрений. Нитрапилин рекомендуют применять с безводным или водно-аммиачным раствором или растворами удобрений, которые вносятся непосредственно в почву на глубину 5-10 см, что требует наличия в хозяйстве специального оборудования. Кроме того, нитрапилин быстро гидролизуется при высоком значении pH и адсорбируется органическим веществом почвы. Он также требует осторожного обращения, так как является коррозионным и взрывоопасным веществом (Смирнов и др., 1987; Лаврова, 1990; Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Achilea, 2021). Имеются также данные, что нитрапилин обладает некоторым бактерицидным действием, то есть он не только подавляет активность нитрифицирующих бактерий на определенный период, но может и уничтожать часть их популяции (Trenkel, 2010).

1H-1,2,4-Триазол (TZ) на практике применяется только в комбинации с другими ингибиторами нитрификации, такими как DCD или 3-метилпиразолом. Смесь триазола с DCD проявляет синергию, за счет чего норма DCD может быть существенно снижена (Trenkel, 2010). Про синергию, что смесь проявляет синергию

3-Метилпиразол (3-MP) – еще один ингибитор нитрификации, который применяется обычно в сочетании с DCD. Самостоятельно данный ингибитор не применяется так как не стоек во времени и обладает тератогенным действием (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010).

Обычно норма внесения ингибиторов уреазы и нитрификации не превышает 2-3% от количества азота удобрений (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010). Ранее в Регламенте ЕС 2003/2003 были закреплены нормы для наиболее применяемых форм и комбинаций ингибиторов уреазы и нитрификации (табл. 1).

Таблица 1 – Регламенты применения для ингибиторов нитрификации и уреазы по Регламенту ЕС 2003/2003

Группа ингибитора	Название ингибитора	Содержание ингибитора в % по массе от общего количества азота, присутствующего в виде аммонийного азота и азота мочевины.	
		Минимум	Максимум
Ингибиторы нитрификации	Дициандиамид (DCD)	2,25	4,5
	Продукт содержащий дициандиамид (DCD) и 1,2,4-триазол (TZ)	2,0	4,0
	Продукт содержащий 1,2,4-триазол (TZ) и 3-метилпиразол (3-MP)	0,2	1,0
	3,4-диметил-1H-пиразолфосфат (DMPP)	0,8	1,6
	Изомерная смесь 2-(3,4-диметилпиразол-1-ил)-янтарной кислоты и 2-(4,5-диметилпиразол-1-ил)-янтарной кислоты (DMPSA)	0,8	1,6
Ингибиторы уреазы	N-(н-бутил)-тиофосфорный триамид (NBPT)	0,09	0,2
	триамид N-(2- нитрофенил) фосфорной кислоты (2-NPT)	0,04	0,15
	Смесь N-(н-бутил)-тиофосфорного триамида (NBPT) и N-(н-пропил) тиофосфорного триамида (NPPT) (соотношение 3:1)	0,02	0,3

Однако Регламент ЕС 2003/2003 утратил силу в 2022 году и был заменен новым Регламентом Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2019/1009 от 5 июня 2019 г. «Об установлении правил размещения удобрений на рынке ЕС и об изменении Регламентов (ЕС) 1069/2009 и (ЕС), 1107/2009, а также об отмене Регламента (ЕС) 2003/2003».

В Регламенте (ЕС) 2019/1009 не установлены четкие нормы внесения ингибиторов, однако определены допустимые отклонения фактического содержания ингибитора от заявленного в удобрении. Так, при концентрации ингибитора менее 2% допускается отклонение до 20% от заявленного значения, а при концентрации более 2% – отклонение не должно превышать 0,3%.

1.3.3 Основные недостатки удобрений пролонгированного действия, ограничивающие их применение в агропромышленном комплексе

Несмотря на преимущества удобрений пролонгированного действия перед быстрорастворимыми формами, они также не лишены недостатков.

Медленнодействующие удобрения не имеют предсказуемой динамики высвобождения, из-за этого растения могут испытывать недостаток питательных элементов или наоборот избыток на ранних этапах развития (Trenkel, 2010).

К примеру, доступный для растений азот из медленнодействующих удобрений на основе продуктов конденсации мочевины либо может высвобождаться очень медленно, либо не высвобождаться совсем, что негативно сказывается на питательном режиме сельскохозяйственных культур. При использовании мочевины с серным покрытием в случае большого количества поврежденных гранул в партии может происходить резкий выброс азота сразу после внесения удобрения в почву, что губительно для растений на начальных этапах развития. Или, наоборот, в случае слишком толстого покрытия период высвобождения азота может сильно растянуться во времени и не покрыть потребности культуры в элементе питания. Также при применении мочевины с серным покрытием может повышаться кислотность почвы (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021; Lawrencía et al., 2021).

Некоторые синтетические покрытия, применяемые при производстве удобрений контролируемого действия, трудно разлагаются в почве или не разлагаются вовсе, что со временем приводит к загрязнению почв и оказывает дополнительную экологическую нагрузку на окружающую среду. Кроме того, все удобрения с покрытиями имеют так называемый «хвостовой эффект» или «остаточный эффект». То есть в период вегетации растения получают только 80-

85% питательных веществ из удобрения, а оставшееся количество высвобождается уже после уборки культуры в холостую, что не совсем экономически эффективно (Мухина и др., 2021; Shaviv, 2001; Trenkel, 2010; Fu et al., 2018; Lewu et al., 2021; Lawrencía et al., 2021).

Главным недостатком всех удобрений пролонгированного действия считается их высокая стоимость по сравнению с традиционными формами. Это в первую очередь ограничивает их распространение в агропромышленном комплексе. Дело в том, что технология некоторых покрытий очень сложная и энергозатратная. Сами материалы для покрытия могут быть в разы дороже, чем удобрение. Из-за этого производственные мощности заводов по выпуску удобрений пролонгированного действия относительно невелики. К тому же до сих пор нет стандартизированных методов для определения скорости высвобождения питательных веществ из удобрений пролонгированного действия, а лабораторные данные о высвобождении питательных веществ часто плохо согласуются с фактической динамикой высвобождения питательных веществ в полевых условиях (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021).

Иногда для повышения агрономической отдачи при одновременном снижении экономических и экологических издержек прибегают к стратегии комбинирования удобрений с разной кинетикой высвобождения азота. Удобрения контролируемого действия комбинируют с традиционными формами азотных удобрений в различных соотношениях. Такой подход позволяет исключить дополнительное внесение удобрений в виде подкормок, снизить затраты на применение дорогостоящих пролонгированных форм, избежать возможного дефицита азота на ранних этапах роста растений при слишком медленном высвобождении из капсулированных или медленнодействующих форм и обеспечить более сбалансированное питание в течение вегетационного периода.

Так, в полевых опытах Zheng et al. (2016) применение смеси обычной мочевины с мочевиной, покрытой полимерно-серным (PSCU) и полимерным (PCU) составом, в соотношении 4:3:3 повысило урожайность пшеницы в среднем на 9%, а кукурузы – на 15% по сравнению с вариантом, в котором использовали только

традиционную мочевины. Аналогичные результаты получены и в опытах с рисом, проводимых Zhao et al. (2023). Замена части обычной мочевины на форму с полимерным покрытием обеспечила прибавку урожая риса на 4-5%.

К химическим веществам, используемым в качестве ингибиторов нитрификации и уреазы предъявляется много жестких требований, а ассортимент коммерчески и практически значимых продуктов ограничен. Кроме того, при хорошей обеспеченности почвы азотом применение удобрений совместно с ингибиторами нитрификации и уреазы не дает существенных прибавок урожая (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010).

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных влиянию ингибиторов нитрификации на нитрифицирующие микроорганизмы, вопросы их экологической судьбы в агроэкосистемах, включая вымывание в грунтовые воды, нецелелевое воздействие на почвенный микробиом, экологические функции почвы остаются недостаточно изученными (Trenkel, 2010; Horstmann et al., 2025).

К примеру, ингибитор нитрификации нитрапирин обладает бактерицидным действием, из-за чего часть почвенной микрофлоры может погибать. Помимо этого, несмотря на то, что нитрапирин характеризуется низкой подвижностью в почве и интенсивно деградирует в условиях низкого содержания органического вещества, его обнаруживают в водных объектах. Это свидетельствует о его возможной миграции за пределы агроценозов с поверхностным стоком воды или атмосферными потоками. DMPP в отличие от нитрапирина обладает более высокой растворимостью, поэтому потенциальный риск его вымывания в нижние горизонты почвы и, как следствие, загрязнения грунтовых вод гораздо выше. Вместе с тем экологическая судьба DMPP в настоящее время недостаточно изучена (Trenkel, 2010; Horstmann et al., 2025).

Применение мочевины совместно с ингибитором уреазы на фоне высокой обеспеченности почвы азотом может приводить к фитотоксическому действию на растения за счет образования большой концентрации ионов аммония в почве (Trenkel, 2010).

Таким образом, несмотря на значительный потенциал удобрений пролонгированного действия дальнейшее развитие этой области требует создания и внедрения доступных и экологически безопасных материалов или химических соединений; разработки и стандартизации методов испытаний, обеспечивающих достоверную связь между лабораторными данными и полевой эффективностью; исследования устойчивости, миграции в окружающей среде, специфичности действия на почвенный микробиом химических веществ, применяемых для пролонгации эффекта удобрений.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования, направленные на изучение влияния новой формы капсулированного карбамида на урожай яровой пшеницы в сравнении обычной и с стабилизированными формами проводились в 2022–2024 годах в условиях вегетационных и мелкоделяночных полевых опытов на яровой пшенице. С целью исследования интенсивности высвобождения амидного азота и динамики его превращения в почве в зависимости от толщины покрытия гранул капсулированного карбамида и применяемого стабилизатора азота в 2023–2025 годах была проведена серия модельных лабораторных опытов на дерново-подзолистой и каштановой почвах.

2.1 Характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследования в вегетационных, полевых, модельно-лабораторных опытах были использованы разные формы карбамида пролонгированного действия:

- капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 50 мкм;
- капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 100 мкм;
- карбамид, стабилизированный ингибитором уреазы;
- карбамид, стабилизированный ингибитором нитрификации;
- карбамид, стабилизированный ингибиторами уреазы и нитрификации.

Капсулированный карбамид с покрытием на основе монокальцийфосфата был разработан и произведен технологами Научно-исследовательского института по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова (Пат. 2776275 С1). Преимуществом монокальцийфосфата (МКФ) как покрытия является его стоимость, доступность и безопасность для окружающей среды. Он также служит источником легкодоступного для растений фосфора – одного из важнейших

питательных элементов. Это не только выгодно отличает данную форму удобрения от зарубежных аналогов, но и полностью удовлетворяет одному из приоритетных направлений стратегии научно-технического развития Российской Федерации – переходу к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, которое подразумевает оптимальное использование природных ресурсов, использование экологичных, энергосберегающих технологий, минимизацию и переработку отходов.

Образцы удобрений, полученные в лаборатории АО НИУИФ имени Я.В. Самойлова, были предоставлены кафедре агрономической, биологической химии и радиологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева для изучения.

Эффективность новой формы капсулированного карбамида сравнивали с карбамидом, стабилизированным ингибитором уреазы и/или нитрификации. Среди всех пролонгированных форм азотные удобрения с ингибиторами в меньшей степени подвержены потерям азота (Шеуджен и др., 2020; Trenkel, 2010; Liu et al., 2022, 2025; Li et al., 2018; Lewu et al., 2021), что и послужило основанием выбора данных продуктов как референтных. В качестве ингибиторов уреазы и нитрификации были выбраны препараты, действующие вещества которых наиболее применимы в сельскохозяйственном производстве и доступны на рынке (Abalos, D et al., 2014; Cantarella et al., 2018).

Исследования показывают, что при применении азотных удобрений совместно с ингибитором нитрификации на основе 3,4-диметил-1Н-пиразолфосфата (DMPP) эмиссия закиси азота снижается в среднем на 50%, коэффициент использования азота удобрений возрастает в среднем на 20-25%, урожайность сельскохозяйственных культур повышается в среднем на 15-40% по сравнению со стандартными формами азотных удобрений (Лапушкин, Лапушкина, 2025; Pasda G., Hähndel R., Zerulla W., 2001; Abalos, D et al., 2014). Благодаря совместному применению карбамида с ингибиторами уреазы на основе N-(н-бутил) тиофосфорного триамида (NBPT) потери азота в виде аммиака могут снижаться на 20–50%, при этом урожайность сельскохозяйственных культур возрастает до 10%

по сравнению с применением традиционного карбамида (Лапушкин, Лапушкина, 2025; Cantarella et al., 2018).

Для всех модификаций карбамида в качестве варианта сравнения применялся обычный гранулированный карбамид марки Б.

В таблице 2 представлены качественные и количественные характеристики всех форм карбамида, применяемых в ходе исследований.

Таблица 2 – Качественные и количественные характеристики исследуемых форм карбамида

Форма карбамида	Модифицирующий агент	Содержание элементов питания, %	
		N	P ₂ O ₅
Карбамид (мочевина) – далее Нм (вариант сравнения)	Стандартная форма гранулированного карбамида марки Б, соответствует ГОСТ 2081-2010, производитель АО «Апатит» (Россия)	46	-
Капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 50 мкм – далее Нм +МКФ 50 мкм	Покрытие на основе монокальцийфосфата (МКФ), толщина покрытия 50 мкм, разработчик АО «НИУИФ» (Россия)	38	10
Капсулированный монокальцийфосфатом карбамид с толщиной покрытия 100 мкм – далее Нм +МКФ 100 мкм	Покрытие на основе монокальцийфосфата (МКФ), толщина покрытия 100 мкм, разработчик АО «НИУИФ» (Россия)	31	18
Карбамид с ингибитором уреазы – далее Нм + инг. ур.	Ингибитор уреазы Limus (Лимус), состав препарата: 18,75% N-(н-бутил) тиофосфорного триамида (NBPT) + 6,25% N-(н-пропил) тиофосфорного триамида (NPPT), производитель – BASF (Германия)	46	-
Карбамид с ингибитором нитрификации – далее Нм + инг. нитр.	Ингибитор нитрификации Vibelsol (Вибелсол), состав препарата: 17,4% 3,4-диметил-1Н-пиразолфосфат (DMPP), производитель – BASF (Германия)	46	-
Карбамид с ингибиторами уреазы и нитрификации – далее Нм + инг. ур.+ нитр.	Ингибитор уреазы Limus (Лимус), состав препарата: 18,75% N-(н-бутил) тиофосфорного триамида (NBPT) + 6,25% N-(н-пропил) тиофосфорного триамида (NPPT), производитель – BASF (Германия). Ингибитор нитрификации Vibelsol (Вибелсол), состав препарата: 17,4% 3,4-диметил-1Н-пиразолфосфат, производитель – BASF (Германия)	46	-

На рисунке 2 приведены микрофотографии скола гранулы капсулированного карбамида и распределение элементов питания по его поверхности. Изображение распределения элементов питания по поверхности гранулы карбамида получено в лаборатории АО НИУИФ имени Я.В. Самойлова в результате применения метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Из приведенных микрофотографий распределения элементов питания по поверхности скола гранулы карбамида видно, что нанесенное покрытие плотно прилегает к поверхности гранулы и полностью ее обволакивает. Гранула имеет достаточно прочную структуру без существенных дефектов и макропор. По поверхности гранулы покрытие распределено в достаточной степени равномерно, заданная толщина выдержана (рис. 2) (Лапушкин и др., 2024)

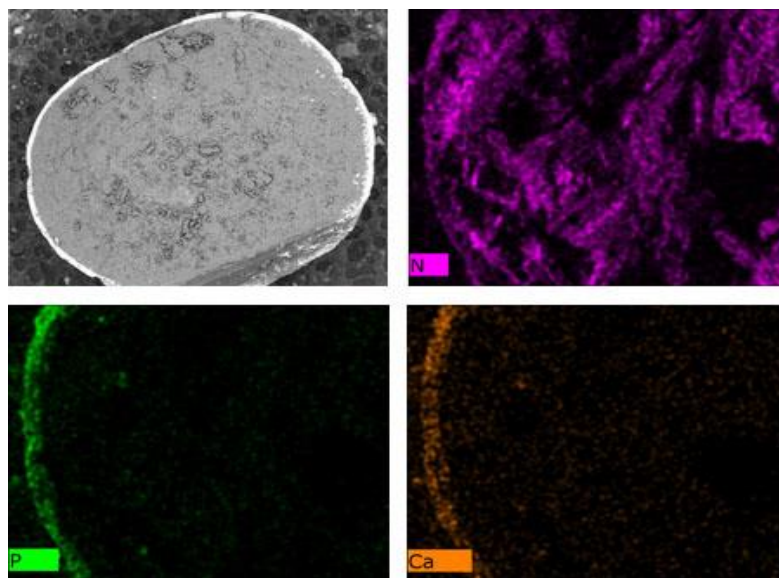


Рисунок 2 – Микрофотографии скола гранулы капсулированного карбамида и распределение азота, фосфора и кальция по поверхности скола (Лапушкин и др., 2024)

Испытания были проведены на яровой мягкой пшенице, сорт, которой адаптирован к условиям Нечерноземной зоны Российской Федерации. Выбор яровой пшеницы в качестве тест-культуры обуславливался ее важным народнохозяйственным значением для Российской Федерации.

Характеристика сорта яровой пшеницы

Пшеница яровая мягкая, сорт Любава, выведена ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка», методом индивидуального отбора из гибридной популяции F4

(Люба×Памяти Федина). Разновидность лютесценс (*Lutescens*). В Государственный реестр сорт включен в 2012 году.

Регионы возделывания: сорт Любава имеет достаточно широкий ареал распространения и допущен к выращиванию в Центральном, Волго-Вятском, Средневолжском регионах.

Срок созревания: яровая пшеница Любава относится к среднеспелым сортам. Продолжительность вегетационного периода составляет в среднем 70-90 дней, созревает одновременно с сортом Дарья (эталонный сорт).

Морфологическое описание сорта: куст полупрямостоячий; растение среднерослое – высота составляет 85-100 см; соломина – слабо выполненная; восковой налет на колосе, верхнем междоузлии соломины и влагалище флагового листа выражен средне или сильно; колос пирамидальный, рыхлый или средней плотности, белый; остевидные отростки на верхушке колоса короткие; плечо колоса закругленное или прямое, среднее или широкое; зубец слегка изогнутый, очень короткий или короткий; зерновка окрашенная; масса 1000 зерен колеблется от 31 г до 49 г.

Устойчивость к полеганию, прорастанию зерна в колосе, болезням и неблагоприятным климатическим факторам: сорт Любава устойчив к полеганию и прорастанию зерна в колосе. Также обладает средней устойчивостью к засухе. Умеренно устойчив к бурой ржавчине и мучнистой росе. Среднеустойчив к корневым гнилям и септориозу.

Продуктивность сорта: сорт Любава отличается высокой и стабильной урожайностью. Средняя урожайность в условиях Центрального региона при средней технологии выращивания составляет около 3 т/га и может достигать 7 т/га при интенсивной технологии.

Мукомольные и хлебопекарные характеристики сорта: по технологическим и хлебопекарным качествам сорт Любава относится к ценным пшеницам. Содержание сырой клейковины в муке составляет 32-43% при ИДК 65-80 е.ш., сырого протеина в зерне 14,0-14,7%; сила муки – более 350 е.а (Игнатьева и др., 2020; Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, 2025; ФИЦ «Немчиновка», 2025).

2.2 Методы исследований

Вегетационные опыты проводили в вегетационном домике кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2022 и 2023 годах.

Растения пшеницы выращивали в сосудах Митчерлиха вместимостью 5 кг сухой почвы. Для набивки сосудов использовали пахотный горизонт дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, отобранной на территории дендрологического сада имени Р. И. Шредера.

Перед закладкой вегетационных опытов почву известковали полной дозой известкового удобрения. В качестве известкового удобрения применяли гашеную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Расчет полной дозы извести производили по формуле:

$$D = H_{\text{г}} \times 37 \times 10,$$

где D – доза гашеной извести в мг/кг; $H_{\text{г}}$ – гидролитическая кислотность почвы в мг-экв/100 г почвы; 37 – молярная масса эквивалента $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в г/моль; 10 – коэффициент пересчета от 100 г к 1 кг почвы.

Агрохимические показатели почв определяли в соответствии с национальными стандартами. Агрохимическая характеристика почв, используемых в вегетационных опытах, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Агрохимическая характеристика пахотного горизонта дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы после известкования, 2022-2023 гг.

Год	Гумус	pH _{сол.}	H _г	S	Т	V	N _{щг} по Корнфилду	P ₂ O ₅	K ₂ O
	ГОСТ 26213	ГОСТ 26483	ГОСТ 26212	ГОСТ 27821				по Кирсанову	
	%	ед.рН	мг-экв/100 г					%	мг/кг
2022	3,96	5,57	1,72	16,1	17,8	90	89	55	168
2023	3,40	5,35	1,82	15,6	17,4	90	67	38	162

В среднем за два года почва после известкования характеризовалась высоким содержанием гумуса — 3,40–3,96%, слабокислой или близкой к нейтральной реакции солевой вытяжки — 5,35–5,57 ед. рН, низким содержанием

щелочегидролизуемого азота — 67–89 мг/кг. Гидролитическая кислотность (Нг) составляла — 1,72–1,82 мг-экв/100 г почвы, сумма обменных оснований (S) — 15,6–16,1 мг-экв/100 г почвы, емкость катионного обмена (Т) — 17,4–17,8 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности почвы основаниями (V) — 90%. Обеспеченность почв подвижными формами фосфора по Кирсанову соответствовала 2-му (38 мг/кг) и 3-ему (55 мг/кг) классу. Содержание подвижных форм калия по Кирсанову (162–168 мг/кг) соответствовало четвертому классу (табл. 3).

Схема вегетационных опытов в 2022 и 2023 годах была единой и включала следующие варианты:

1. РК-фон (Ф);
2. Ф + N_м (вариант сравнения);
3. Ф + N_м +МКФ 50 мкм;
4. Ф + N_м +МКФ 100 мкм;
5. Ф +N_м + инг. ур.;
6. Ф +N_м + инг. нитр.;
7. Ф +N_м + инг. ур.+нитр.

Повторность в вегетационном опыте была четырехкратная. Дозы вносимых удобрений в вегетационном опыте устанавливали в соответствии с рекомендациями Журбицкого З.И. (1968) для зерновых культур из расчета N – 150 мг, P₂O₅ – 100 мг, K₂O – 100 мг д.в./кг почвы. В качестве источника фосфора и калия были выбраны двуводный монокальцийфосфат (53% P₂O₅) и хлорид калия (60% K₂O). Дозы для капсулированных форм карбамида рассчитывали по азоту. 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, непосредственно перед внесением и заделкой удобрений в почву. Дозы ингибиторов соответствовали предельным уровням, установленным регламентом Европейского Союза (ЕС) № 2003/2003:

- ингибитор уреазы (Лимус) – 0,3 % от общего содержания вносимого азота,
- ингибитор нитрификации (Вибелсол) – 1,6 % от общего содержания вносимого азота.

Перед посевом зерно проращивали в чашках Петри для установления всхожести. Всхожесть зерен пшеницы сорта Любава в 2022 и в 2023 годах составляла не менее 95%.

В сосуды Митчерлиха диаметром 20 см высевали по тридцать зерен пшеницы. Перед уборкой урожая в каждом сосуде оставляли по двадцать растений.

Мелкоделяночные полевые опыты проводили в 2023-2024 гг. на территории опытных полей Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева.

Агрохимическая характеристика почвы представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Агрохимическая характеристика пахотного горизонта дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, 2023–2024 гг

Год	Гумус	pH _{сол.}	N _г	S	T	V	N _{мг} по Корнфилду	P ₂ O ₅	K ₂ O
	ГОСТ 26213	ГОСТ 26483	ГОСТ 26212	ГОСТ 27821				по Кирсанову	
								ГОСТ 54650	
	%	ед.рН	мг-экв/100 г			%	мг/кг		
2023	2,43	5,90	1,60	13,9	15,5	90	91	225	104
2024	3,01	5,22	2,49	11,2	13,7	82	99	317	122

Опыт закладывали на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, которая характеризовалась слабокислой или близкой к нейтральной реакцией солевой вытяжки — 5,22–5,90 ед. рН, повышенным содержанием гумуса — 2,43–3,01%, низким содержанием щелочегидролизующего азота — 91–99 мг/кг, средним – 104 мг/кг (3 класс) и повышенным – 122 мг/кг (4 класс) содержанием подвижных форм калия, высоким – 225 мг/кг (5 класс) и очень высоким – 317 мг/кг (6 класс) содержанием подвижного фосфора (табл. 4).

Схема полевых опытов в 2023 и 2024 годах включала в себя 6 вариантов:

1. РК-фон (Ф);
2. Ф + N_м (вариант сравнения);
3. Ф + N_м +МКФ 50 мкм;

4. Ф + N_м +МКФ 100 мкм;

5. Ф +N_м + инг. ур.;

6. Ф +N_м + инг. нитр.

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

Перед посевом в почву вручную вносили и заделывали удобрения из расчета N₉₀P₅₂K₉₀ кг на гектар. Калийсодержащее удобрение в виде 60% хлористого калия рассыпали по всей площади опытного участка. Фосфорное и азотные удобрения вносили поделяночно. В качестве фосфорного удобрения применяли химически чистый двухводный монокальцийфосфат, содержащий 53% фосфора в пересчете на оксид. Дозу и навески фосфорного удобрения устанавливали исходя из максимального содержания фосфора в капсулированной форме карбамида. Обработку навесок карбамида препаратами-ингибиторами Лимус и Вибелсол проводили в день закладки опыта, непосредственно перед внесением и заделкой удобрений в почву. Ингибиторы, также как и в вегетационных опытах применяли в нормах, регламентированных ЕС №2003/2003.

Посев пшеницы осуществляли с помощью семирядковой сеялки из расчета нормы высева семян 5,0 млн/га.

В течение периода вегетации за растениями велись фенологические и фитосанитарные наблюдения.

В периоды наступления основных фенологических фаз развития пшеницы (кущение, выход в трубку, колошение-цветение) отбирали растительные образцы (в вегетационных опытах по 1-2 растения/с сосуда, в полевых – 10-15 растений / с делянки) для проведения листовой диагностики минерального питания. По результатам листовой диагностики оценивали обеспеченность яровой пшеницы азотом на разных этапах ее развития.

Система защиты яровой пшеницы от вредителей и болезней в вегетационных и полевых опытах включала обработку пестицидами в фазах выхода в трубку, колошения и молочной спелости. Для предотвращения развития болезней и

вредителей применялись следующие средства химической защиты: Профи Форте, КМЭ (300 г/л пропиконазола + 200 г/л тебуконазола), норма расхода препарата в вегетационном опыте – 0,04 мл/м², в полевом опыте – 0,4 л/га; Имиприд, ВРК (200 г/л имидаклоприда) норма расхода препарата в вегетационном опыте – 0,02 мл/м², в полевом опыте – 0,25 л/га.

Сорные растения в полевых опытах удалялись ручной или химической прополкой с использованием гербицида Линтур, ВДГ (659 г/кг дикамба натриевой соли + 41 г/кг триасульфурона), норма расхода препарата – 0,18 кг/га.

Уборку урожая яровой пшеницы проводили при достижении зерном восковой или полной спелости. Определяющим фактором в сроках уборки урожая были погодные условия. Урожай с учетной площади делянок убирали после удаления растений с защитных полос.

При анализе урожайных данных яровой пшеницы 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.

После учета биометрических данных и структуры урожая в полученном растительном материале определяли содержание азота (N), фосфора (P₂O₅) и калия (K₂O) в соответствии установленным методикам: содержание азота – ГОСТ 13496.4 (метод Кьельдаля), фосфора – по ГОСТ 26657 (колориметрический метод), калия – по ГОСТ 30504 (пламенно-фотометрический метод).

Перед определением питательных элементов (NPK) растительный материал (зерно и солома) измельчали в лабораторной мельнице, затем озоляли в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора – металлического селена. Содержание белка в зерне пшеницы определяли по ГОСТ 10846, умножая полученное содержание азота на белковый коэффициент 5,7. Клейковину определяли методом ближней инфракрасной спектроскопии.

Метеорологические наблюдения при проведении вегетационных и полевых опытов.

Метеорологические данные за вегетационные периоды 2022–2024 гг. были предоставлены Метеорологической обсерваторией имени В. А. Михельсона, находящейся на территории ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Поскольку при проведении вегетационных опытов растения яровой пшеницы выращивали вне культивационного сооружения вегетационного домика, а под защитной сеткой, где условия были приближены к естественным полевым, при интерпретации полученных результатов принимали во внимание особенности погодных условий в период проведения исследований (2022–2023 гг.).

По данным Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона в вегетационные периоды 2022–2024 гг. наблюдались некоторые отклонения фактических метеорологических показателей от среднемноголетних значений.

В вегетационном периоде 2022 года среднемесячная температура воздуха в мае составила 10,6°C, что на 3,2°C ниже, относительно климатической нормы. Посев яровой пшеницы в вегетационном опыте проводился 11 мая. Фактическая месячная сумма осадков составила 75 мм, что превышало среднемноголетние данные на 27%, при климатической норме 59 мм. Особенно обильные осадки отмечались в третьей декаде мая – 42,5 мм. Несмотря на отклонения фактических метеоданных в мае от среднемноголетних значений задержка всходов яровой пшеницы не наблюдалась (табл. 5, рис. 3).

Таблица 5 – Метеорологические показатели за 2022 год

Показатели	Месяцы			
	Май	Июнь	Июль	Август
Средняя многолетняя месячная температура воздуха (среднемноголетняя климатическая норма) t, °C	+13,8	+17,5	+19,8	+17,8
Фактическая среднемесячная температура воздуха t, °C	+10,6	+18,8	+20,6	+22,1
Отклонение от климатической нормы t, °C	-3,2	+1,3	+0,8	+4,3
Средняя многолетняя сумма осадков (среднемноголетняя климатическая норма), мм	59	78	83	77
Фактическая сумма осадков, мм	75	49	91	3
% от климатической нормы осадков	127	63	109	4
Минимальная температура воздуха за месяц, t, °C	- 0,7	+9,7	+10,9	+12,6
Максимальная температура воздуха за месяц, t, °C	+21,5	+31,6	+32,2	+31,7



Рисунок 3 – Динамика температуры воздуха и осадков по декадам за вегетационный период 2022 года

Лето 2022 года было достаточно жарким. Гидротермический коэффициент (ГТК) за период вегетации составил 1,3. Период с июня по август 2022 года отличался более высокой (на +0,8 – +4,3°C) температурой воздуха и меньшим количеством осадков по сравнению со среднемноголетними значениями. В июне 2022 года, при прохождении растениями фазы выхода в трубку наблюдался дефицит влаги, в особенности в третьей декаде. Количество фактически выпавших осадков составило 63% от среднемноголетней нормы, перепад температур достигал 22°C. Июль отличался жаркими днями и хорошей влагообеспеченностью для растений в 1-ой и 3-ей декаде. Максимальная температура воздуха достигала +32,2°C, количество выпавших осадков суммарно составляло 91 мм, что практически соответствовало климатической норме. Август был очень жарким и засушливым. За месяц сумма выпавших осадков составила всего 3 мм, что существенно отличалось от климатической нормы (77 мм). Недостаток влаги в августе стимулировал ускорение созревания зерна яровой пшеницы (табл. 5, рис. 3). Уборку урожая яровой пшеницы в вегетационном опыте 2022 года проводили 10 августа.

Средняя температура воздуха с мая по август 2023 года составляла +17,0°C, что было приближено к среднемноголетней температуре за этот период (+17,2°C). Дефицит влаги наблюдался только в мае и составил 56% от среднемноголетней нормы (59 мм). Посев яровой пшеницы проводили в вегетационном опыте 10 мая, полевом – 12 мая. Недостаток осадков в мае не повлиял на сроки всходов яровой пшеницы. В июне 2023 года количество осадков соответствовало среднемноголетним значениям (78 мм). Наибольшее количество осадков отмечалось в июле (151 мм), когда растения пшеницы проходили фазы колошения-цветения, фактическое количество выпавших осадков в этот период превышало норму на 82% (таблица 7). ГТК за период вегетации составил 1,6. Избыток влаги приводил к развитию мучнистой росы в посевах. Суммарное количество осадков за период вегетации составило 302 мм, что соответствует климатической норме (297 мм) и в 1,4 раза превышает показатели 2022 года. Наиболее обильные осадки наблюдались в 3-ей декаде июня и во 2-ой и 3-ей декаде июля. Август в 2023 был жарким. Средняя температура первой декады августа составляла +23°C. Максимальная температура воздуха отмечалась 6 августа и составляла +31,1°C. Жаркое начало августа оказало положительное влияние на процесс созревания зерна яровой пшеницы (табл. 6, рис. 4).

Таблица 6 – Метеорологические показатели за 2023 год

Показатели	Месяцы			
	Май	Июнь	Июль	Август
Средняя многолетняя месячная температура воздуха (среднемноголетняя климатическая норма) t, °C	+13,8	+17,5	+19,8	+17,8
Фактическая среднемесячная температура воздуха t, °C	+12,7	+16,9	+18,5	+19,9
Отклонение от климатической нормы t, °C	-1,1	-0,6	-1,3	+2,1
Средняя многолетняя сумма осадков (среднемноголетняя климатическая норма), мм	59	78	83	77
Фактическая сумма осадков, мм	33	78	151	40
% от климатической нормы осадков	56	100	182	52
Минимальная температура воздуха за месяц, t, °C	-0,6	+5,7	+11,8	+8,9
Максимальная температура воздуха за месяц, t, °C	+24,6	+26,7	+28,5	+31,1



Рисунок 4 – Динамика температуры воздуха и осадков по декадам за вегетационный период 2023 года

Уборку урожая в полевом опыте проводили 8 августа, в вегетационном – 10 августа.

Вегетационный период 2024 года был наиболее теплым и дождливым по сравнению с предыдущими годами (табл. 7). ГТК со 2 декады мая по 1 декаду августа составлял 1,7.

Таблица 7 – Метеорологические показатели за 2024 год

Показатели	Месяцы			
	Май	Июнь	Июль	Август
Средняя многолетняя месячная температура воздуха (среднемноголетняя климатическая норма) t, °C	+13,8	+17,5	+19,8	+17,8
Фактическая среднемесечная температура воздуха t, °C	+12,7	+20,1	+22,5	+19,1
Отклонение от климатической нормы t, °C	-1,1	+2,6	+2,6	+1,3
Средняя многолетняя сумма осадков (среднемноголетняя климатическая норма), мм	59	78	83	77
Фактическая сумма осадков, мм	36	166	92	34
% от климатической нормы осадков	61	214	111	45
Минимальная температура воздуха за месяц, t, °C	-1,1	+11,6	+13,3	+10,3
Максимальная температура воздуха за месяц, t, °C	+29,8	+30,2	+33,1	+28,9

Средняя температура воздуха с мая по август составляла +18,6°C, сумма осадков – 329 мм, что превышало климатическую норму за тот же период по температуре на 1,4°C, по осадкам – 32 мм (11 %).

Начало мая 2024 года было достаточно холодным. Самая низкая температура воздуха (-1,1°C) отмечалась 9 мая. Фактическая сумма осадков составляла 36 мм, тогда как климатическая норма составляет 59 мм. Посев яровой пшеницы проводили 16 мая. Июнь 2024 года был теплым и очень дождливым. Наибольшее количество осадков выпало в первой декаде (51 мм) и во второй декаде (107 мм) июня в период, когда растения проходили фазы кущения и выход в трубку (табл. 7, рис. 5).

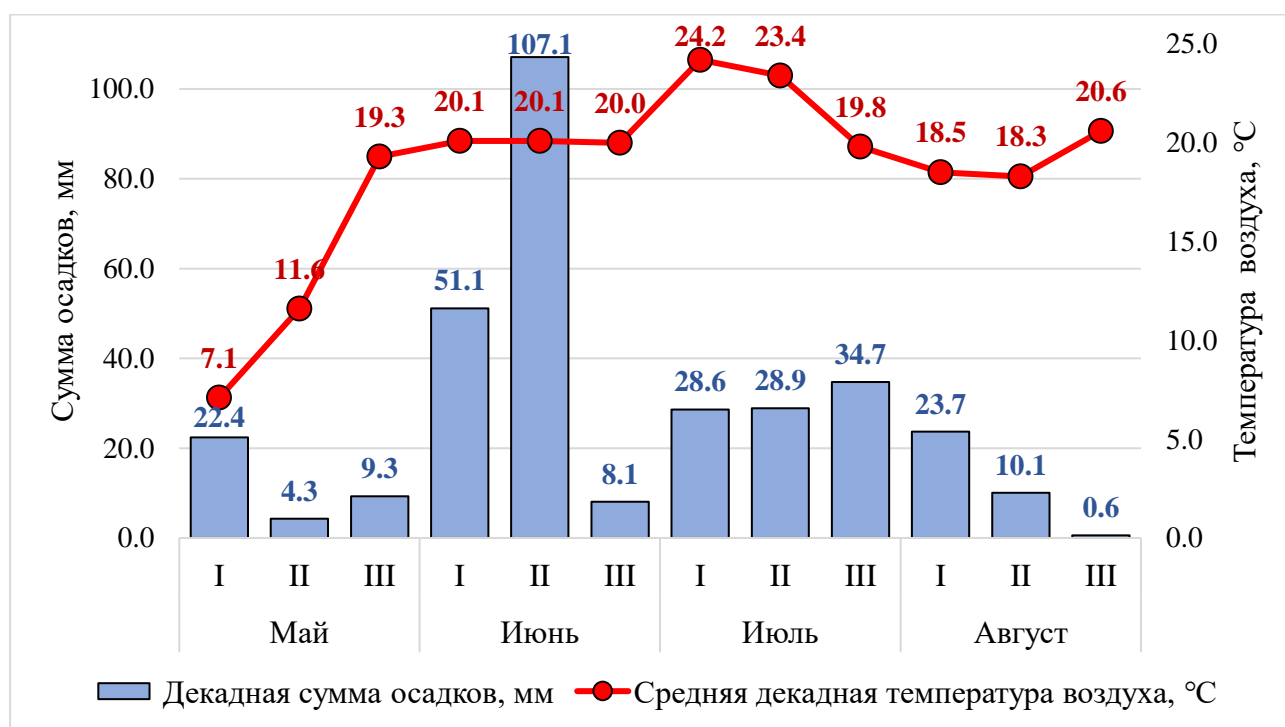


Рисунок 5 – Динамика температуры воздуха и осадков по декадам за вегетационный период 2024 года

Обилие осадков в этот период привело к развитию мучнистой росы в посевах. Июль был самым жарким месяцем в 2024 году. Максимальная температура воздуха достигала +33,1°C. При этом количество осадков в июле было достаточным, а их распределение равномерным. Начало августа было теплым и дождливым. Поэтому урожай убрали 5 августа в фазу восковой спелости зерна, затем снопы просушивали и оставляли на дозревание (табл. 7, рис. 5).

Модельно-лабораторный опыт. В целях изучения темпов превращения азота исследуемых пролонгированных форм карбамида в период с 2023 по 2025 гг. была проведена серия модельных опытов на различных типах почв.

Для исследований были выбраны два контрастных типа почв – дерново-подзолистая легкосуглинистая и каштановая тяжелосуглинистая.

Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва была отобрана с контрольных сосудов вегетационного опыта 2023 года. Пахотный горизонт каштановой тяжелосуглинистой почвы был привезен из Волгоградской области. Агрохимическая характеристика почв представлена в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Агрохимическая характеристика пахотного горизонта дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы

Гумус	рН _{сол.}	Нг	S	Т	V	N _{мин}	N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
									по Кирсанову	
ГОСТ 26213	ГОСТ 26483	ГОСТ 26212	ГОСТ 27821				ГОСТ 26489	Спектро-фото-метрически	ГОСТ 54650	
%	ед.рН	мг-экв./100 г			%	мг/кг				
3,35	5,50	3,33	11,1	14,4	77	51	1	50	124	189

Таблица 9 – Агрохимическая характеристика пахотного горизонта каштановой тяжелосуглинистой почвы

Гумус	рН _{водн.}	Нг	S	Т	V	N _{мин}	N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
									по Мачигину	
ГОСТ 26213	ГОСТ 26423	ГОСТ 26212	ГОСТ 27821				ГОСТ 26489	Спектро-фото-метрически	ГОСТ 26205	
%	ед.рН	мг-экв./100 г			%	мг/кг				
2,41	7,70	0	27,2	27,2	100	90	3	87	23	379

Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва отличалась средним содержанием гумуса – 3,35 %, характеризовалась слабокислой реакцией почвенного раствора – 5,50 ед. рН. Суммарное содержание минеральных форм азота составляло 51 мг/кг (табл. 8).

Каштановая тяжелосуглинистая почва характеризовалась низким содержанием гумуса – 2,41 %, щелочной реакцией почвенного раствора – рН 7,70. Содержание минеральных форм азота составляло суммарно 90 мг/кг (табл. 9).

Схема модельных лабораторных опытов включала в себя 6 вариантов:

1. Контроль (без удобрений);
2. N_м (вариант сравнения);
3. N_м +МКФ 50 мкм;
4. N_м +МКФ 100 мкм;
5. N_м + инг. ур.;
6. N_м + инг. нитр.

Модельный опыт по оценке интенсивности минерализации азота исследуемых форм карбамида пролонгированного действия на дерново-подзолистой и каштановой почвах были проведены в соответствии с методическими указаниями (Самохвалов и др., 1984, 1993). В стаканы объемом 100 см³ помещали навеску почвы из расчета 20 г сухой почвы, предварительно увлажненной 60% капиллярной влагоемкости. Затем в почву вносили навеску удобрения, содержащую около 5 мг азота (с точностью до 0,1 мг) с различными формами карбамида. Почву с удобрениями компостировали в течение 35 суток при температуре 20°C, и по ходу опыта в разные сроки (1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 сутки) проводили отбор образцов чтобы установить содержание аммонийного и нитратного азота. Опыт закладывали в трехкратной повторности для каждого срока наблюдения, общая повторность опыта 27-кратная. Содержание в почве катионов аммония определяли по ГОСТ 26489, а нитрат-анионы – спектрофотометрическим методом (Борисова, 1968; Лапушкин, 2025).

Изучение интенсивности денитрификации проводили следующим образом: в сосуды объемом 75 см³ помещали 20 г почвы и навеску удобрения (~5 мг азота). Почву увлажняли из расчета 60% капиллярной влагоемкости и компостировали в аэробных условиях в термостате при 25°C. Через 7 суток для каштановой почвы и через 14 суток для дерново-подзолистой почвы, после завершения процессов аммонификации и нитрификации азота, с целью создания оптимальных условий

для начала и развития денитрификации в сосуды вносили по 3 см³ 2%-ного раствора декстрозы. Сосуды герметично закрывали резиновыми пробками и вводили 8 см³ ацетилена (C₂H₂) для предотвращения редукции закиси азота (N₂O). Концентрацию N₂O в газовой фазе определяли методом газовой хроматографии через 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21 и 35 суток инкубации. Опыт проводили в трехкратной повторности.

В модельно-лабораторных опытах все результаты при интерпретации приводили к эквивалентной дозе внесенного азота, равной 200 мг/кг.

Статистическую обработку данных вегетационных, полевых и лабораторных опытов проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа по методике Доспехова (2011) с последующим расчетом наименьшей существенной разности (НСР) и построения доверительных интервалов на основе *t*-распределения Стьюдента. Уровень значимости при дисперсионном анализе и расчете НСР составлял 0,05, уровень доверия при построении доверительных интервалов – 95%. Расчеты выполняли с помощью программного обеспечения 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 ходе вегетационных (2022-2023 гг.) и полевых (2023-2024 гг.) опытов в основные фазы развития пшеницы отбирали растительные образцы для изучения интенсивности потребления азота, его содержания в растениях, а также накопления биомассы в зависимости от формы применяемого карбамида.

Усредненные данные по динамике поглощения растениями пшеницы азота разных форм карбамида в вегетационных опытах 2022-2023 гг. представлены на рисунке 6.

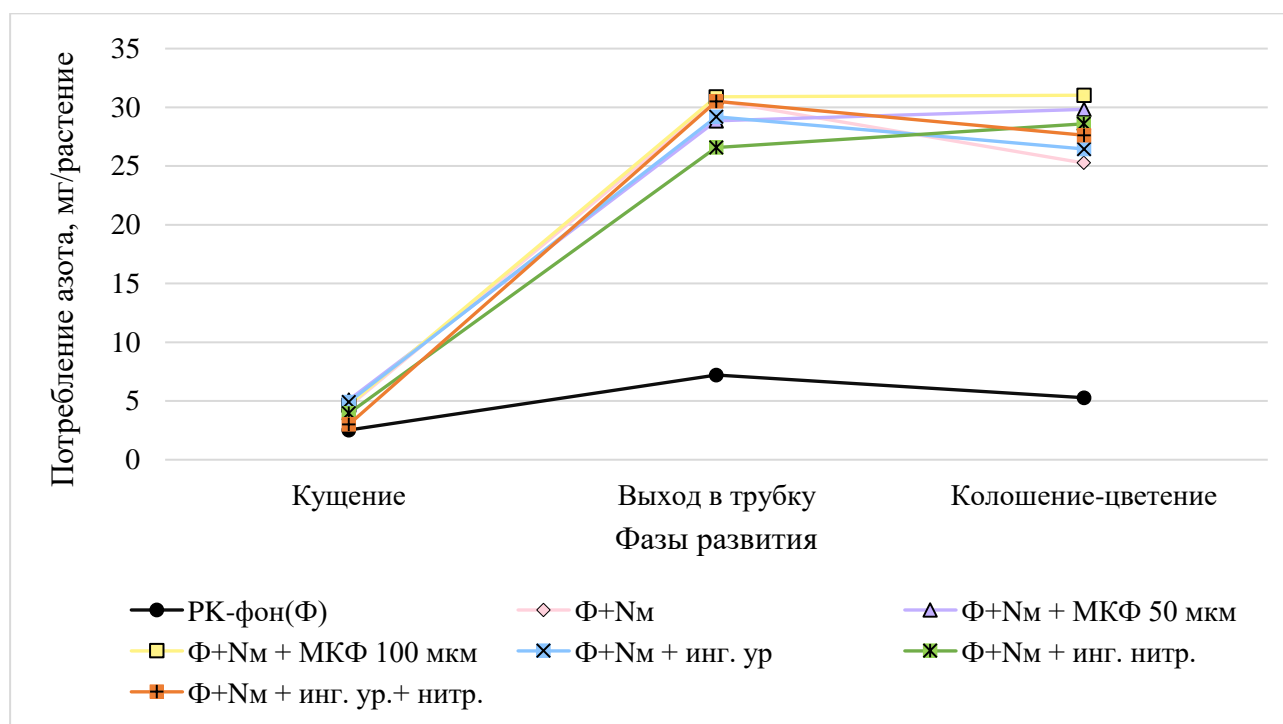


Рисунок 6 – Динамика потребления азота яровой пшеницей в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.)

По литературным данным яровая пшеница наиболее интенсивно поглощает элементы питания в фазах кущения и колошения (Кидин, 2009; Шеуджен и др.,

2013а; Лапушкин и др., 2023а). Согласно данным, представленным на рисунке 6, все изучаемые в вегетационном опыте модификации карбамида обеспечивали растения пшеницы азотом на протяжении всего периода его интенсивного поглощения – от фазы выхода в трубку до колошения. Максимум поглощения азота пшеницей пришелся на фазу выход в трубку. В этот период наибольшее количество азота усваивалось растениями в вариантах с традиционным карбамидом, капсулированным карбамидом с покрытием 100 мкм и карбамидом, стабилизированным двумя ингибиторами (по 31 мг N/растение). В остальных вариантах с внесением азотных удобрений величина поглощаемого растениями азота составляла 27-29 мг/растение, а минимальное значение (27 мг N/растение) зафиксировано при использовании 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 мочеvine (25 мг N/растение), при применении стабилизированных форм – на 1-4 мг (рис. 6).

Данные таблицы 10 позволяют более полно оценить влияние форм карбамида на ростовые процессы и азотный статус растений яровой пшеницы.

Таблица 10 – Динамика накопления биомассы и обеспеченность растений яровой пшеницы азотом в основные фазы развития (вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.)

Вариант	Кущение	Выход в трубку	Колошение - цветение
Сухая масса г/растение			
РК-фон (Ф)	0,08	0,64	0,85
Ф+Nм (вар. срав.)	0,09	1,15	1,70
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	0,10	1,09	2,03
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	0,09	1,06	1,88
Ф+Nм + инг. ур	0,09	1,11	1,96
Ф+Nм + инг. нитр.	0,08	0,97	1,87
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	0,07	1,01	1,78
Содержание азота, %			
РК-фон (Ф)	3,26	1,15	0,62
Ф+Nм (вар. срав.)	4,73	2,81	1,48
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	5,22	2,71	1,47
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	4,84	3,02	1,58
Ф+Nм + инг. ур	5,43	2,76	1,35
Ф+Nм + инг. нитр.	5,15	2,83	1,52
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	3,70	3,14	1,55

В период кущения существенных различий в накоплении сухой массы между вариантами не выявлено, что обусловлено незначительным объемом общей биомассы. Однако уже в эту фазу проявились различия в содержании азота в растительных тканях. Наибольшая концентрация азота зафиксирована при использовании карбамида с ингибитором уреазы – 5,43% и капсулированной формы с покрытием МКФ 50 мкм – 5,22%, что свидетельствует о высокой ранней доступности азота из данных модификаций (табл. 10).

К периоду интенсивного роста вегетативной массы преимущество азотных удобрений стало выраженным. Так, фазу выхода в трубку максимальную биомассу (1,15 г/растение) сформировали растения на фоне традиционного карбамида (Nm), в то время как варианты с модифицированными формами, за исключением карбамида с ингибитором нитрификации (0,97 г/растение), демонстрировали близкие, но несколько меньшие значения (1,01–1,11 г/растение). При этом наивысшие значения по содержанию азота в растениях в эту фазу были получены на вариантах с комбинированным применением ингибиторов (3,14%) и капсулированным карбамидом с покрытием 100 мкм (3,02%), что коррелирует с данными рисунка 6 о высоком поглощении азота в эту фазу и подтверждает эффективность данных форм в поддержании оптимального азотного питания в период максимальной потребности (табл. 10).

К концу вегетации установлены заметные различия в накопленной пшеницей биомассе. В фазе колошения-цветения вариант «Nm + МКФ 50 мкм» показал абсолютный максимум – 2,03 г/растение, что на 19% превышает результат на традиционном карбамиде (1,70 г/растение). Более высокие, чем в варианте сравнения «Nm», показатели сухой массы были также у растений на вариантах с ингибитором уреазы (1,96 г/растение) и капсулированным карбамидом с покрытием 100 мкм (1,88 г/растение). Это указывает на пролонгированное действие данных форм удобрения, способствующее более продолжительному и эффективному росту в заключительные фазы развития (Шаповал и др., 2021; Лапушкин, Лапушкина, 2025; Gil-Ortiz et al., 2020). Содержание азота к фазе колошения-цветения ожидаемо снизилось во всех вариантах вследствие процессов

ростового разбавления. Тем не менее, наиболее высокие его концентрации сохранились на вариантах, где применялся карбамид с покрытием МКФ 100 мкм – 1,58% и карбамид с добавлением двух ингибиторов – 1,55% (табл. 10).

Данные полевых исследований 2023-2024 гг. показали, что модифицированные формы карбамида также обеспечивают сбалансированное азотное питание яровой пшеницы на протяжении всего периода вегетации, подтверждая и уточняя тенденции, выявленные в вегетационных опытах.

Динамика поглощения азота растениями в зависимости от формы удобрения в среднем за два года полевых исследований представлена на рисунке 7.

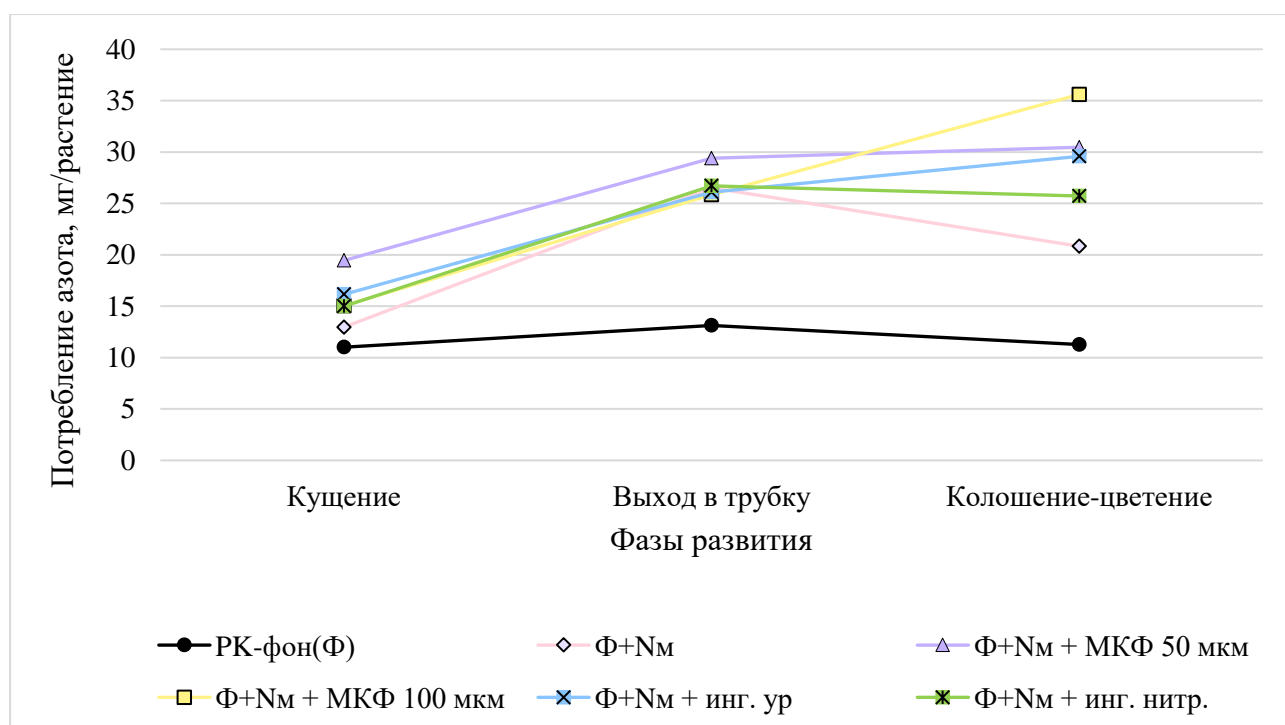


Рисунок 7 – Динамика потребления азота яровой пшеницей в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.)

На рисунке 7 кривые потребления демонстрируют принципиальные различия между традиционным и модифицированными формами карбамида. Традиционный карбамид характеризовался относительно ранним пиком поглощения, после которого интенсивность потребления азота растениями существенно снижалась к фазе колошения-цветения. Напротив, капсулированные формы карбамида и форма с ингибитором уреазы обеспечивали более равномерное и пролонгированное поступление азота, достигая максимума поглощения в период колошения-цветения.

В фазу трубкования наибольшее поглощение (29 мг N/растение) было отмечено на варианте с капсулированным карбамидом с покрытием 50 мкм, в то время как на вариантах с покрытием 100 мкм и с ингибитором уреазы этот показатель составлял 26 мг/растение. К фазе колошения-цветения преимущество медленнодействующих форм стало более выраженным: количество потребленного азота в вариантах «Nм + МКФ 50 мкм», «Nм + МКФ 100 мкм» и «Nм + инг. ур.» достигло 30-36 мг N/растение, что на 43-71% превышает показатель для традиционного карбамида (21 мг N/растение). Наибольшей интенсивностью поглощения азота (36 мг N/растение) в этот период характеризовались растения в варианте с капсулированным карбамидом с покрытием 100 мкм (рис. 7).

Полученные данные также наглядно свидетельствуют о сдвиге периода максимального потребления азота к более поздним, что важно не только в формировании урожая пшеницы, но и качества зерна (Минеев, 1971; Новиков, 2012). Достаточная обеспеченность растений пшеницы азотом в фазе колошения-цветения способствует большему накоплению белка в зерне (Новиков, 2012; Завалин, Соколов, 2018).

Детальная характеристика ростовых процессов и азотного статуса растений яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида в условиях полевого опыта приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Динамика накопления биомассы и обеспеченность растений яровой пшеницы азотом в основные фазы развития (полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.)

Вариант	Кущение	Выход в трубку	Колошение - цветение
1	2	3	4
Сухая масса г/растение			
РК-фон (Ф)	0,45	1,15	1,25
Ф+Nм (вар. срав.)	0,48	1,49	1,70
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	0,69	1,62	1,99
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	0,46	1,56	2,30
Ф+Nм + инг. ур	0,67	1,54	2,08
Ф+Nм + инг. нитр.	0,60	1,41	1,80

Таблица 11 (продолжение)

1	2	3	4
Содержание азота, %			
РК-фон (Ф)	2,34	1,14	0,90
Ф+N _м (вар. срав.)	2,65	1,79	1,23
Ф+N _м + МКФ 50 мкм	2,89	1,92	1,53
Ф+N _м + МКФ 100 мкм	3,30	1,75	1,55
Ф+N _м + инг. ур	2,47	1,77	1,42
Ф+N _м + инг. нитр.	2,48	1,95	1,43

В фазу кушения заметное превосходство по накоплению сухой биомассы показали варианты «N_м + МКФ 50 мкм» (0,69 г/растение) и «N_м + инг. ур» (0,67 г/растение). Превышение над вариантом сравнения «N_м» (0,48 г/растение) составило 44% и 40%, соответственно. Это указывает на улучшение условий азотного питания на ранних этапах онтогенеза, что может быть связано с уменьшением потерь аммиака (Trenkel, 2010) и лучшей доступностью азота для проростков. При этом наиболее высокое содержание азота в растительных тканях (3,30%) было установлено на варианте «N_м + МКФ 100 мкм» – 3,30 %, что на 0,65% превышало показатель варианта сравнения «N_м» (2,65%) (табл.11).

В фазе выхода в трубку в варианте «N_м + МКФ 50 мкм» тенденция к более интенсивному росту сохранилась. Сухая масса растения в данном варианте составила 1,62 г, что превысило показатели, полученные с обычной мочевиной на 9%, содержание азота в растениях было выше на 0,13%. При применении форм «N_м + МКФ 100 мкм» и «N_м + инг. ур» биомасса растений была выше на 3-5%, чем в варианте с внесением обычного карбамида, но содержание азота в тканях немного ниже (табл. 11).

Наиболее существенные различия сформировались к фазе колошения-цветения. Вариант «N_м + МКФ 100 мкм» продемонстрировал максимальный результат – сухая масса растения 2,30 г/растение, что на 35% выше, чем на традиционном карбамиде (1,70 г/растение). Заметный результат также показали варианты «N_м + инг. ур» (2,08 г/растение, +22%) и «N_м + МКФ 50 мкм» (1,99 г/растение, +17%) (табл. 11). Эти данные во многом находятся в соответствии с динамикой потребления азота, представленной на рисунке 7 и подтверждают, что

продолжительное питание обеспечивает более продолжительный и эффективный период роста.

Наиболее повышенный азотный статус растений был отмечен в вариантах с применением капсулированных форм карбамида. В варианте «N_м + МКФ 100 мкм» концентрация элемента в сухой биомассе составила 1,55%, в варианте «N_м + МКФ 50 мкм» – 1,53%, что на 0,32% и 0,3%, соответственно, превышало показатель, полученный в варианте с традиционным карбамидом (1,23%). Данный результат свидетельствует о принципиальном преимуществе капсулированных форм карбамида, так как более высокий уровень азота в растениях пшеницы в фазе колошения-цветения создает лучшие предпосылки для дальнейшего эффективного оттока азотистых соединений в репродуктивные органы, что напрямую влияет на содержание белка в зерне и, следовательно, на его качество (Новиков 2012; Завалин, Соколов, 2018) (табл. 11).

В варианте, в котором карбамид применялся с ингибитором нитрификации, содержание азота в растениях в период выхода в трубку было максимальным и составило 1,95%. К фазе колошение-цветение содержание азота составило 1,43%, что сопоставимо с вариантом, в котором использовали карбамид с ингибитором уреазы (1,42 %). Однако интенсивность накопления биомассы пшеницы в критические периоды потребления азота была самой низкой, что может говорить о более растянутом периоде поступления доступного азота в растения пшеницы из данной формы карбамида по сравнению с другими формами карбамида пролонгированного действия (табл.11).

Таким образом, результаты вегетационных и полевых опытов свидетельствуют, что модифицированные формы карбамида, в особенности капсулированные с покрытием на основе монокальцийфосфата, обеспечивают высокую доступность азота для растений в фазы его максимального поглощения, а также более продолжительное азотное питание, способствующее интенсивному накоплению биомассы к фазе колошения-цветения и оказывающее положительное влияние на формирование урожая и качество 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. Помимо оптимизации азотного питания и интенсификации роста вегетативной массы, что было показано выше, модифицированные формы удобрения оказывают непосредственное влияние на основные показатели продуктивности.

Результаты опытов, отражающие влияние различных форм карбамида на ростовые характеристики, структуру урожая, урожай яровой пшеницы, соотношение основной и побочной продукции по вегетационным опытам (2022-2023 гг.) систематизированы в таблицах 12-14, по полевым опытам (2023-2024 гг.) – в таблицах 15-17. Представленные данные позволяют оценить влияние азотного режима питания, обусловленного внесением различных форм карбамида, не только на общую биомассу, но и на ключевые параметры, определяющие конечную урожайность яровой пшеницы.

Анализ усредненных данных за два года вегетационных исследований выявил устойчивую тенденцию к улучшению большинства изучаемых показателей под влиянием модифицированных форм карбамида по сравнению как с фоновым вариантом «РК», так и с традиционной формой карбамида. Применение всех форм азотных удобрений по сравнению с фоном «РК» способствовало достоверному увеличению высоты растений и улучшению показателей структуры урожая (табл. 12).

Среди вариантов с внесением азотных удобрений максимальные значения по высоте растений (93-95 см) были отмечены при использовании капсулированных форм карбамида и формы с добавлением ингибитора нитрификации, что достоверно превысило показатель варианта сравнения «Nm» (88 см) на 5-7 см или 6-8% и является признаком более интенсивного вегетативного роста, обеспеченного оптимизированным азотным питанием (Лапушкин, Лапушкина, 2025; Gil-Ortiz et al., 2020) (табл. 12).

Таблица 12 – Влияние разных форм карбамида на высоту растений и элементы структуры урожая яровой пшеницы (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Высота растения, см	Длина колоса, см	Количество зерен в колосе, шт.	Масса колоса, г	Масса зерна с колоса, г
2022 г.					
РК-фон (Ф)	86	7,0	17	0,69	0,56
Ф+Nм (вар. срав.)	84	11,3	32	1,57	1,28
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	92	10,8	33	1,73	1,37
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	90	10,8	33	1,73	1,39
Ф+Nм + инг. ур	95	10,8	36	1,82	1,44
Ф+Nм + инг. нитр.	97	10,1	34	1,87	1,42
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	92	10,2	31	1,65	1,29
НСР₀₅	7	0,5	3	0,10	0,09
2023 г.					
РК-фон (Ф)	76	5,6	12	0,42	0,33
Ф+Nм (вар. срав.)	93	8,7	24	1,14	0,95
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	97	8,9	27	1,22	1,03
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	96	8,5	28	1,15	0,99
Ф+Nм + инг. ур	87	8,8	28	1,09	0,92
Ф+Nм + инг. нитр.	90	8,7	22	1,09	0,90
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	88	8,5	20	1,13	0,93
НСР₀₅	4	0,3	3	0,05	0,05
Среднее за 2 года					
РК-фон (Ф)	81	6,3	14	0,55	0,45
Ф+Nм (вар. срав.)	88	10,0	28	1,35	1,12
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	95	9,8	30	1,47	1,20
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	93	9,6	30	1,44	1,19
Ф+Nм + инг. ур	91	9,8	32	1,46	1,18
Ф+Nм + инг. нитр.	93	9,4	28	1,48	1,16
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	90	9,4	26	1,39	1,11
НСР₀₅	4	0,3	2	0,06	0,06

Эффект от применения модифицированных форм карбамида на формирование структуры урожая пшеницы был сопоставим или превосходил традиционную форму карбамида.

Длина колоса в вариантах «Nм + МКФ 50 мкм» и «Nм + инг. ур» составляла 9,8 см, что сопоставимо по данному показателю с вариантом, в котором вносили традиционную форму карбамида (длина колоса 10,0 см). Статистически значимых различий в формировании колоса не было обнаружено. В вариантах с капсулированным карбамидом с толстым покрытием, карбамидом, обработанным ингибитором нитрификации, и карбамидом с двумя ингибиторами длина колоса

варьировалась от 9,4 см до 9,6 см, что существенно меньше (на 4-6%) относительно варианта сравнения «Nм» (при НСР₀₅ = 0,3 см) (табл. 12).

Количество зерен в колосе в среднем за два года в вариантах с модифицированными формами карбамида изменялось от 26 шт. до 32 шт. Наибольшее количество зерен сформировалось в вариантах с внесением капсулированных форм и карбамида с ингибитором уреазы. В данных вариантах количество зерен в колосе составляло 30-32 шт., что на 7-14% выше, чем в варианте сравнения «Nм», где среднее количество зерен в колосе составляло 28 шт. (табл. 12).

Во все годы исследований в вариантах с модифицированными формами карбамида сформировывались более тяжелые колосья с большей массой зерна. В среднем за два года масса колоса в этих вариантах варьировалась от 1,39 г до 1,48 г, а масса зерна с колоса составила 1,11-1,20 г. В вариантах: «Nм + МКФ 50 мкм», «Nм + МКФ 100 мкм», «Nм + инг. ур.» в среднем за два года было отмечено достоверное увеличение массы зерна с колоса по сравнению с традиционным карбамидом. Максимальная масса зерна с колоса была получена в варианте «Nм + МКФ 50 мкм» – 1,20 г, что достоверно превышало показатель варианта «Nм» на 7%. В вариантах «Nм + МКФ 100 мкм» и «Nм + инг. ур.» масса зерна с колоса была существенно выше на 6% и 5%, соответственно (табл.12).

Также важно отметить, что в более благоприятных условиях вегетации 2022 года преимущество пролонгированных форм было выражено сильнее, особенно по массе колоса и массе зерна с колоса. Это свидетельствует о их высокой эффективности в условиях, способствующих реализации потенциала продуктивности сорта.

Конечным критерием агрономической эффективности любого удобрения является его способность повышать урожайность культуры (Шеуджен и др., 2013а; Муравин и др., 2013а). Сводные данные по величине урожая зерна яровой пшеницы и коэффициенту хозяйственной эффективности в вегетационном опыте за 2022-2023 гг. представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Прибавки урожая яровой пшеницы и коэффициент хозяйственной эффективности в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Урожай, г/сосуд	Прибавка к фону		Прибавка к варианту сравнения		К хоз
		г/сосуд	%	г/сосуд	%	
2022 г.						
РК-фон (Ф)	11,2	-	-	-	-	0,42
Ф+Nm (вар. срав.)	25,7	14,5	129	-	-	0,48
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	27,4	16,2	145	1,8	7	0,46
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	27,8	16,6	148	2,1	8	0,48
Ф+Nm + инг. ур	28,8	17,6	157	3,1	12	0,47
Ф+Nm + инг. нитр.	28,4	17,2	153	2,8	11	0,47
Ф+Nm + инг. ур.+ нитр.	25,7	14,5	130	0,1	0	0,44
НСР₀₅	1,7	-	-	-	-	-
2023 г.						
РК-фон (Ф)	6,7					0,38
Ф+Nm (вар. срав.)	19,0	12,4	185	-	-	0,46
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	20,5	13,8	207	1,5	8	0,47
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	19,7	13,0	195	0,7	3	0,47
Ф+Nm + инг. ур	18,4	11,7	175	-0,7	-4	0,46
Ф+Nm + инг. нитр.	18,0	11,3	169	-1,1	-6	0,46
Ф+Nm + инг. ур.+ нитр.	18,7	12,0	180	-0,4	-2	0,47
НСР₀₅	1,0	-	-	-	-	-
Среднее за 2 года						
РК-фон (Ф)	8,9	-	-	-	-	0,40
Ф+Nm (вар. срав.)	22,4	13,4	150	-	-	0,47
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	24,0	15,0	168	1,6	7	0,47
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	23,7	14,8	166	1,4	6	0,47
Ф+Nm + инг. ур	23,6	14,6	164	1,2	5	0,47
Ф+Nm + инг. нитр.	23,2	14,3	159	0,8	4	0,47
Ф+Nm + инг. ур.+ нитр.	22,2	13,3	148	-0,2	-1	0,45
НСР₀₅	1,2	-	-	-	-	-

Согласно данным таблицы 13 все формы азотных удобрений обеспечили достоверную прибавку урожая по сравнению с фоном «РК». В среднем за два года традиционный карбамид «Nm» повысил урожай зерна пшеницы на 13,4 г/сосуд (150%). Однако наиболее высокие средние показатели урожайности (23,2-24,0 г/сосуд) были получены на вариантах с формами карбамида модифицированными монокальцийфосфатом, ингибитором уреазы, ингибитором нитрификации.

В среднем за два года вегетационных опытов максимальный урожай зерна (24,0 г/сосуд) был получен при применении капсулированного карбамида с тонким покрытием – «Nm + МКФ 50 мкм». В данном варианте величина урожая была выше

на 15,0 г/сосуд (168%) по сравнению с фоном РК и на 1,6 г/сосуд или 7% относительно варианта с внесением стандартной формы карбамида «Nm» (табл. 13). Прибавки урожая статистически достоверные при $НСР_{05} = 1,2$ г/сосуд.

Капсулированный карбамид с покрытием МКФ 100 мкм и форма с ингибитором уреазы также обеспечили получение статистически значимых прибавок урожая. По отношению к фоновому варианту «РК» прибавка урожая в варианте «Nm + МКФ 100 мкм» составила 14,8 г/сосуд (166%), в варианте «Nm + инг. ур» – 14,6 г/сосуд (164%), соответственно. По величине полученного урожая данные пролонгированные формы карбамида превосходят традиционную на 1,4 г/сосуд (6%) и 1,2 г/сосуд (5%), соответственно (табл. 13).

Карбамид с ингибитором нитрификации поспособствовал получению существенной прибавки урожая относительно фона «РК» – 14,3 г/сосуд (159%). По сравнению с обычным карбамидом величина полученного урожая при применении карбамида с ингибитором нитрификации была выше на 0,8 г/сосуд (4%). Однако полученная прибавка урожая не была статистически достоверной (табл. 13).

Среди всех изученных модификаций карбамида пролонгированного действия форма с комбинацией двух ингибиторов «Nm + инг. ур.+ нитр.» в среднем за два года не показала достоверной прибавки по сравнению с обычной мочевиной «Nm» (-1%), а в отдельные годы ее эффективность была нестабильной. Это указывает на возможный избыточный или неоптимальный характер торможения процессов трансформации азота в почве при совместном применении ингибиторов (табл. 13).

Известно, что эффективность минеральных удобрений может сильно зависеть от погодных условий (Проберж, 2004; Шеуджен и др., 2017; Алферов, 2020; Визирская и др., 2020). В наших исследованиях также следует отметить межгодовую вариабельность. В более благоприятном 2022 году наибольшая прибавка урожая была отмечена в случае использования карбамида с ингибитором уреазы (157% к «РК» и 12% к «Nm»), в то время как в 2023 году наилучшие результаты показали капсулированные формы – 195-207% к «РК» и 3-8% к «Nm» (табл. 13).

Важным аспектом оценки эффективности удобрения является не только общий прирост биомассы, но и характер ее распределения между хозяйственно ценной (зерно) и побочной (солома) продукцией, что отражают коэффициент хозяйственной эффективности и отношение побочной продукции к основной (Кошкин и др., 2005; Гриб и др., 2017). Соответствующие данные вегетационных опытов 2022-2023 гг. представлены в таблицах 14 и 15.

Коэффициент хозяйственной эффективности (Кхоз) или уборочный индекс, отражающий долю массы хозяйственно полезного органа в надземной биомассе в фазе уборочной спелости для злаковых культур составляет 0,35-0,70 (Кошкин и др., 2005; Скаженник и др., 2025) В наших опытах Кхоз был близок к средним значениям и находился на одном уровне во всех вариантах с внесением азотных удобрений – 0,45-0,47 (табл. 14).

Таблица 14 – Масса и отношение основной и побочной продукции в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Масса зерна, г/сосуд			Масса соломы, г/сосуд			Отношение побочной продукции к основной		
	2022	2023	Сред.	2022	2023	Сред.	2022	2023	Сред.
РК-фон (Ф)	11,2	6,7	8,9	12,7	9,1	10,9	1,1	1,4	1,2
Ф+Nм (вар. срав.)	25,7	19,0	22,4	21,0	18,5	19,7	0,8	1,0	0,9
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	27,4	20,5	24,0	25,3	18,9	22,1	0,9	0,9	0,9
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	27,8	19,7	23,7	23,5	18,8	21,1	0,8	1,0	0,9
Ф+Nм + инг. ур	28,8	18,4	23,6	24,9	17,9	21,4	0,9	1,0	0,9
Ф+Nм + инг. нитр.	28,4	18,0	23,2	24,8	16,9	20,9	0,9	0,9	0,9
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	25,7	18,7	22,2	25,4	17,4	21,4	1,0	0,9	1,0
НСР₀₅	1,7	1,0	1,2	2,2	1,1	1,2	-	-	-

Применение азотных удобрений существенно увеличило выход как зерна, так и соломы по сравнению с фоном «РК». Однако модифицированные формы карбамида способствовали формированию большей вегетативной массы растений по сравнению с обычной мочевиной, особенно в опыте 2022 года. В среднем за два года масса соломы на вариантах с модифицированным карбамидом была выше на 6-12%, чем в варианте «Nм» (табл. 14). Это свидетельствует об способности пролонгированных форм карбамида поддерживать более интенсивный рост на

протяжении длительного периода, что согласуется с ранее выявленной динамикой накопления сухой биомассы по фазам развития.

Отношение побочной продукции к основной продукции (солома/зерно) является важным индикатором эффективности оттока ассимилянтов в репродуктивные органы (Посыпанов и др. 2007; Гатаулина и др. 2016). Во все годы исследований в фоновом варианте «РК» отношение побочной продукции к основной было наибольшим (1,2 в среднем за два года), что характерно для растений с дефицитом питания, формирующих малозернистый колос и избыточную вегетативную массу. Во всех вариантах с внесением азотных удобрений отношение солома/зерно было ниже и стабильно составляло в среднем 0,9-1,0 (табл. 14).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изучаемые формы карбамида пролонгированного действия обеспечивают сбалансированное азотное питание в течение периода вегетации, которое, в свою очередь, способствуют максимальному накоплению общей биомассы (что видно по массе соломы), одновременно гарантируя высокий и пропорциональный прирост хозяйственно ценной части урожая – зерна, что согласуется с исследованиями Шаповал О.А. (2021).

В 2023-2024 гг. для верификации данных, полученных в вегетационных условиях, были проведены мелкоделяночные полевые опыты. Это позволило оценить агрономическую эффективность модифицированных форм карбамида в условиях, максимально приближенных к реальной практике возделывания яровой пшеницы, с учетом более полного комплекса почвенно-климатических факторов.

Схема опыта в полевых исследованиях была скорректирована. Из нее был исключен вариант с комбинированным применением ингибиторов уреазы и нитрификации «Nm + инг. ур.+ нитр.», так как данная модификация карбамида не отличалась статистически значимой эффективностью в вегетационных опытах. Таким образом, исследования в полевых условиях были сосредоточены на оценке наиболее перспективных форм: капсулированного карбамида с покрытиями различной толщины и карбамида с отдельным применением ингибиторов уреазы и нитрификации.

Данные о влиянии различных форм карбамида на ростовые характеристики и компоненты структуры урожая яровой пшеницы в полевом опыте представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Влияние разных форм карбамида на высоту растений и элементы структуры урожая яровой пшеницы (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Высота растения, см	Масса 1 растения, г	Длина колоса, см	Количество зерен в колосе, шт	Масса колоса, г	Масса зерна с колоса, г
2023 г.						
РК-фон (Ф)	86	2,11	6,5	23	1,12	0,91
Ф+Nm (вар. срав.)	89	2,15	7,6	24	1,24	0,96
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	96	2,91	8,9	31	1,66	1,35
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	96	2,74	8,6	30	1,54	1,25
Ф+Nm + инг. ур	96	2,76	7,9	31	1,55	1,27
Ф+Nm + инг. нитр.	92	2,84	8,0	32	1,56	1,32
НСР₀₅	6	0,44	0,7	4	0,27	0,20
2024 г.						
РК-фон (Ф)	78	1,51	6,7	21	0,74	0,66
Ф+Nm (вар. срав.)	84	1,90	8,0	26	1,14	0,92
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	86	2,03	8,4	25	1,19	0,96
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	88	2,16	8,6	29	1,24	1,03
Ф+Nm + инг. ур	83	1,79	7,7	26	1,07	0,86
Ф+Nm + инг. нитр.	86	2,04	7,9	27	1,19	0,97
НСР₀₅	3	0,14	0,7	3	0,11	0,08
Среднее за 2 года						
РК-фон (Ф)	82	1,81	6,6	22	0,93	0,78
Ф+Nm (вар. срав.)	86	2,02	7,8	25	1,19	0,94
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	91	2,47	8,7	28	1,43	1,16
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	92	2,45	8,6	29	1,39	1,14
Ф+Nm + инг. ур	90	2,28	7,8	28	1,31	1,07
Ф+Nm + инг. нитр.	89	2,44	7,9	30	1,37	1,14
НСР₀₅	3	0,16	0,4	2	0,11	0,08

Анализ данных за два года исследований выявил четкую положительную динамику. Установлено, что применение модифицированных форм карбамида достоверно улучшало все изучаемые параметры по сравнению как с фоновым вариантом «РК», так и с традиционной формой карбамида «Nm».

Высота растений в вариантах с разными формами карбамида пролонгированного действия была на 7-10 см (9-12%) больше, чем в фоновом варианте «РК» (82 см) и на 3-6 см (4-7%), чем в варианте сравнения – «Nm» (86 см). Удлинение растений пшеницы во всех вариантах было достоверным (НСР₀₅ = 3 см).

Наибольшая высота растений отмечалась в вариантах с капсулированными формами и составляла 91-92 см (табл. 15).

Элементы структуры урожая также претерпели положительные изменения. Средняя масса одного растения в вариантах с модифицированными формами была существенно (при $НСП_{05} = 0,16$ г) выше показателей варианта со стандартной мочевиной «Nm» – на 0,26-0,45 г (13-22%) и фона «PK» – на 0,47-0,66 г (26-36%). Лучшие показатели отмечались в вариантах с капсулированным карбамидом и карбамидом с добавлением ингибитора нитрификации. При этом максимальное значение по массе одного растения (2,47 г) было зафиксировано в варианте «Nm + МКФ 50 мкм» (табл. 15).

Наибольшая длина колоса была отмечена у растения в вариантах с применением капсулированных форм карбамида (8,6-8,7 см), тогда как в фоновом варианте «PK» этот показатель был равен 6,6 см, а в варианте сравнения «Nm» – 7,8 см. Увеличение длины колоса в данных вариантах было достоверным ($НСП_{05}=0,4$ см) как относительно фона, так и относительно варианта с обычной мочевиной. В вариантах с ингибиторами длина колоса была на уровне с обычной мочевиной (табл. 15).

Применение стандартной и модифицированных форм карбамида обеспечило существенное увеличение количества зерен в колосе по сравнению с фоном «PK» (22 шт.) – на 14-35%, при $НСП_{05} = 2$ шт. По сравнению с вариантом с обычным карбамидом, где число зерен в колосе составляло 25 шт. в вариантах с медленнодействующими формами этот показатель увеличился до 28-30 шт. или на 12-20%. Максимальное число зерен (30 шт.) было отмечено в варианте с ингибитором нитрификации «Nm + инг. нитр.» (табл. 15).

Масса колоса в вариантах с азотными удобрениями варьировалась от 1,19 г до 1,43 г, а масса зерна с колоса – 0,94-1,16 г, тогда как в фоновом варианте эти показатели составили 0,93 г и 0,78 г соответственно. Модифицированные формы карбамида способствовали достоверному увеличению массы колоса и массы зерна с колоса по сравнению с обычным карбамидом. В вариантах с капсулированными формами масса колоса была выше на 17-20%, масса зерна с

колоса – на 21-23%. Лучшие показатели в среднем за два года отмечались в варианте, в котором применена капсулированная мочеви́на с тонким покрытием «Nм + МКФ 50 мкм». Ингибиторы немного уступали капсулированным формам. В сравнении с обычным карбамидом масса колоса в этих вариантах была больше на 10-15%, масса зерна с одного колоса – на 14-21%. Среди стабилизированных удобрений форма карбамида с ингибитором нитрификации показала лучший результат (табл. 15).

Следует отметить, что в 2023 году, охарактеризовавшемся более благоприятными условиями для реализации потенциала урожайности пшеницы, преимущество модифицированных форм, особенно «Nм + МКФ 50 мкм», было максимальным. В 2024 году, в условиях повышенного увлажнения, эффективность капсулированных форм сохранилась, при этом форма с покрытием 100 мкм показала лучший результат по большинству параметров. Это указывает на стабильность действия капсулированных форм карбамида в различных погодных условиях. Таким образом, в полевых условиях была подтверждена способность капсулированных форм карбамида стимулировать вегетативный рост и улучшать важнейшие элементы продуктивности колоса, формируя основу для более высокой урожайности.

Карбамид с ингибитором нитрификации в разные годы исследований не уступал по эффективности капсулированным формам. Мочевина с ингибитором уреазы в условиях 2024 г., который характеризовался периодами избыточного увлажнения в течение периода вегетации, работала хуже, чем другие модификации, но при этом преимущество над обычной формой карбамида потеряно не было (табл. 15).

Ключевым итогом полевых исследований является количественная оценка влияния модифицированных форм карбамида на конечную урожайность зерна яровой пшеницы. Сводные данные по урожайности, прибавкам и коэффициенту хозяйственной эффективности (Кхоз) представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Прибавки урожая яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Урожай, г/м ²	Прибавка к фону		Прибавка к варианту сравнения		К хоз
		г/м ²	%	г/м ²	%	
2023 г.						
РК-фон (Ф)	375	-	-	-	-	0,43
Ф+N _M (вар. срав.)	510	135	36			0,45
Ф+N _M + МКФ 50 мкм	581	206	55	71	14	0,46
Ф+N _M + МКФ 100 мкм	568	193	51	57	11	0,46
Ф+N _M + инг. ур	618	243	65	108	21	0,46
Ф+N _M + инг. нитр.	601	226	60	91	18	0,47
НСР₀₅	64	-	-	-	-	-
2024 г.						
РК-фон (Ф)	391					0,43
Ф+N _M (вар. срав.)	552	161	41			0,48
Ф+N _M + МКФ 50 мкм	627	236	60	76	14	0,47
Ф+N _M + МКФ 100 мкм	583	192	49	32	6	0,47
Ф+N _M + инг. ур	500	109	28	-52	-9	0,48
Ф+N _M + инг. нитр.	544	153	39	-7	-1	0,47
НСР₀₅	34	-	-	-	-	-
Среднее						
РК-фон (Ф)	383					0,43
Ф+N _M (вар. срав.)	531	148	39			0,47
Ф+N _M + МКФ 50 мкм	604	221	58	73	14	0,47
Ф+N _M + МКФ 100 мкм	575	192	50	44	8	0,47
Ф+N _M + инг. ур	559	176	46	28	5	0,47
Ф+N _M + инг. нитр.	573	190	50	42	8	0,47
НСР₀₅	40	-	-	-	-	-

В среднем за два года исследования традиционный карбамид обеспечил получение урожая на уровне 531 г/м² и прибавку к фону «РК» в 39%. В вариантах с применением модифицированных форм по сравнению с фоном в среднем за два года урожай был выше на 46-58%. Кроме того, в среднем за два года, прибавка урожая, полученная с вариантов, в котором применялись капсулированные формы карбамида и карбамид с ингибитором нитрификации была существенно выше, чем в варианте с внесением традиционной формы карбамида (табл. 16).

Наибольшая среднегодовая урожайность (604 г/м²) и максимальная прибавка (73 г/м² или 14%) по сравнению с традиционной формой карбамида были получены при применении капсулированного карбамида с тонким покрытием «N_M + МКФ 50 мкм» (табл.16). Внесение в почву капсулированного карбамида с толстым

покрытием «Nм + МКФ 100 мкм» и карбамида с ингибитором нитрификации «Nм + инг. нитр.» также обеспечило достоверную прибавку урожая в 42-44 г/м² относительно обычного карбамида (НСР₀₅ = 40 г/м²) (табл. 16).

Важно отметить, что удобрение с ингибитором нитрификации в разные годы проявило неодинаковую эффективность. В более влажный 2024 год величина урожая (544 г/м²) в варианте «Nм + инг. нитр.» не превышала таковую в варианте с обычным карбамидом (552 г/м²), а была примерно на том же уровне (табл. 16).

Эффективность мочевины с ингибитором уреазы также различалась по годам. В 2023 году мочевина с ингибитором уреазы по сравнению с обычной мочевиной обеспечила получение наибольшей существенной прибавки урожая, которая составила 108 г/м² или 21 %. Однако в менее благоприятном 2024 году урожайность пшеницы в данном варианте опыта была ниже на 52 г/м² или 9%, чем в варианте с внесением традиционной формы карбамида, что достоверно при НСР₀₅ = 34 г/м² (табл. 16). Это указывает на то, что эффективность разных стабилизаторов азота достаточно сильно зависит от условий окружающей среды, что в свою очередь является характерной чертой для всех медленнодействующих азотных удобрений (Shaviv, 2000; Trenkel, 2010; Lakshani et al., 2023; Govil et al., 2024; Priya et al., 2024).

В полевых опытах Кхоз в опытных вариантах изменялся в тех же пределах, что и в вегетационных исследованиях. На всех вариантах с внесением азотных удобрений Кхоз был оптимальным и находился на одном уровне (0,47), и только в варианте «РК» (0,43) он был ниже на 9% (табл.16).

Данные о распределении общей биомассы между основной и побочной продукцией приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Масса и отношение основной и побочной продукции в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Масса зерна, г/м ²			Масса соломы, г/ сосуд			Отношение побочной продукции к основной		
	2023	2024	Сред.	2023	2024	Сред.	2023	2024	Сред.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РК-фон (Ф)	375	391	383	499	510	504	1,3	1,3	1,3
Ф+Nм (вар. срав.)	510	552	531	620	589	604	1,2	1,1	1,1

Таблица 17 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ф+N _М + МКФ 50 мкм	581	627	604	674	697	686	1,2	1,1	1,1
Ф+N _М + МКФ 100 мкм	568	583	575	676	645	661	1,2	1,1	1,1
Ф+N _М + инг. ур	618	500	559	721	537	629	1,2	1,1	1,1
Ф+N _М + инг. нитр.	601	544	573	691	605	648	1,1	1,1	1,1
НСР₀₅	64	34	40	71	33	45	-	-	-

Применение азотных удобрений за счет оптимизации питания и перераспределения ассимилятов снижало коэффициент отношения соломы к зерну с 1,3 («РК») до 1,1-1,2. Между вариантами с разными формами карбамида различий по этому показателю не выявлено. В среднем за два года в данных вариантах коэффициент отношения побочной продукции к основной составлял 1,1, что считается оптимальным и характерным для зерновых культур (Гусева и др., 2023).

Как и в вегетационных опытах, модифицированные формы, в особенности капсулированные, обеспечили наибольший абсолютный выход зерна и соломы. Например, в среднем за два года в варианте «N_М + МКФ 50 мкм» масса соломы составила 686 г/м², масса зерна – 604 г/м², что на 14% больше, чем на варианте «N_М», а в варианте N_М + МКФ 100 мкм масса соломы и зерна была больше на 9% и 8%, соответственно (табл. 17). Это указывает на формирование более мощного фотосинтетического аппарата без ущерба для репродуктивных органов растений.

Результаты вегетационных и полевых опытов однозначно свидетельствуют, что применение капсулированных форм карбамида с покрытием на основе монокальцийфосфата независимо от условий окружающей среды обеспечивает не только оптимизацию питания растений, но и достоверное улучшение структурных показателей урожая и стабильное повышение урожайности яровой пшеницы по сравнению с традиционной формой карбамида. Это является прямым доказательством перспективности данной технологии модификации карбамида.

Стабилизированные формы карбамида как в вегетационных, так и в полевых опытах показали неоднозначные результаты. Эффективность данных форм во многом зависит от складывающихся погодных условий в течение вегетационного периода. Тем не менее, в благоприятные годы исследований данные формы карбамида показали хорошие результаты.

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

Оценка химического состава зерна и соломы, выноса элементов питания и коэффициентов использования азота из удобрений (KI_N) является ключевым критерием, характеризующим эффективность применяемых форм карбамида и степень усвоения растениями вносимых питательных веществ.

В таблице 18 представлены усредненные за 2 года данные вегетационных опытов по химическому составу зерна и соломы яровой пшеницы.

Таблица 18 – Химический состав зерна и соломы яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, среднее за 2022-2023 гг.)

Вариант	Содержание в зерне, %			Содержание в соломе, %		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
PK-фон (Ф)	1,62	0,91	0,46	0,28	0,19	1,42
Ф+Nm (вар. срав.)	2,24	0,75	0,39	0,46	0,12	1,61
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	2,41	0,84	0,44	0,53	0,12	1,60
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	2,40	0,81	0,40	0,59	0,12	1,75
Ф+Nm + инг. ур	2,37	0,75	0,41	0,49	0,11	1,84
Ф+Nm + инг. нитр.	2,36	0,83	0,38	0,55	0,13	1,74
Ф+Nm + инг. ур.+ нитр.	2,51	0,93	0,39	0,57	0,14	1,75

Использование всех форм карбамида позволило повысить содержание азота в зерне и соломе относительно фона «PK». Так, по сравнению с фоном «PK» содержание азота в зерне на удобренных азотными удобрениями вариантах было выше на 0,62-0,79%, а в соломе – на 0,18-0,31%. (табл. 18).

Содержание азота в зерне и соломе в вариантах с внесением пролонгированных форм было выше на 0,12-0,27% и 0,07-0,13%, чем в опытах с обычным карбамидом. Наиболее высокое содержание азота в зерне (2,40-2,51%) было отмечено в вариантах с применением капсулированных форм карбамида и формы с добавлением двух стабилизаторов азота. Эти данные находятся в соответствии с выявленным фактом поддержания повышенного азотного статуса растений к концу вегетации. В соломе максимальное содержание азота было установлено в варианте «Nm + МКФ 100 мкм» (0,59%). Содержание фосфора в зерне также было выше в вариантах с модифицированными формами, особенно, где применялись мочевина с добавлением двух ингибиторов (P₂O₅ – 0,93%) и мочевина с тонким покрытием

(P₂O₅ – 0,84%). Кроме того, в варианте «Nм + МКФ 50 мкм» в отличии от остальных содержанием калия в зерне было наибольшим (0,44%). Относительно высокое содержание фосфора (0,91%) и калия (0,46%) в зерне, полученном в фоновом варианте «РК», является следствием «эффекта разбавления массой». Низкий урожай и выполненность зерна при азотном голодании привели к уменьшению синтеза запасных веществ, в результате чего доля зольных элементов оказалась выше. В соломе содержание фосфора во всех вариантах с азотными удобрениями было примерно на одном уровне 0,11-0,14%, максимум в варианте «Nм + инг. ур.+ нитр.». Калия в соломе больше всего содержалось в вариантах, в которых мочевины применялась с ингибиторами – 1,74-1,84% и в варианте «Nм + МКФ 100 мкм» – 1,75% (табл. 18).

Данные по хозяйственному выносу элементов питания урожаем пшеницы в вегетационных опытах 2022 и 2023 гг. продемонстрированы в таблице 19.

Таблица 19 – Хозяйственный вынос NPK урожаем яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Хозяйственный вынос, мг/сосуд								
	2022 г.			2023 г.			Среднее		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
РК-фон (Ф)	211	132	277	142	76	154	177	104	216
Ф+Nм (вар. срав.)	634	250	479	557	148	417	596	199	448
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	742	301	520	657	173	469	699	237	494
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	771	291	511	634	164	490	703	227	500
Ф+Nм + инг. ур	707	263	544	607	150	506	657	206	525
Ф+Nм + инг. нитр.	750	303	484	576	155	458	663	229	471
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	770	302	535	612	186	455	691	244	495

В среднем за два года наибольшим поглощением всех элементов питания отличались растения, выращиваемые в следующих вариантах: «Nм + МКФ 50 мкм», «Nм + МКФ 100 мкм», «Nм + инг. ур.+ нитр.». Наибольший вынос азота был отмечен в варианте, в котором вносили мочевины с толстым покрытием, и составлял 703 мг/сосуд, что на 18% превышало вынос азота растениями, удобренными обычной формой карбамида. В вариантах «Nм + инг. ур.+ нитр.» и «Nм + МКФ 50 мкм» вынос азота был немногим меньше (691-699 мг/сосуд), а преимущество над вариантом сравнения «Nм» составило 16-17% (табл. 19). Это

является прямым следствием более высоких показателей урожайности и качества продукции в этих вариантах (табл. 19).

Схожая тенденция наблюдалась и по выносу фосфора и калия. Максимальный вынос фосфора растениями наблюдался в вариантах «Nм + МКФ 50 мкм» – 237 мг/сосуд и «Nм + инг. ур.+ нитр.» – 244 мг/сосуд, что на 19-23% выше, чем в варианте сравнения «Nм» (199 мг/сосуд). Наибольший вынос калия был отмечен в варианте, в котором применяли карбамид с ингибитором уреазы – 525 мг/сосуд (448 мг/сосуд в варианте с традиционным 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. 19).

В таблице 20 продублирован вынос азота урожаем пшеницы и представлены коэффициенты использования азота из удобрений, рассчитанные разностным методом.

Таблица 20 – Вынос и коэффициенты использования азота урожаем яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Вынос N, мг/сосуд			Коэффициенты использования N, %		
	2022	2023	Среднее	2022	2023	Среднее
РК-фон (Ф)	211	142	177	-	-	-
Ф+Nм (вар. срав.)	634	557	596	56	55	56
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	742	657	699	71	69	70
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	771	634	703	75	66	70
Ф+Nм + инг. ур	707	607	657	66	62	64
Ф+Nм + инг. нитр.	750	576	663	72	58	65
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	770	612	691	75	63	69

Коэффициент использования азота растениями из удобрений (KI_N) является одним из основных критериев, применяемых для оценки агрономической эффективности азотных удобрений (Завалин, Соколов, 2019). Разностный KI_N в варианте с применением традиционной формы карбамида в среднем за два года составил 56%. Использование всех модифицированных форм карбамида привело к заметному повышению KI_N . При применении капсулированных форм карбамида был получен наибольший коэффициент использования азота, который составил 70%. Таким образом, применение капсулированных форм карбамида позволило

повысить эффективность усвоения вносимого азота растениями на 14% (или 25 процентных пункта в относительном выражении), что является прямым свидетельством сокращения потерь питательного элемента в течение вегетации и его более полного вовлечения в биологический круговорот (табл. 20). В опытах Шеуджена и др. (2020) применение карбамида пролонгированного действия в посевах риса привело к повышению коэффициента использования азота на 9% по сравнению с обычной формой.

Высокое значение KI_N также было отмечено в варианте с применением мочевины, стабилизированной двумя ингибиторами – 69%, что на 13% выше, чем у обычного карбамида. Раздельное применение ингибиторов повысило KI_N всего на 8-9% (табл. 20).

В таблицах 21-23 приведены данные по химическому составу урожая, выносу элементов питания урожаем и коэффициенты использования азота удобрений в полевом опыте.

Таблица 21– Химический состав зерна и соломы яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, среднее за 2023-2024 гг.)

Вариант	Содержание в зерне, %			Содержание в соломе, %		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
РК-фон (Ф)	2,27	0,95	0,50	0,36	0,28	1,00
Ф+Nm (вар. срав.)	2,54	1,12	0,53	0,52	0,36	1,43
Ф+Nm + МКФ 50 мкм	2,51	1,11	0,50	0,48	0,30	1,62
Ф+Nm + МКФ 100 мкм	2,61	1,22	0,56	0,47	0,35	1,64
Ф+Nm + инг. ур	2,68	1,20	0,59	0,50	0,35	1,57
Ф+Nm + инг. нитр.	2,71	1,16	0,50	0,49	0,39	1,40

В полевых условиях тенденция к повышению содержания азота в зерне под влиянием модифицированных форм также подтвердилась. Наибольшая концентрация азота в зерне (2,68-2,71%) была отмечена в вариантах со стабилизаторами азота. В вариантах с капсулированными формами содержание азота в зерне (2,51-2,61%) также было заметно выше или на одном уровне с вариантом, в котором применяли обычный карбамид (2,54%). Наибольшим содержанием фосфора и калия в зерне отличались варианты «Nm + МКФ 100 мкм» (P₂O₅ – 1,22%; K₂O – 0,56 %) и «Nm + инг. ур» (P₂O₅ – 1,20%; K₂O – 0,59 %). Варианты, где применялась мочевина с тонким покрытием и мочевина,

стабилизированная ингибитором нитрификации, по содержанию фосфора и калия были на уровне обычного карбамида «Nм» (табл. 21).

Содержание азота в соломе во всех вариантах с пролонгированными удобрениями было несколько меньшим, чем на варианте с мочевиной, что может быть связано с эффектом разбавления массой и лучшим оттоком ассимилятов в репродуктивные органы. Наибольшее содержание калия в соломе (1,57-1,64%) отмечалось в вариантах с капсулированными формами карбамида и карбамида с ингибитором уреазы. Абсолютный минимум по содержанию всех элементов питания в зерне и соломе был в фоновом варианте (табл. 21).

Наибольшим суммарным выносом всех питательных элементов отличались растения, удобренные капсулированными формами карбамида. При этом в среднем за два года максимальный вынос азота был отмечен в варианте «Nм + инг. нитр.» и составил 16,1 г/м², что превышало значения варианта сравнения «Nм» на 13%. Модификация мочевины с покрытием МКФ 50 мкм обеспечила вынос азота на уровне 15,9 г/м², с покрытием 100 мкм – 15,6 г/м², что было выше на 11% и 9%, чем на обычном карбамиде. В этих вариантах отмечался больший вынос калия – 12,0-12,3 г/м², против 9,8 г/м² на варианте сравнения «Nм». Наибольший вынос фосфора отмечался в вариантах «Nм + МКФ 100 мкм» – 8,0 г/м² и «Nм + инг. нитр.» – 7,9 г/м², тогда как в варианте с обычным карбамидом он составлял 7,0 г/м² (табл. 22).

Таблица 22 – Хозяйственный вынос NPK урожаем яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Общий вынос, г/м ²								
	2023 г.			2024 г.			Среднее		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
РК-фон (Ф)	8,7	4,0	5,6	9,4	4,7	6,4	9,0	4,4	6,0
Ф+Nм (вар. срав.)	13,7	6,9	7,7	15,0	7,0	11,9	14,3	7,0	9,8
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	15,6	7,0	8,9	16,2	8,1	15,6	15,9	7,6	12,3
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	15,4	8,0	9,7	15,8	8,0	14,4	15,6	8,0	12,0
Ф+Nм + инг. ур	16,1	8,4	10,4	14,8	6,9	11,6	15,5	7,6	11,0
Ф+Nм + инг. нитр.	16,1	8,3	9,3	16,0	7,5	11,1	16,1	7,9	10,2

Средний КИ_N для традиционной формы карбамида составил 59%. Все пролонгированные формы карбамида, как и в вегетационном опыте обеспечивали заметное повышение коэффициента использования азота из удобрений. Среди

модифицированных форм максимальный KI_N был отмечен для формы с ингибитором нитрификации (78%), что указывает на эффективное торможение процесса нитрификации, сокращение потерь азота и его сохранение в доступных для растений формах. Среди капсулированных форм в среднем за два года наибольший коэффициент использования азота (76%) был зафиксирован в варианте, где применялась мочевины с тонким покрытием, что, в свою очередь, указывает на эффективность покрытия на основе монокальцийфосфата в достижении эффекта пролонгации, оптимизации питания и снижения потерь. Обе эти формы карбамида пролонгированного действия повышали KI_N на 17-19% по сравнению с традиционной формой карбамида (табл. 23).

Таблица 23 – Вынос и коэффициенты использования азота урожаем яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Вынос N, г/м ²			Коэффициенты использования N, %		
	2023	2024	Среднее	2023	2024	Среднее
PK-фон (Ф)	8,7	9,4	9,0	-	-	-
Ф+N _м (вар. срав.)	13,7	15,0	14,3	56	63	59
Ф+N _м + МКФ 50 мкм	15,6	16,2	15,9	77	75	76
Ф+N _м + МКФ 100 мкм	15,4	15,8	15,6	75	71	73
Ф+N _м + инг. ур	16,1	14,8	15,5	83	61	72
Ф+N _м + инг. нитр.	16,1	16,0	16,1	83	74	78

Коэффициенты использования азота в вариантах «N_м + МКФ 100 мкм» и «N_м + инг. ур» были примерно на одном уровне – 72-73% и превосходили обычный карбамид на 13-14% (табл. 23).

Следует отметить высокую стабильность показателя KI_N в вариантах с капсулированными формами (разброс между годами не превышает 4%). В то же время, варианты с разными стабилизаторами азота показали значительную межгодовую вариабельность, в особенности вариант с ингибитором уреазы (KI_N 2023 – 83%, 2024 – 61%). У удобрения с ингибитором нитрификации межгодовой разброс по величине KI_N был выше и составил 9% (табл. 23). Все это указывает на большую зависимость эффективности стабилизаторов азота от погодных условий, а именно от температуры и влажности (Смирнов и др., 1987; Маннхайм, Бергер, 2015; Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013; Dai et al., 2013; Sharma et al., 2023).

Полученные результаты показывают, что формы карбамида пролонгированного действия оказывают комплексное положительное влияние, выражающееся не только в достоверном увеличении урожайности, но и в повышении эффективности использования внесенного азота растениями. По сравнению с традиционным карбамидом, применение пролонгированных форм обеспечивает повышение коэффициента использования азота в среднем на 8-19%. В исследованиях Qi и др. (2021) на кукурузе при применении покрытых и стабилизированных форм азотных удобрений коэффициент использования азота увеличивался на 5-20% по сравнению со стандартной формой карбамида. Повышение коэффициента использования азота удобрений имеет важное значение, поскольку свидетельствует о значительном снижении непродуктивных потерь азота (улетучивания аммиака, вымывания нитратного азота, денитрификации), что является ключевым критерием экономической целесообразности и экологической безопасности.

Важным аспектом проведенных исследований является выявление различной стабильности действия изучаемых модификаций карбамида. Наиболее высокий и воспроизводимый эффект по всем показателям в разных погодных условиях был отмечен для капсулированных форм карбамида с покрытием на основе монокальцийфосфата. Эффективность стабилизированных форм (с ингибиторами уреазы и нитрификации) отличалась значительной межгодовой вариабельностью, что, по-видимому, обусловлено высокой чувствительностью активности ферментных систем почвенной микрофлоры к гидротермическим условиям периода вегетации. Таким образом, капсулированный карбамид с покрытием МКФ представляет собой более агроэкологически устойчивое решение для повышения эффективности азотных удобрений по сравнению с формами, стабилизированными ингибиторами.

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

Оценка эффективности применения удобрений не может ограничиваться только учетом урожайности, поскольку потребительская и товарная ценность зерна определяется комплексом качественных характеристик (Афанасьев, Иванчик, 2019; Малкандуев и др., 2022; Никитин, 2025). Основными критериями, отражающими питательную ценность, технологические и хлебопекарные свойства зерна пшеницы, являются общее содержание белковых веществ и содержание клейковинных белков (Новиков, 2012; Никитин, 2025). Наряду с биохимическими показателями важное значение имеет такой показатель, как масса 1000 зерен. Данный показатель характеризует крупность, выполненность и степень налива зерна и служит интегральным критерием качества семенного материала, поскольку отражает запас питательных веществ в зерновке и, как следствие, определяет потенциальную всхожесть, энергию прорастания и жизнеспособность будущих растений (Минеев, 1971; Новиков, 2012; Афанасьев, Иванчик, 2019).

Данные по качественным характеристикам зерна яровой пшеницы в вегетационных опытах в зависимости от форм карбамида представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Качественные показатели яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (вегетационный опыт, 2022-2023 гг.)

Вариант	Содержание белка, %	Сбор белка, мг/сосуд	Содержание клейковины, %	Масса 1000 зерен, г
1	2	3	4	5
2022 г				
РК-фон (Ф)	8,8	981	15	33,4
Ф+Nм (вар. срав.)	12,1	3101	28	40,1
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	12,5	3431	28	41,1
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	12,5	3480	28	42,6
Ф+Nм + инг. ур	11,6	3331	25	40,6
Ф+Nм + инг. нитр.	12,1	3433	28	42,5
Ф+Nм + инг. ур.+ нитр.	13,1	3384	29	40,9
НСР₀₅	-	-	-	3,9

Таблица 24 (продолжение)

1	2	3	4	5
2023 г.				
РК-фон (Ф)	9,7	651	12	27,6
Ф+N _м (вар. срав.)	13,4	2551	30	39,1
Ф+N _м + МКФ 50 мкм	15,0	3076	32	38,5
Ф+N _м + МКФ 100 мкм	14,8	2921	32	35,6
Ф+N _м + инг. ур	15,4	2835	31	32,4
Ф+N _м + инг. нитр.	14,8	2664	33	41,4
Ф+N _м + инг. ур.+ нитр.	15,5	2894	32	46,1
НСР 05	-	-	-	3,2
Среднее				
РК-фон (Ф)	9,3	827	13	30,5
Ф+N _м (вар. срав.)	12,7	2848	29	39,6
Ф+N _м + МКФ 50 мкм	13,8	3296	30	39,8
Ф+N _м + МКФ 100 мкм	13,7	3247	30	39,1
Ф+N _м + инг. ур	13,5	3184	28	36,5
Ф+N _м + инг. нитр.	13,5	3120	31	41,9
Ф+N _м + инг. ур.+ нитр.	14,3	3180	30	43,5
НСР 05	-	-	-	2,4

Согласно полученным результатам в вегетационных опытах 2022-2022 гг. все формы азотных удобрений способствовали заметному повышению содержания белка в зерне по сравнению с фоном «РК». Если в варианте «РК» содержание белка в среднем за два года составляло 9,3%, то при внесении традиционного карбамида этот показатель увеличился до 12,7%. В вариантах с капсулированными формами содержание белка составило 13,7-13,8%, что превысило результат варианта сравнения «N_м» на 1,0-1,1%. Варианты с отдельным использованием ингибиторов обеспечили получение зерна с содержанием белка на уровне 13,5%. Больше всего белка содержалось в зерне (14,3%), полученном в варианте, в котором вносился карбамид, обработанный двумя видами стабилизаторов азота. Однако данный вариант уступал другим по общей урожайности, что отразилось на сборе белка. Максимальный сбор белка (3296 мг/сосуд) обеспечил вариант «N_м + МКФ 50 мкм», что на 16% выше, чем в варианте с внесением обычного карбамида, где сбор белка составил 2848 мг/сосуд (табл. 24).

Минимальное содержание клейковины (13%) отмечалось в фоновом варианте. В вариантах с внесением азотных удобрений содержание клейковины в зерне варьировалось от 28% до 31%. Наибольшее содержание клейковины в зерне

было отмечено в варианте с внесением карбамида с ингибитором нитрификации, и составило 31%. Тогда как при внесении обычного карбамида содержание клейковины составило 29%. Высокое содержание клейковины (30%) в зерне также было установлено в вариантах с капсулированными формами карбамида, и карбамидом, обработанным двумя ингибиторами. Наименьшее содержание клейковины (28%) было в зерне, полученном на варианте с ингибитором уреазы (табл. 24). Тем не менее все формы карбамида обеспечили получение зерна на уровне 2 класса (белка не менее 13,5%, сырой клейковины – не менее 28 %).

Масса 1000 зерен в вегетационном опыте в среднем за два года варьировалась от 30,5 г («РК») до 43,5 г («Nм + инг. ур.+ нитр.»). Среди капсулированных форм наилучший результат показала форма с толстым покрытием («Nм + МКФ 100 мкм») – 39,1 г. Максимальное значение – 43,5 г, отмеченное в варианте с карбамидом, обработанным двумя ингибиторами, требует осторожной интерпретации из-за нестабильности урожайности по годам. Достаточно высокая масса 1000 зерен в данном варианте может быть связана с меньшей озерненностью колоса и с более растянутым периодом потребления азота (табл.24).

Результаты полевых опытов, представленные в таблице 25, в целом, подтвердили тенденции, выявленные в вегетационных опытах.

Таблица 25 – Качественные показатели зерна яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида (полевой опыт, 2023-2024 гг.)

Вариант	Содержание белка, %	Сбор белка, г/м ²	Содержание клейковины, %	Масса 1000 зерен, г
1	2	3	4	5
2023 г.				
РК-фон (Ф)	12,5	47	17	39,6
Ф+Nм (вар. срав.)	14,0	72	24	40,8
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	14,4	84	25	43,5
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	14,7	83	25	42,1
Ф+Nм + инг. ур	14,1	87	24	41,7
Ф+Nм + инг. нитр.	14,8	89	26	41,6
НСР₀₅	-	-	-	3,1

Таблица 25 (продолжение)

1	2	3	4	5
2024 г.				
РК-фон (Ф)	13,3	52	18	31,7
Ф+N _М (вар. срав.)	15,0	83	31	36,1
Ф+N _М + МКФ 50 мкм	14,3	89	33	39,1
Ф+N _М + МКФ 100 мкм	15,1	88	33	35,7
Ф+N _М + инг. ур	16,4	82	31	33,6
Ф+N _М + инг. нитр.	16,1	88	33	35,5
НСР 05	-	-	-	3,5
Среднее				
РК-фон (Ф)	12,9	49	18	35,7
Ф+N _М (вар. срав.)	14,5	77	27	38,4
Ф+N _М + МКФ 50 мкм	14,3	87	29	41,3
Ф+N _М + МКФ 100 мкм	14,9	86	29	38,9
Ф+N _М + инг. ур	15,3	85	27	37,7
Ф+N _М + инг. нитр.	15,4	88	30	38,6
НСР 05	-	-	-	1,5

В среднем за два года полевых опытов применение традиционного карбамида повысило содержание белка с 12,9% (в варианте «РК») до 14,5%. Наибольшее содержание белка отмечено в вариантах с ингибитором нитрификации (15,4%) и с ингибитором уреазы (15,3%), что на 0,8-0,9% превышало вариант сравнения «N_М». Капсулированные формы обеспечили содержание белка на уровне обычного карбамида – 14,3-14,9% (табл.25).

Наивысший сбор белка (88 г/м²) был получен в варианте с ингибитором нитрификации и в варианте «N_М + МКФ 50 мкм» (87 г/м²), что на 13-14% превысило показатель стандартного карбамида (77 г/м²). Это подтверждает, что капсулированная форма с покрытием 50 мкм является наиболее сбалансированной по соотношению «урожайность-качество» (табл. 25).

Содержание клейковины в зерне с фонового варианта составляло всего 18%. Внесение традиционного карбамида повысило содержание клейковины до 27%. Максимальное содержание клейковины (29-30%) было отмечено в вариантах с капсулированным карбамидом и с ингибитором нитрификации, что на 2-3% выше, чем в варианте с внесением обычной формы карбамида (табл. 25).

Таким образом, капсулированные формы карбамида и карбамид с добавлением ингибитора нитрификации способствовали получению зерна на уровне 2 класса (белка не менее 13,5%, сырой клейковины – не менее 28 %)

клейковины). Традиционный карбамид и карбамид с ингибитором уреазы несмотря на высокое содержание общего белка в зерне обеспечили качество зерна на уровне 3 класса (белка не менее 12%, сырой клейковины – не менее 23 %).

По массе 1000 зерен в полевых условиях преимущество сохранилось за капсулированной формой с толщиной покрытия 50 мкм (41,3 г), что на 2,9 г (8%) выше, чем в варианте с внесением традиционного карбамида (38,4 г). Это свидетельствует о лучшем наливе зерна благодаря пролонгированному азотному питанию в критический период формирования зерновки. В остальных вариантах с модифицированными формами масса 1000 зерен в среднем за два года была на том же уровне, что и в варианте с внесением традиционного карбамида (табл. 25).

Анализ качественных показателей зерна яровой пшеницы позволяет заключить, что применение модифицированных форм карбамида оказывает положительное влияние не только на величину, но и на качество урожая. При этом наиболее стабильные и высокие результаты по совокупности показателей (содержание и сбор белка, содержание клейковины, масса 1000 зерен) в вегетационных и полевых условиях продемонстрировал вариант с капсулированным карбамидом с покрытием толщиной 50 мкм. Высокая эффективность данной формы объясняется оптимальным режимом азотного питания, обеспечивающим растения азотом как в период активной вегетации, так и в фазе налива зерна, что способствует не только росту урожайности, но и интенсивному синтезу запасных белков (Лапушкин и др., 2022 а,b).

3.2 Экономическая эффективность применения карбамида пролонгированного действия при возделывании яровой пшеницы

Внедрение новых форм удобрений в сельскохозяйственное производство всегда предварительно сопровождается оценкой их эффективности. Комплексная оценка эффективности удобрений включает в себя показатели агрономической и экономической эффективности.

Агрономическая эффективность удобрений оценивается по величине прибавки урожая и качеству полученной продукции (Шеуджен и др., 2013b). В перечень экономических показателей эффективности входят:

- стоимость валовой продукции;
- производственные затраты;
- условный чистый доход (выручка за вычетом производственных затрат), количественно выражающая финансовый результат;

- себестоимость единицы продукции – интегральный показатель, отражающий, насколько эффективно использованы все ресурсы. Снижение себестоимости при росте урожайности является одним из главных признаков успешности агротехнологии или удобрительного продукта.

- уровень рентабельности производства, рассчитываемый как отношение чистого дохода к производственным затратам, выраженное в процентах. Этот показатель позволяет сравнивать доходность различных технологий или удобрений.

- окупаемость удобрений в натуральном выражении (ц прибавки/ц д.в.), которая напрямую характеризует агрономическую отдачу от внесенного питательного элемента.

Применительно к удобрениям пролонгированного действия, которые, как правило, имеют более высокую закупочную стоимость, важным становится анализ того, окупаются ли дополнительные затраты на удобрение дополнительным доходом от прибавки урожая. Технология считается экономически оправданной, если соблюдается одно из двух условий: а) при равных затратах она обеспечивает более высокий доход; б) при более высоких затратах прирост дохода пропорционально больше прироста затрат, что приводит к повышению рентабельности или снижению себестоимости продукции.

В контексте настоящего исследования экономическая оценка направлена на сравнительный анализ традиционного карбамида и его модифицированных форм (капсулированных с покрытием на основе монокальцийфосфата и стабилизированных ингибиторами) по вышеуказанным показателям. Целью данного раздела является определение не только агрономически, но и экономически

наиболее эффективной формы азотного удобрения для возделывания яровой пшеницы, что послужит основой для разработки научно-обоснованных рекомендаций производству.

Результаты расчетов основных экономических показателей при возделывании яровой пшеницы с применением различных форм карбамида представлены в таблице 26.

Таблица 26 – Экономическая эффективность применения в технологии возделывания яровой пшеницы различных форм карбамида пролонгированного действия

Вариант	Средняя урожайность пшеницы, ц/га	Прибавка урожая за счет внесения различных форм карбамида, ц/га	Стоимость валовой продукции, руб./га	Производственные затраты, руб./га	Условный чистый доход, руб.	Себестоимость продукции, руб./ц	Рентабельность, %	Окупаемость азотных удобрений, ц зерна/ ц N
РК-фон (Ф)	38,3	-	56685,0	25070,4	31614,6	654,6	126	-
Ф+Nм (вар. срав.)	53,1	14,8	80709,6	32113,9	48595,8	604,8	151	16
Ф+Nм + МКФ 50 мкм	60,4	22,1	91847,5	34244,0	57603,5	566,7	168	25
Ф+Nм + МКФ 100 мкм	57,5	19,2	87459,9	35041,9	52418,0	609,0	150	21
Ф+Nм + инг. ур	55,9	17,6	84968,6	35635,6	49333,0	637,5	138	20
Ф+Nм + инг. нитр.	57,3	19,0	87050,9	34461,7	52589,2	601,7	153	21

Для расчета экономических показателей средняя урожайность с полевых мелкоделяночных опытов была переведена с г/м² в ц/га.

Максимальная урожайность (60,4 ц/га) была получена в варианте с капсулированным карбамидом с толщиной покрытия МКФ 50 мкм. Относительно фона прибавка составила 22,1 ц/га (58%), а в сравнении с обычной мочевиной – 7,3 ц/га (14%). Преимущество в урожайности напрямую трансформировалось в более высокие финансовые показатели (таблица 26).

Капсулированная мочевина с тонким покрытием обеспечила получение наибольшего условного чистого дохода – 57603,5 руб./га, что на почти на 19% (9007,7 руб./га) превысило доход от традиционной формы карбамида (48595,8 руб./га). Эта же модификация мочевины показала максимальную отдачу – 25 ц зерна на каждый центнер внесенного азота, что на 56% выше, чем окупаемость традиционного карбамида (16 ц зерна/ц N). Это является прямым свидетельством существенного повышения коэффициента использования азота. Рентабельность капсулированной мочевины с тонким покрытием составила 168%, что превышало показатели обычного карбамида на 17%, другие модификации – на 15-30% (таблица 26).

Формы с покрытием 100 мкм и с ингибитором нитрификации по агрономическим и экономическим показателям были на одном уровне между собой. Относительно немодифицированной мочевины в данных вариантах прибавка урожая составляла 4,2-4,4 ц/га (8%), чистый доход – 52418,0-52589,2 руб./га (8%). Несмотря на более высокие затраты, капсулированный карбамид с покрытием на основе МКФ 100 мкм и карбамид с ингибитором нитрификации показали рентабельность (150-152%), сопоставимую с традиционным карбамидом (151%), но при значительной дополнительной прибавке урожая. По окупаемости данные формы превосходили мочевины на 5 ц зерна / ц N или на 31% (таблица 26).

Производственные затраты на вариантах с модифицированными формами были выше, чем на варианте с обычным карбамидом, что связано с более высокой стоимостью этих удобрений. Однако ключевым является показатель себестоимости единицы продукции. Минимальная себестоимость 1 центнера зерна (566,7 руб./ц) была получена на наиболее продуктивном варианте «Nm + МКФ 50 мкм». Это на

6% ниже, чем себестоимость на варианте с традиционным карбамидом (604,8 руб./ц). Самая высокая себестоимость зерна отмечалась в варианте, где применялся карбамид с ингибитором уреазы. Данная модификация была не только самой дорогой, но и наименее эффективной с экономической стороны (таблица 26).

Таким образом, анализ полученных данных однозначно свидетельствует, что капсулированный карбамид с покрытием МКФ 50 мкм является наиболее экономически выгодной формой карбамида. Несмотря на рост прямых затрат, данная модификация стабильно обеспечивает высокую прибавку урожая, что приводит к получению хорошего чистого дохода, наименьшей себестоимости продукции, повышению рентабельности и максимальной окупаемости внесенного азота. Это делает данную форму удобрения не только агрономически эффективной, но и коммерчески привлекательной для внедрения в производственные системы возделывания яровой пшеницы.

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

Эффективность и степень воздействия азотных удобрений на окружающую среду в значительной мере определяются скоростью и направленностью процессов трансформации, протекающих в почве после их внесения (Кудеяров, 1989).

Как уже ранее отмечалось в главе 1 превращение амидного азота мочевины в почве представляет собой многостадийный микробиологически обусловленный процесс, включающий гидролиз карбамида с образованием аммонийной формы азота (аммонификация), последующее биологическое окисление аммония до нитритов и нитратов (нитрификация I и II этапы), а также конкурирующие процессы иммобилизации и потерь азота в газообразной форме. Скорость и направленность этих процессов в значительной степени определяются генезисом почвы, ее кислотностью, обеспеченностью органическим веществом, а также активностью функциональных групп микроорганизмов (аммонификаторов, нитрификаторов).

Известно, что для традиционной формы мочевины характерно быстрое накопление аммония в первые дни после внесения, что при благоприятных условиях приводит к эмиссии аммиака и ускоренной нитрификации (Козел, Филисюк, 2020; Gil-Ortiz et al., 2020; Messiga et.al, 2020; Achilea, 2021; Lawrenciа et.al, 2021; Волкова, Лапушкин, 2025). Такая интенсивная трансформации азота потенциально усиливает риски потерь и снижает коэффициент использования азота удобрения. В связи с этим применение новых капсулированных форм карбамида и использование стабилизаторов азота (ингибитор уреазы и ингибитор нитрификации) рассматриваются как технологические приемы управления динамикой превращения минеральных форм азота удобрений.

Таким образом, цель подраздела 3.3 – оценить, как изменяется динамика превращения амидного азота различных форм карбамида пролонгированного действия на почвах разного генезиса, и выделить наиболее эффективные варианты по степени замедления процессов минерализации.

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 проводилось на дерново-подзолистой почве, так данный тип почвы характерен для центральной части Нечерноземной зоны, где и проводились вегетационные и полевые исследования удобрений на яровой пшенице. Результаты исследований интенсивности процессов аммонификации и нитрификации при внесении разных форм карбамида на дерново-подзолистой почве представлены в таблицах 27-29 и рисунках 8-10.

Таблица 27 – Динамика накопления аммонийного азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NH ₄ , мг/кг								
Контроль (без уд.)	1,2	1,3	6,7	9,3	5,3	3,1	7,9	3,2	3,3
N _м (вар. срав.)	19,9	115,0	136,6	145,9	141,4	150,6	129,9	77,8	54,3
N _м + МКФ 50 мкм	10,3	47,9	119,5	143,2	156,8	147,4	136,1	94,6	84,0
N _м + МКФ 100 мкм	9,2	29,9	85,3	132,0	124,9	144,0	149,8	113,2	94,4
N _м + инг. ур	1,2	6,9	13,1	29,1	27,0	105,0	153,7	131,5	112,4
N _м + инг. нитр.	5,3	54,9	92,1	152,9	148,1	178,7	162,3	132,2	120,8
НСР₀₅	1,5	5,7	5,2	7,7	6,6	8,3	8,1	7,3	7,4

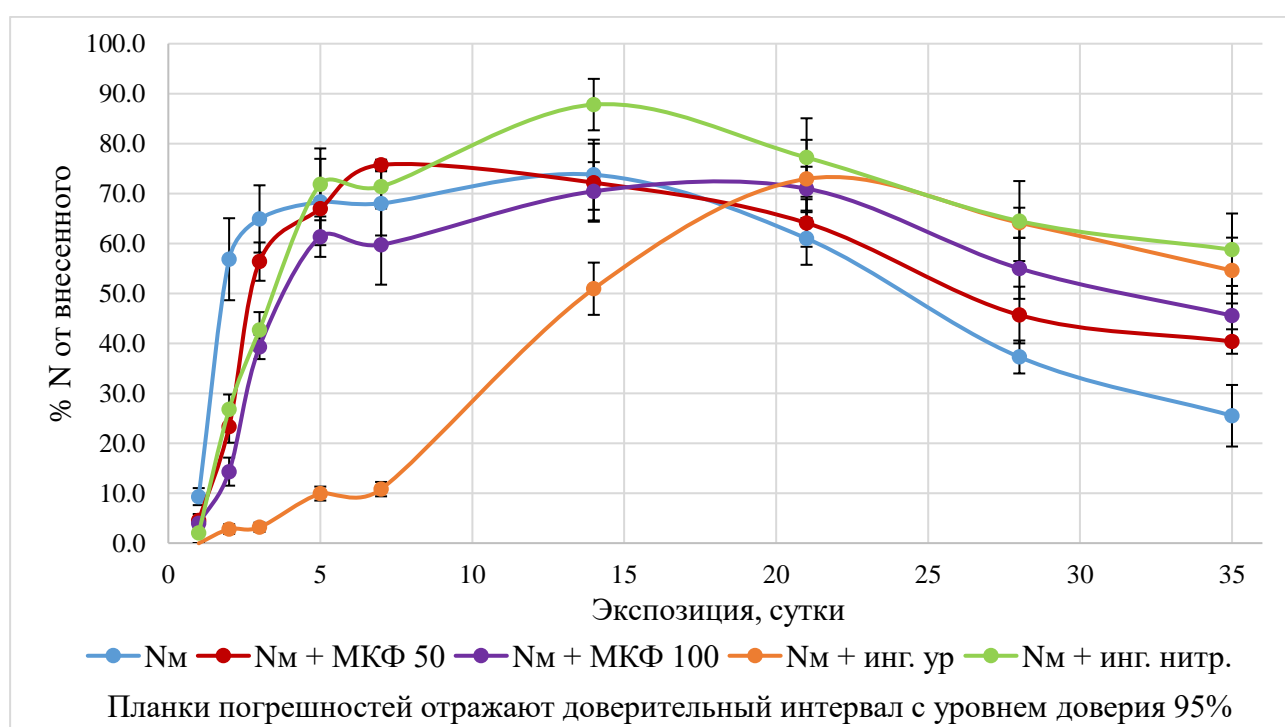


Рисунок 8 – Интенсивность аммонификации разных форм карбамида на дерново-подзолистой почве

Анализ данных таблицы 27 позволяет проследить существенные различия в скорости гидролиза карбамида в зависимости от его модификации. Наиболее интенсивно процесс аммонификации протекал в варианте с обычной мочевиной «N_м». Уже на 2-е сутки содержание аммония в почве резко возросло до 115,0 мг/кг, что соответствовало 57% азота от внесенного количества и достигло пика на 14-е сутки – 150,6 мг/кг или 74% азота от внесенного количества. Активная фаза аммонификации завершилась к 14-м суткам, после чего наблюдалось быстрое

снижение содержания аммония вследствие его вовлечения в процесс нитрификации (табл. 27, рис. 8).

У капсулированных форм карбамида было отмечено замедление процессов превращения амидного азота. В варианте с тонким покрытием «Nм + МКФ 50» в первые трое суток содержание аммония было ниже в среднем на 41%, чем на обычной мочеvine, однако к 5 суткам оно сравнялось и даже несколько превысило его к 7-м суткам (156,8 мг/кг). Среди капсулированных форм лучше всего аммонификация замедлялась при применении формы с толстым покрытием. В этом варианте опыта процесс аммонификации заметно сдерживался в первые 5 суток. Содержание аммония в среднем за 5 суток было ниже на 46%, чем в варианте с внесением традиционной формы удобрения. Накопление аммония в данном варианте длилось дольше на целую неделю по сравнению с обычной мочевиной. Максимальное содержание N-NH₄ было отмечено на 21 сутки и составило 149,8 мг/кг или 71% N от внесенного количества. При этом повышенные концентрации аммония сохранились вплоть до 35-х суток. (табл.27, рис. 8).

Наибольшей способностью замедления трансформации мочевины обладали стабилизаторы азота.

Ингибитор уреазы практически полностью блокировал гидролиз карбамида в первые 7 суток, в течение которых содержание N-NH₄ варьировалось в диапазоне 1,2-29,1 мг/кг или 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 начиналось активное накопление аммония, достигшее максимума к 21-м суткам, где содержание аммония составило 153,7 мг/кг (73% N от внесенного), что сопоставимо с результатом, который был отмечен при применении капсулированного карбамида с толстым покрытием (табл. 27, рис. 8).

Ингибитор нитрификации также замедлил аммонификацию в первые 5 суток, но менее выражено, чем ингибитор уреазы или капсулированные формы. Однако к концу опыта ингибитор нитрификации обеспечил самое высокое содержание аммония среди всех вариантов (120,8 мг/кг на 35-е сутки), что связано с

эффективным торможением процесса нитрификации и накоплением аммонийной формы (табл. 27, рис. 8).

Процесс нитрификации начинал активизироваться на 3-5 сутки компостирования и шел параллельно аммонификации. Наиболее выраженный процесс нитрификации начинался с 14-х суток опыта. Динамика первого этапа нитрификации (образование нитритной формы азота) отражена в таблице 28 и на рисунке 9, второго (образование нитратной формы азота) – в таблице 29, на рисунке 10.

Таблица 28 – Динамика накопления нитритного азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NO ₂ , мг/кг								
Контроль (без уд.)	0,12	0,12	0,09	0,24	0,12	0,13	0,13	0,09	0,13
Nм (вар. срав.)	0,13	0,14	0,15	0,47	0,43	0,17	0,14	0,10	0,16
Nм + МКФ 50 мкм	0,12	0,13	0,13	0,40	0,32	0,17	0,13	0,09	0,14
Nм + МКФ 100 мкм	0,11	0,12	0,10	0,27	0,25	0,13	0,26	0,10	0,14
Nм + инг. ур	0,11	0,12	0,09	0,24	0,13	0,17	0,22	0,13	0,15
Nм + инг. нитр.	0,12	0,12	0,10	0,26	0,13	0,15	0,16	0,09	0,15
НСР₀₅	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02

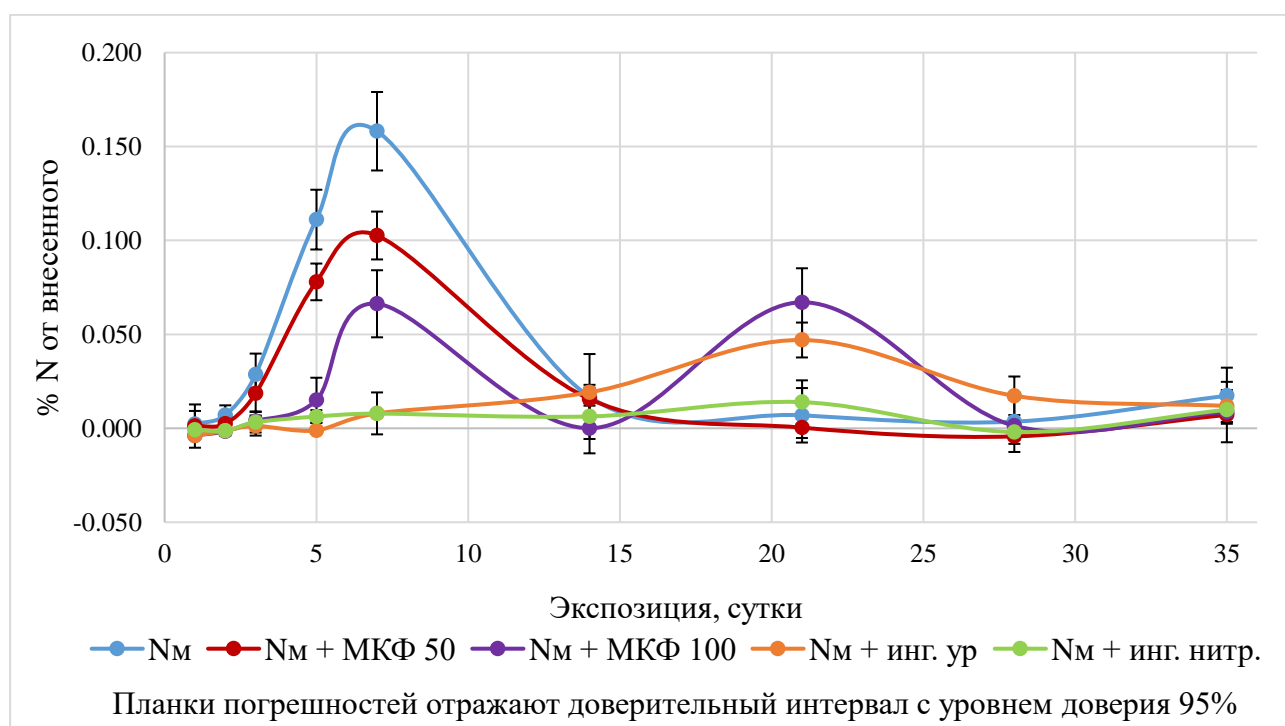


Рисунок 9 – Интенсивность первого этапа нитрификации разных форм карбамида на дерново-подзолистой почве

Нитриты являются промежуточным и нестабильным соединением, поэтому их содержание в почве, как правило, невелико (Кидин, 1974). Во всех вариантах содержание нитритов оставалось на низком уровне, однако пиковые значения наблюдались на 5-е сутки. Максимальное содержание N-NO₂ было отмечено в варианте с традиционным карбамидом (0,47 мг/кг или 0,1% N от внесенного), что свидетельствует о наиболее активном протекании процесса нитрификации и трансформации азота в целом. В вариантах с капсулированными и стабилизированными формами пиковые значения были существенно ниже (0,24-0,40 мг/кг). Наименьшее содержание нитритного азота было зафиксировано в варианте, в котором в почву вносили мочевины с ингибитором уреазы (табл. 28, рис. 9).

Наиболее заметные различия между вариантами проявились на втором этапе нитрификации, когда в почве происходило накопление нитратного азота (табл.29).

Таблица 29 – Динамика накопления нитратного азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NO ₃ , мг/кг								
Контроль (без уд.)	48,1	47,8	48,6	60,9	55,1	56,5	37,4	50,2	53,9
НМ (вар. срав.)	48,9	51,5	55,2	67,1	62,6	78,5	97,7	138,5	142,6
НМ + МКФ 50 мкм	49,9	50,5	53,1	66,7	62,6	73,3	87,5	107,7	110,6
НМ + МКФ 100 мкм	51,1	51,1	52,4	64,6	61,4	71,5	64,5	83,9	110,8
НМ + инг. ур	49,1	50,5	48,9	61,5	55,9	58,0	55,9	65,3	88,2
НМ + инг. нитр.	50,1	52,1	54,9	66,5	60,1	56,8	47,3	50,8	55,8
НСР₀₅	1,7	1,4	1,2	2,2	1,2	2,7	4,5	5,1	8,2

В варианте с традиционным карбамидом второй этап нитрификации протекал закономерно интенсивнее. Начиная с 14-х суток содержание нитратного азота начало активно расти, достигнув к 35-м суткам максимального значения – 142,6 мг/кг, что за вычетом азота почвы соответствовало 44% от внесенного азота (табл. 29, рис. 10).

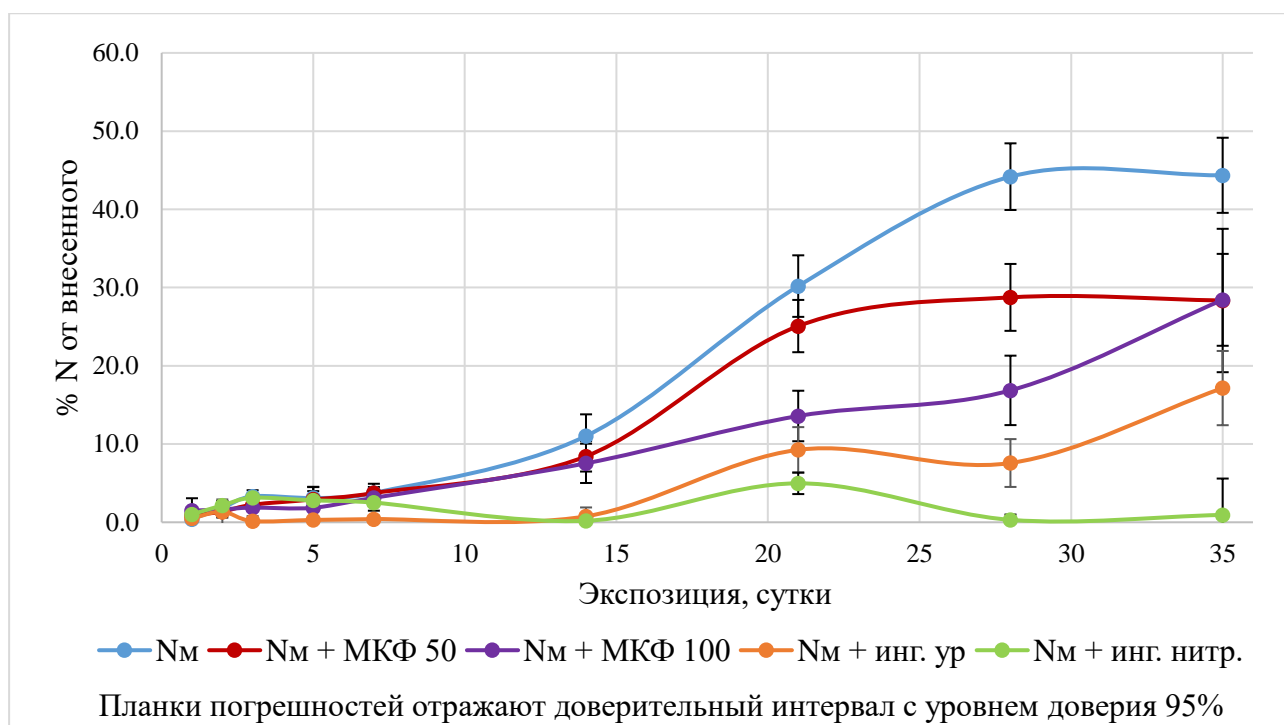


Рисунок 10 – Интенсивность второго этапа нитрификации разных форм карбамида на дерново-подзолистой почве

Капсулированные формы существенно замедлили процесс нитрификации. К 35-м суткам в почве данных вариантов накопилось 110,6-110,8 мг/кг нитратного азота, что соответствовало 28% от внесенного азота. Однако наиболее выраженный эффект сдерживания процесса нитрификации наблюдался в варианте с капсулированным карбамидом с толщиной покрытия 100 мкм. Здесь накопление нитратного азота на протяжении всего опыта шло медленнее, чем у формы с тонким покрытием. К примеру, на 21-е и 28-е сутки содержание нитратного азота в варианте с внесением мочевины с толстым покрытием было ниже на 41-46% по сравнению с капсулированной мочевиной с тонким покрытием. По сравнению с обычным карбамидом в период с 14-х по 35-е сутки в вариантах «Nm + МКФ 50» и «Nm + МКФ 100» содержание нитратного азота в почве было ниже в среднем на 28% и 46%, соответственно (табл. 29, рис. 10).

Наиболее эффективно процесс нитрификации тормозили стабилизаторы азота. В варианте, где вносилась мочевина с ингибитором уреазы к 35-м суткам содержание нитратов в почве составляло 88,2 мг/кг (или 17% от внесенного азота), что на 61% ниже, чем в варианте с традиционным карбамидом. Ингибитор

нитрификации практически полностью блокировал процесс нитрификации на протяжении всего опыта. К 35-м суткам содержание нитратного азота составило всего 55,8 мг/кг, что лишь незначительно превысило контроль (без внесения удобрения) и соответствовало 1% от внесенного азота (табл. 29, рис. 10). Данный результат согласуется с литературными данными (Лаврова, 1990; Trenkel, 2010; Маннхайм, Бергер, 2015; Lewu et al., 2021), подтверждающими способность ингибиторов нитрификации длительное время сохранять азот в почве в аммонийной форме.

Обобщая результаты модельно-лабораторных опытов по исследованию процессов минерализации на дерново-подзолистой почве, можно заключить, что все исследуемые модифицированные формы карбамида эффективно снижают темпы трансформации азота в почве по сравнению с обычной формой карбамида, что создает предпосылки для более полного использования азота растениями и снижения рисков потерь азота из удобрений. При этом каждая из пролонгированных форм имеет свои особенности кинетики высвобождения азота, что может определять целесообразность их применения в зависимости от биологических особенностей возделываемых культур.

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

Исследование трансформации разных форм карбамида на каштановой почве имеет особое значение поскольку щелочная реакция почвенного раствора, характерная для данного типа почв, может существенно изменять кинетику превращения вносимого азота. Результаты модельно-лабораторного опыта по определению динамики минерализации азота разных форм карбамида на каштановой почве представлены в таблицах 30-32, рисунках 11-13.

Таблица 30 – Динамика накопления аммонийного азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NH ₄ , мг/кг								
Контроль (без уд.)	1,2	3,1	2,2	2,5	0,9	1,3	1,8	1,2	6,0
N _М (вар. срав.)	25,0	65,2	88,0	121,3	102,6	43,9	34,2	52,8	68,5
N _М + МКФ 50 мкм	25,5	68,1	89,9	125,9	114,4	66,0	46,4	38,4	75,3
N _М + МКФ 100 мкм	26,9	73,2	92,1	151,7	140,8	102,7	28,9	56,6	82,0
N _М + инг. ур	6,3	6,3	7,2	8,7	9,8	14,9	25,3	44,4	55,5
N _М + инг. нитр.	17,2	45,4	70,4	108,4	107,3	91,5	88,5	97,5	102,0
НСР₀₅	2,0	3,6	5,6	6,2	6,7	5,8	4,5	7,0	4,7

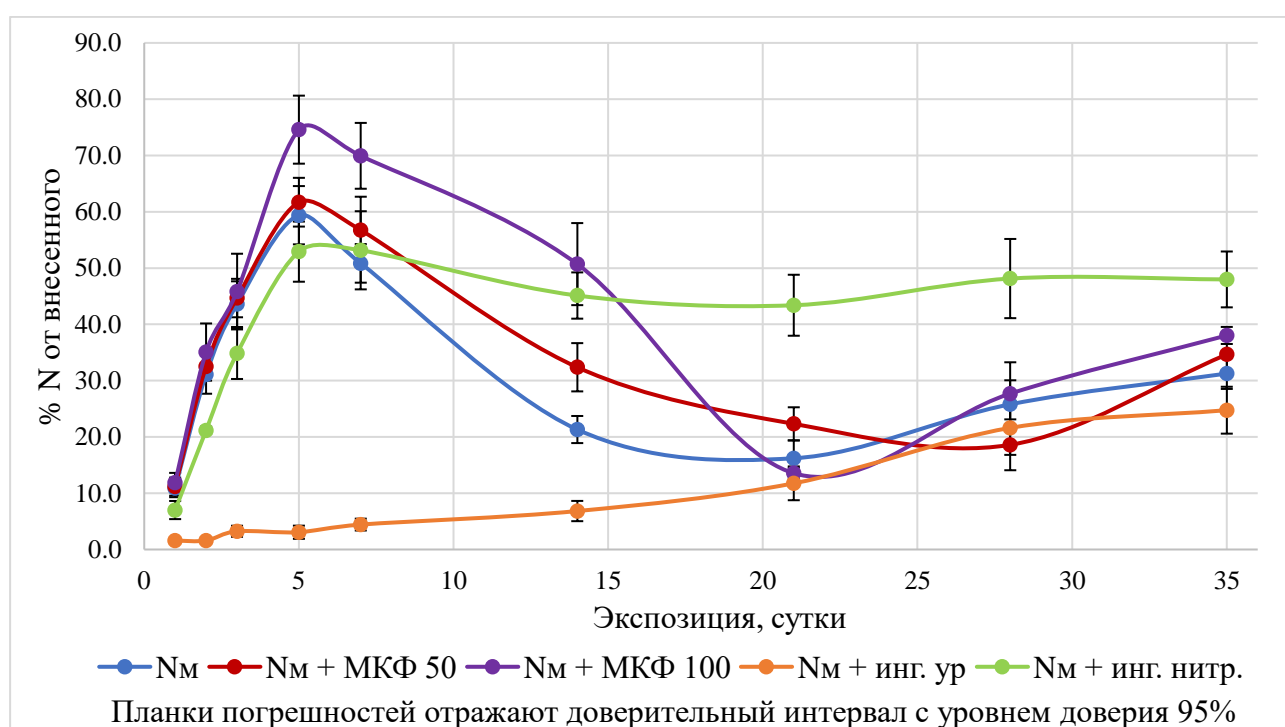


Рисунок 11 – Интенсивность аммонификации разных форм карбамида на каштановой почве

Согласно данным, представленным в таблице 30 и на рисунке 11, на каштановой почве гидролиз обычного карбамида протекал достаточно интенсивно, однако накопление аммония в почве происходило в меньшем количестве, что может являться следствием увеличения газообразных потерь аммиака, которые, как известно, усиливаются в щелочных почвах (Кореньков, 1999; Визирская и др., 2020). В варианте с обычным карбамидом содержание аммонийного азота быстро возрастало, достигнув максимума к 5-м суткам – 121,3 мг/кг (59% азота от

внесенного). После чего наблюдали снижение содержания аммонийной формы азота вследствие нитрификации и возможных газообразных потерь аммиака. К 35-м суткам содержание N-NH₄ в этом варианте составило 68,5 мг/кг.

Среди капсулированных форм наиболее эффективно процесс превращения амидного азота замедлялся в варианте, в котором в почву вносили карбамид с тонким покрытием. Здесь динамика накопления аммония в первые 5 суток была близка к варианту «Nм», однако в дальнейшем, на 7-21 сутки содержание аммонийного азота поддерживалось на более высоком уровне (114,4-46,4 мг/кг против 102,6-34,2 мг/кг в варианте «Nм»), что свидетельствует о более растянутом периоде аммонификации и меньших потерях азота в виде аммиака (табл. 30, рис.11).

Неожиданные результаты были получены на варианте с капсулированным карбамидом с толщиной покрытия 100 мкм. Вместо ожидаемого замедления здесь наблюдалась интенсификация процессов превращения. Максимальное содержание аммония (151,7 мг/кг или 75% азота от внесенного) было достигнуто уже к 5-м суткам и существенно превысило показатели как капсулированного карбамида с тонким покрытием, так и обычного карбамида. По-видимому, это связано с подкислением почвенного раствора вокруг гранулы за счет толстого покрытия из монокальцийфосфата, в результате чего создались более оптимальные условия для деятельности микроорганизмов, которые наиболее интенсивно осуществляют гидролиз мочевины при pH 7,0 (Сапожников, 1973). При этом содержание N-NH₄ на 7 и 14 сутки также было существенно выше, чем в тех же вариантах с обычном карбамидом и капсулированным карбамидом с тонким покрытием, что косвенно указывает на меньшие потери азота в виде аммиака (табл. 30, рис.11).

Наиболее эффективно процессы аммонификации на каштановой почве сдерживали формы карбамида с ингибиторами. Ингибитор уреазы практически полностью блокировал гидролиз карбамида на протяжении первых 14 суток. В этот период содержание N-NH₄ было на уровне 6,3-14,9 мг/кг. После чего начиналось постепенное накопление аммония, которое только к 35-м суткам достигло максимума и составило 55,5 мг/кг или 25% азота от внесенного количества (табл.30, рис. 11). Ингибитор нитрификации также эффективно замедлял аммонификацию,

особенно в первые 5 суток. С 7-х по 35-е сутки содержание аммония в данном варианте держалось практически на одном уровне (88,5-107,3 мг/кг) и к концу опыта оставалось достаточно высоким – 102 мг/кг (48 % азота от внесенного), что указывает на сдерживание следующего за аммонификацией процесса нитрификации (табл.30, рис. 11).

Динамика первого этапа нитрификации азота разных форм карбамида на каштановой почве представлена в таблице 31 и на рисунке 12.

Таблица 31– Динамика накопления нитритного азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NO ₂ , мг/кг*								
Контроль (без уд.)	0,11	0,06	0,10	0,10	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08
N _М (вар. срав.)	0,16	0,42	0,21	0,14	2,81	0,16	0,13	0,08	0,09
N _М + МКФ 50 мкм	0,16	0,37	0,23	0,16	2,24	0,16	0,11	0,08	0,10
N _М + МКФ 100 мкм	0,16	0,39	0,23	0,15	2,46	0,17	0,10	0,09	0,12
N _М + инг. ур	0,12	0,09	0,12	0,10	0,11	0,12	0,09	0,08	0,09
N _М + инг. нитр.	0,13	0,11	0,13	0,10	0,11	0,12	0,09	0,08	0,09
НСР₀₅	0,01	0,03	0,02	0,01	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02

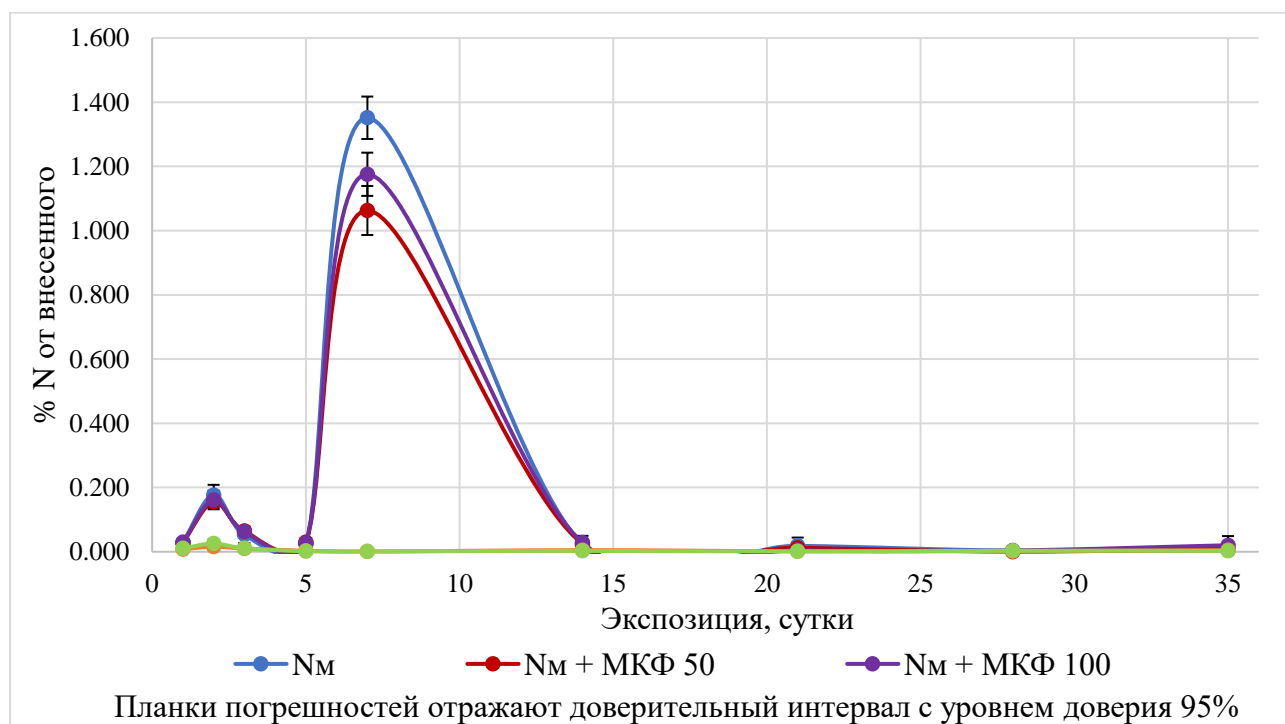


Рисунок 12 – Интенсивность первого этапа нитрификации разных форм карбамида на каштановой почве

На каштановой почве в вариантах с азотными удобрениями, не содержащими ингибиторов, резкий пик накопления нитритов был зафиксирован на 7-е сутки. Максимальное содержание нитритов отмечалось в варианте с обычным карбамидом и составляло 2,81 мг/кг (1,3 % азота от внесенного). Это подтверждает тот факт, что азот стандартной формы карбамида трансформируется быстрее, чем исследуемые пролонгированные формы (табл.31, рис. 12).

Среди капсулированных форм карбамида сохраняется прежняя тенденция по скорости превращения. Интенсивнее нитриты образовывались в варианте с капсулированным карбамидом с толщиной покрытия 100 мкм. Так, на 7-е сутки содержание нитритов в данном варианте составило 2,46 мг/кг (1,2% азота от внесенного), что было ниже по сравнению с обычным карбамидом на 13%. Карбамид с тонким покрытием лучше сдерживал процесс окисления аммония до нитритов. В этом варианте на 7-е сутки содержание нитритов в почве составило 2,24 мг/кг (1,1% азота от внесенного), что на 21% ниже, чем при внесении обычного карбамида, и на 9% относительно карбамида с толстым покрытием (табл.31, рис.12).

В вариантах, в которых применяли карбамид с ингибиторами уреазы и нитрификации, содержание нитритов на протяжении всего опыта было на уровне контроля (0,08-0,13 мг/кг), что свидетельствует о практически полном блокировании первого этапа нитрификации (табл. 31, рис.12).

Интенсивность второго этапа нитрификации отражена в таблице 32 и на рисунке 13.

Таблица 32 – Динамика накопления нитратного азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	2	3	5	7	14	21	28	35
	Содержание N-NO ₃ , мг/кг								
Контроль (без уд.)	87,4	78,0	96,6	95,3	86,5	90,6	98,1	110,6	127,3
Нм (вар. срав.)	89,8	82,2	101,8	102,7	117,7	190,0	229,7	195,9	182,2
Нм + МКФ 50 мкм	88,4	81,5	99,3	100,3	121,9	210,9	245,5	258,4	219,8
Нм + МКФ 100 мкм	88,4	86,0	98,7	98,6	117,9	159,2	266,3	233,5	207,2
Нм + инг. ур	89,1	82,3	97,2	95,3	93,3	117,4	126,1	130,5	135,1
Нм + инг. нитр.	96,4	85,8	106,1	101,3	95,3	108,7	114,1	118,4	128,0
НСР₀₅	4,8	6,7	3,1	4,5	6,8	9,0	12,9	10,4	8,7

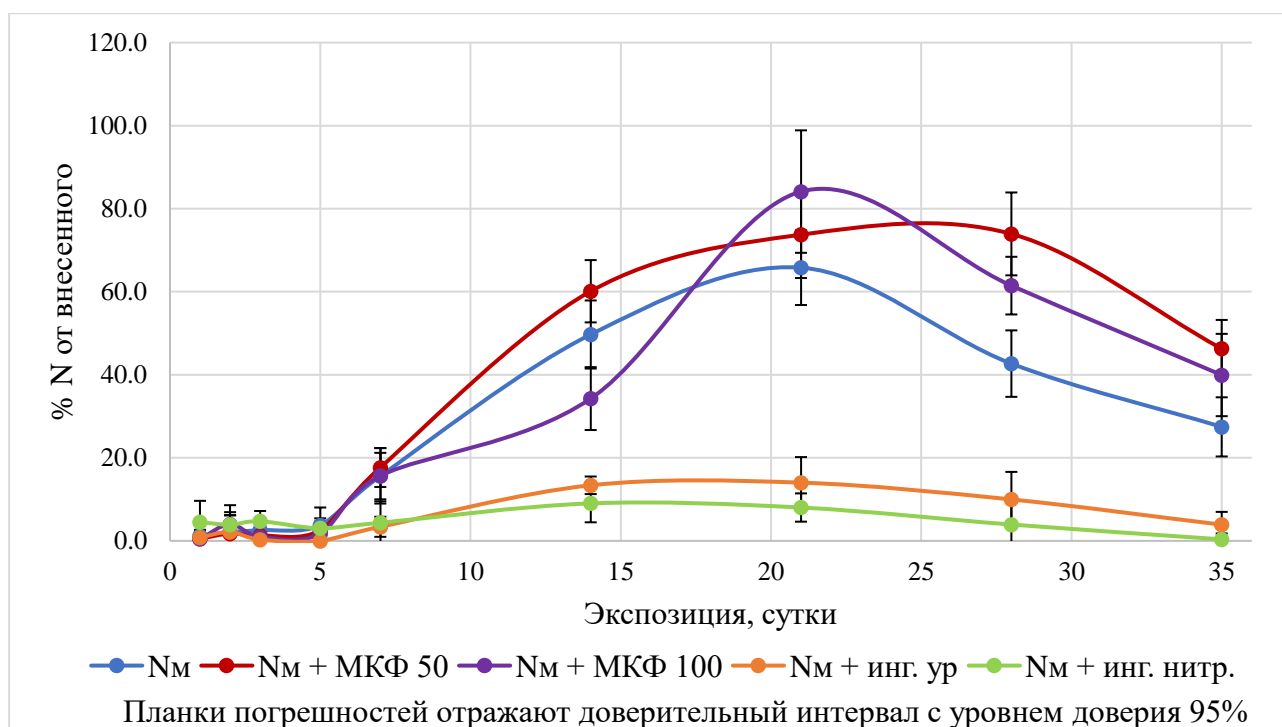


Рисунок 13 – Интенсивность второго этапа нитрификации разных форм карбамида на каштановой почве

В варианте с традиционным карбамидом активное накопление нитратов началось с 7-х суток, достигнув максимума к 21-м суткам (229,7 мг/кг или 66% азота от внесенного количества). После чего наблюдалось некоторое снижение содержания нитратов, вероятно, вследствие активизации процессов денитрификации. К 35-м суткам содержание нитратов составило 182,2 мг/кг (табл. 32, рис. 13).

На каштановой почве при внесении капсулированных форм карбамида общее содержание минеральных форм азота сохранялось на более высоком уровне по сравнению с обычным карбамидом в течение всего периода проведения эксперимента, что свидетельствует о снижении возможных газообразных потерь за счет улетучивания аммиака в щелочной среде и денитрификации. В варианте «Nм + МКФ 100 мкм» как и у обычного карбамида пик накопления нитратов пришелся на 21-е сутки, содержание N-NO₃ составило 266,3 мг/кг (84 % азота от внесенного). Начиная с 28-х суток содержание нитратов в данном варианте начало снижаться и к 35-м суткам составило 207,2 мг/кг. В варианте «Nм + МКФ 50 мкм» содержание накопленного нитрата достигло максимума на неделю позже, чем в вариантах с

обычным карбамидом и капсулированным с толстым покрытием, и составило 258,4 мг/кг или 74 % азота от внесенного. К 35-м суткам содержание нитратов снизилось до 219,8 мг/кг (табл. 32, рис.13).

Хотя прямые измерения эмиссии закиси азота в этой главе не представлены, снижение содержания нитратов в поздние сроки инкубирования (21-35 сутки) в вариантах с обычным и капсулированным карбамидом является косвенным показателем активизации процесса денитрификации, когда нитратный азот восстанавливается до молекулярной формы.

Наиболее эффективно процесс нитрификации на каштановой почве тормозили ингибиторы. В варианте с ингибитором уреазы к 35-м суткам содержание накопившего в почве нитрата составило всего 135,1 мг/кг, что соответствовало всего лишь 4 % азота от внесенного количества. 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).

Таким образом, трансформация азотных удобрений на каштановой почве имеет существенные особенности по сравнению с дерново-подзолистой, что связано с щелочной реакцией среды и высокой биологической активностью. Накопление минеральных форм азота обычной мочевины происходило в меньших количествах, что может быть следствием увеличения газообразных потерь в виде аммиака и продуктов, образующихся в процессе денитрификации.

Капсулированные формы карбамида на каштановой почве показали неоднозначные результаты. Вопреки ожиданиям, форма карбамида с толстым покрытием не замедляла, а интенсифицировала процессы превращения азота, что, вероятно, связано с локальным подкислением почвенного раствора в следствие гидролиза монокальцийфосфата и созданием более благоприятных условий для микробиологической активности. Форма мочевины с тонким покрытием обеспечила более продолжительное сохранение аммонийного азота в почве. Наиболее эффективно на каштановых почвах работали ингибиторы. Ингибиторы уреазы и нитрификации замедляли как аммонификацию, так и нитрификацию на

протяжении всего периода наблюдений, что подтверждается минимальным накоплением нитратов и сохранением аммонийной формы азота.

Полученные данные свидетельствуют о том, что эффективность различных модификаций карбамида существенно зависит от типа почвы. Если на дерново-подзолистой почве капсулированные формы показали хороший пролонгирующий эффект, то на каштановой почве их применение требует дополнительного изучения и, возможно, корректировки технологии, тогда как использование ингибиторов остается стабильно эффективным в различных типах почв.

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

Процесс денитрификации, представляющий собой восстановление нитратов и нитритов до оксидов и молекулярной формы азота, является одним из основных причин непродуктивных потерь азота из почвы и эмиссии опасного парникового газа – закиси азота (N_2O). Интенсивность этого процесса зависит от многих факторов, включая наличие доступного органического вещества, анаэробных условий, а также содержание нитратов, образующихся в результате нитрификации (Смирнов, 1977; Соколов, Семенов, 1992; Кудеяров, 2020; Норов и др, 2023).

В связи с этим была поставлена задача изучить влияние модифицированных форм карбамида на эмиссию закиси азота на дерново-подзолистой и каштановой почвах в модельно-лабораторном опыте. Следует отметить, что при закладке опыта создавались идеальные условия для протекания денитрификации (оптимальные влажность, температура, анаэробнозис, содержание энергетического материала), что позволяет оценить максимальный потенциал потерь изучаемых форм карбамида. Однако в полевых условиях период и эффективность сдерживания процесса могут быть значительно выше.

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

Результаты изучения интенсивности денитрификации азота разных форм карбамида на дерново-подзолистой почве представлены в таблице 33 и на рисунке 14.

Таблица 33 – Динамика эмиссии закиси азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	3	5	7	10	14	21	28	35
	Содержание N-N ₂ O, мг/кг								
Контроль (без уд.)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
N _м (вар. срав.)	2,5	15,6	15,4	15,0	14,7	14,0	13,1	12,4	11,8
N _м + МКФ 50 мкм	1,6	10,8	10,4	10,1	9,9	9,3	8,7	8,2	7,8
N _м + МКФ 100 мкм	2,2	8,2	8,1	8,0	7,8	7,3	7,0	6,6	6,3
N _м + инг. ур	0,5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
N _м + инг. нитр.	1,3	2,4	2,4	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9
НСР₀₅	0,4	0,7	1,0	1,1	1,1	1,1	0,7	0,5	0,5

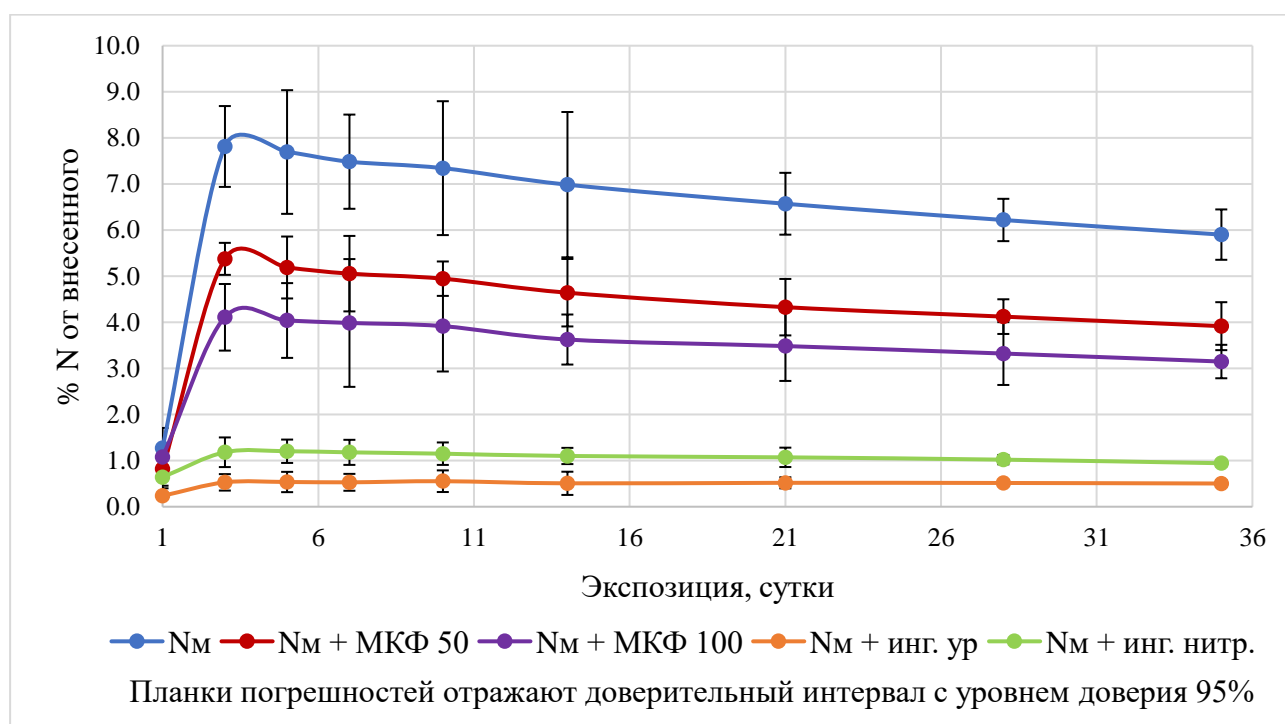


Рисунок 14 – Интенсивность эмиссии закиси азота на дерново-подзолистой почве в зависимости от формы карбамида

Согласно данным, представленным в таблице 33 и на рисунке 14, на дерново-подзолистой почве во всех вариантах опыта с внесением азотных удобрений пик выделения закиси азота пришелся на 3 стуки после предварительной инкубации

образцов и создания анаэробных условий. Динамика эмиссии закиси азота разных форм карбамида соответствовала тенденциям, выявленным при изучении процессов минерализации на дерново-подзолистой почве.

Как и при процессах минерализации, наибольшее количество закиси азота на протяжении всего периода наблюдений было отмечено в варианте с обычным карбамидом «Nм». На 3-и сутки в виде закиси выделилось 15,6 мг азота на кг почвы (или 8 % азота от внесенного количества) и оставалось на высоком уровне (14,0-15,4 мг/кг) вплоть до 14-х суток. К 35-м суткам наблюдалось постепенное снижение N-N₂O до 11,8 мг/кг, что связано с постепенной редукцией закиси (табл. 33, рис. 14).

При применении капсулированных форм карбамида отмечалось существенное снижение эмиссии закиси азота. Причем с увеличением толщины покрытия эмиссия закиси азота уменьшалась эффективнее. В варианте, в котором применялся капсулированный карбамид с тонким покрытием, содержание N-N₂O на 3 сутки составило 10,8 мг/кг, что на 31% ниже, чем при внесении обычной формы карбамида. Еще более выраженный эффект наблюдался в варианте «Nм + МКФ 100 мкм», где содержание N-N₂O в пиковую фазу денитрификации составляло всего 8,2 мг/кг, что на 47% ниже варианта сравнения «Nм». Таким образом, в период с трех до пяти суток в вариантах с капсулированными формами выделилось 4-5% азота от внесенного количества, что почти вдвое ниже, чем при применении традиционной формы карбамида. В течение 35 суток покрытие на основе монокальцийфосфата снижало эмиссию закиси азота на 15-48% по сравнению с обычной мочевиной (табл. 33, рис.14).

Наиболее эффективно процесс денитрификации сдерживали формы карбамида с ингибиторами, что согласуется с литературными данными (Смирнов, 1987; Trenkel, 2010; Garzón, Cárdenas, 2013). В варианте, где мочевина применялась с ингибитором нитрификации содержание N-N₂O на 3-5 сутки составило 2,4 мг/кг (1,2 % азота от внесенного), что в 6,5 раз ниже по сравнению с обычным карбамидом и в 3,4-4,5 раза, чем в вариантах с капсулированными формами (табл.33, рис.14).

Ингибитор уреазы практически полностью подавлял образование закиси азота. На протяжении всего опыта содержание N-N₂O не превышало 1,1 мг/кг, и соответствовало всего 0,5% азота от внесенного количества (табл. 33, рис.14).

Начиная с 5-х суток эмиссия закиси азота во всех вариантах постепенно снижалась вследствие дальнейшего восстановления закиси азота до молекулярного азота, хроматографическому определению которого мешало высокое содержание азота в атмосферном воздухе. К 35-м суткам содержание закиси азота в вариантах с капсулированными формами снизилось до 6,3-7,8 мг/кг, с ингибиторами – до 1,0-1,9 мг/кг, а на традиционном карбамиде – до 11,8 мг/кг (табл. 33).

3.4.2 Интенсивность денитрификации на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Результаты по изучению интенсивности процесса денитрификации на каштановой почве представлены в таблице 34 и на рисунке 15.

Каштановая почва характеризовалась принципиально иным уровнем денитрификационной активности по сравнению с дерново-подзолистой. Прежде всего, обращает на себя внимание высокий фоновый уровень эмиссии закиси азота даже на контрольном варианте без удобрений, что объясняется высоким содержанием нитратов в исходном образце почвы (табл. 9) и активным микробиоценозом. Содержание N-N₂O в контрольном варианте на 5-7 сутки составило 53,7-53,8 мг/кг и оставалось повышенным до конца опыта – 43,8 мг/кг на 35-е сутки (табл.34).

Внесение традиционной формы карбамида резко усилило процесс денитрификации. Максимальное содержание закиси азота было установлено на 7-10-е сутки и составило 83,2-83,5 мг/кг. Высокий уровень эмиссии сохранялся на протяжении всего периода наблюдений. В пиковый период (5-10-е сутки) потери азота с эмиссией N₂O на этом варианте достигли 14-15% от внесенного количества, что почти вдвое превышает показатели, полученные на дерново-подзолистой почве (табл.34, рис.15, рис.14).

Таблица 34 – Динамика эмиссии закиси азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Вариант	Экспозиция, сутки								
	1	3	5	7	10	14	21	28	35
	Содержание N-N ₂ O, мг/кг								
Контроль (без уд.)	0,0	32,7	53,7	53,8	52,7	50,5	49,5	49,3	43,8
N _M (вар. срав.)	1,8	58,5	82,0	83,5	83,2	78,2	77,7	75,8	69,8
N _M + МКФ 50 мкм	1,2	53,2	75,5	78,8	77,0	75,8	68,7	67,1	61,2
N _M + МКФ 100 мкм	0,7	53,0	76,0	81,4	80,2	78,1	77,0	75,4	71,1
N _M + инг. ур	0,0	34,7	55,6	58,3	57,6	54,3	51,5	50,0	44,8
N _M + инг. нитр.	1,5	45,8	65,7	67,8	65,4	66,1	61,6	57,7	50,3
НСР₀₅	0,3	2,0	2,2	1,9	3,0	3,1	2,9	2,3	2,1

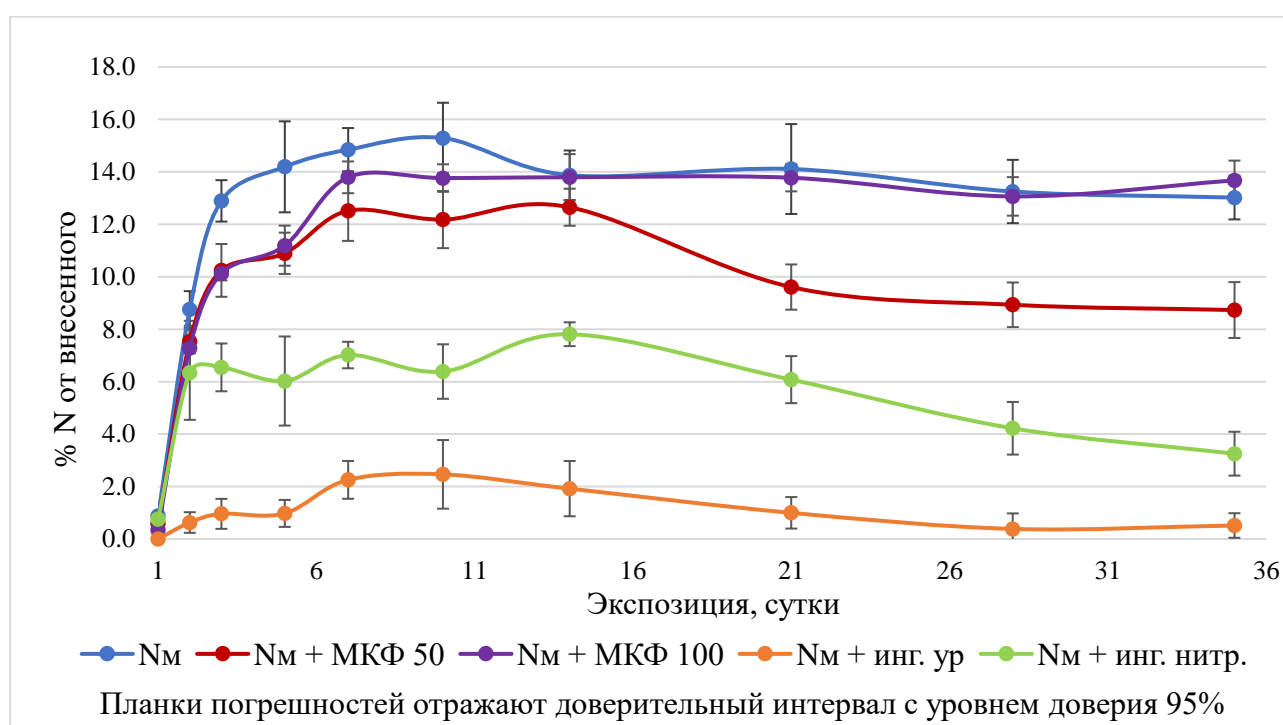


Рисунок 15 – Интенсивность эмиссии закиси азота на каштановой почве в зависимости от формы карбамида

Все модифицированные формы карбамида эффективно сдерживали процесс денитрификации на каштановой почве до 5 суток. К 7-м суткам, как и в варианте сравнения «N_M», эмиссия закиси достигала своего пика, но была заметно ниже (табл.34, рис. 15).

В вариантах с внесением капсулированных форм закономерность влияния толщины покрытия, отчетливо проявившаяся на дерново-подзолистой почве в течение опыта, на каштановой почве имела несколько иной характер. До 5 суток

капсулированные формы карбамида по эффективности были на одном уровне. Так, в данных вариантах на 5-е сутки количество выделившегося азота составляло 11% от внесенного, тогда как на обычном карбамиде показатель был равен 14% от внесенного количества. В дальнейшем сохранялась тенденция, выявленная при изучении процессов аммонификации и нитрификации. Эффект сдерживания денитрификации был выражен сильнее в варианте с внесением капсулированной мочевины с тонким покрытием. На 7-е сутки абсолютное содержание N-N₂O в варианте «N_м + МКФ 50 мкм» составляло 78,8 мг/кг (12,5% азота от внесенного), в варианте «N_м + МКФ 100 мкм» – 84,1 мг/кг (14% азота от внесенного). В целом за 7 дней опыта эмиссия закиси азота в данных вариантах опыта была ниже на 7-60%. Несмотря на то, что капсулированные формы карбамида снижали эмиссию закиси азота на каштановой почве, этот эффект был менее выражен, чем на дерново-подзолистой почве.

В вариантах с применением ингибиторов выделение закиси азота, обуславливалось в основном почвенными запасами нитратов. Лучший результат, как и на дерново-подзолистых почвах отмечался в варианте, в котором применялась мочевина с ингибитором уреазы. Там эмиссия закиси практически отсутствовала и лишь незначительно превысила контроль в течение опыта. Максимальное содержание N-N₂O составило 58,3 мг/кг на 7-е сутки, что было выше контроля (53,8 мг/кг) на 8 %. Содержание азота от внесенного количества составило 2%, что в 7,5 раз меньше по сравнению с традиционной формой карбамида (таблица 34, рисунок 18). Ингибитор нитрификации также существенно снижал эмиссию закиси азота, однако его эффективность была ниже, чем у ингибитора уреазы. На 7-е сутки максимальное значение выделившегося азота в виде закиси составило 7% от внесенного, что вдвое меньше, чем у обычного карбамида и в 3,5 раза больше, чем на карбамиде с ингибитором уреазы (рис. 15).

Важно отметить, что во всех вариантах опыта, начиная с 7-10 суток и до конца наблюдений, отмечалось постепенное снижение содержания закиси азота, что связано с ее редукцией до молекулярного азота в условиях длительного анаэробнобиозиса.

Таким образом, все модифицированные формы карбамида эффективно снижают эмиссию закиси азота по сравнению с традиционной формой удобрения, однако степень этого снижения существенно различается в зависимости от типа почвы и вида модификации.

На дерново-подзолистой почве капсулированные формы обеспечили снижение потерь азота с денитрификацией почти в два раза (с 8% до 4-5% от внесенного), причем эффективность возрастала с увеличением толщины покрытия. На каштановой почве эффект был менее выражен: снижение с 14% до 11%.

Наилучший результат на обоих типах почв показали стабилизаторы азота, в особенности ингибитор уреазы, который практически полностью блокировал процесс денитрификации. На дерново-подзолистой почве потери составили всего 0,5% азота от внесенного, на каштановой – 2% азота от внесенного. Высокая эффективность ингибитора уреазы объясняется тем, что он предотвращает образование аммония на начальном этапе превращения азота мочевины, тем самым лимитируя субстрат для последующей нитрификации и, соответственно, для денитрификации. Ингибитор нитрификации также существенно снижал эмиссию закиси азота, однако его эффективность была несколько ниже, чем у ингибитора уреазы, особенно на каштановой почве.

Полученные данные позволяют рассматривать использование модифицированных форм карбамида, как эффективный агротехнологический прием снижения непродуктивных потерь азота из почвы (Trenkel, 2010; Lewu et al., 2021). При этом в полевых условиях, где в отличие от модельно-лабораторных опытов, отсутствуют столь идеальные условия для денитрификации, эффективность сдерживания процесса может быть еще выше, а период сохранения азота в доступной для растений 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 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

д.в. – действующее вещество;

KI_N – коэффициент использования азота удобрений;

$K_{хоз}$ – коэффициент хозяйственной эффективности;

МКФ – монокальцийфосфат;

$НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница при 5%-ном уровне значимости;

$ЭФ_{N_2O}$ – эмиссионный фактор;

AAPFCO (The Association of American Plant Food Control Officials) – Ассоциации американских должностных лиц по контролю за растительными продуктами питания;

CEN (European Committee for Standardization) – Европейский комитет по стандартизации;

FAO (Food and Agriculture Organization) – Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций;

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Межправительственная группа экспертов по изменению климата;

WMO (World Meteorological Organization) – Всемирная метеорологическая организация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин, Н. С., Вольфкович С. И. Новые виды комплексных удобрений / Н. С. Авдонин, С. И. Вольфкович. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. – 61 с.
2. Алферов, А.А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы / А.А. Алферов. – М.: РАН, 2020 – 184 с.
3. Алферов, А.А. Эффективность применения азотных удобрений и биопрепаратов на яровой пшенице / А. А. Алферов, С. Н. Никитин, Л. С. Чернова, А. А. Завалин // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 5. – С. 39-42. – DOI 10.31857/S2500262723050071.
4. Амелин, А. В. Сравнительная характеристика современных сортов яровой и озимой пшеницы в связи с селекцией на высокую и качественную урожайность зерна в условиях Центрально-Черноземного региона России / А. В. Амелин, Е. И. Чекалин, В. В. Заикин [и др.] // Вестник аграрной науки. – 2019. – № 6 (81). – С. 9–17. – DOI 10.15217/issn2587-666X.2019.6.9.
5. Анспок, П.И. Справочник агрохимика Нечерноземной полосы / П.И. Анспок, Ю.А. Штиканс, Р.Р. Визла. – Л.: Колос.Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
6. Афанасьев, Р. А. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в условиях Нечерноземья при внесении минеральных удобрений / Р. А. Афанасьев, В. А. Иванчик // Плодородие. – 2019. – № 6(111). – С. 11-14. – DOI 10.25680/S19948603.2019.111.03.
7. Афанасьев, С. В. Азотные удобрения пролонгированного действия / С. В. Афанасьев, Ю. Н. Шевченко, М. В. Кравцова // Химическая техника. – 2017. – №9. – С. 33-35.
8. Бамбалов, Н.Н. Новое поколение комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия. / Н.Н. Бамбалов, Г.А. Соколов // Земледелие и растениеводство. – 2020. – №4. – С. 28-33.
9. Барабанщикова, Л. Н. Эффективность применения капсулированной мочевины при возделывании картофеля в условиях Северной лесостепи Тюменской

области / Л. Н. Барабанщикова, Г. Н. Филисюк // Journal of Agriculture and Environment. – 2023. – № 12(40). – DOI 10.23649/JAE.2023.40.11.

10. Баранова, Л. А. Эффективность применения нового азотного удобрения на разных типах почв в условиях Северного Зауралья Тюменской области / Л. А. Баранова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 3. – С. 34-40.

11. Баранова, Л. А. Технология капсулирования мочевины силикатной плёнкой и эффективность её применения при внесении под зерновые и овощные культуры / Л. А. Баранова, И. Д. Комиссаров, Т. А. Малюгина // Инновационное развитие АПК Северного Зауралья : Сборник материалов региональной научно-практической конференции молодых ученых, Тюмень, 18 апреля 2013 года / Министерство сельского хозяйства РФ, Государственный аграрный университет Северного Зауралья. – Тюмень: Печатный цех «Ризограф», 2013. – С. 80-82.

12. Борисова, Н.И. Спектрофотометрический метод определения нитратов в почве / Н.И. Борисова // Агрохимия. – 1968. – № 8. – С. 148-153.

13. Боровков, В. В. Применение минеральных удобрений пролонгированного действия при выращивании саженцев туи западной с закрытой корневой системой в условиях средней полосы европейской части России / В. В. Боровков, Г. А. Демченко // Лесохозяйственная информация. – 2024. – № 1. – С. 81-90. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.1.06.

14. Вавилов, П.П. Растениеводство / П.П. Вавилов, В.В. Гриценко, В.С. Кузнецов [и др.]: под. ред. П.П. Вавилова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.:Агропромиздат, 1986. – 512 с.

15. Величко, А. Ю. Ингибитор уреазы (УТЕС®) - инновационный продукт для стабилизации азотных удобрений / А. Ю. Величко, К. А. Фанда // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях, Вологда, 30 ноября 2016 года / Научный центр «Диспут». Том Часть 1. – Вологда: ООО «Маркер», 2016. – С. 27-28.

16. Визирская, М. М. Эффективность различных форм азотных удобрений в условиях неустойчивого увлажнения / М. М. Визирская, Н. И. Аканова,

Г. М. Мамедов // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 3. – С. 9-12. – DOI 10.24411/2587-6740-2020-13040.

17. 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.

18. 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.

19. Волкова, М. А. Трансформация карбамида пролонгированного действия в почве и его эффективность в посевах яровой пшеницы / М. А. Волкова, В. М. Лапушкин // Плодородие. – 2024а. – № 5(140). – С. 32-38. – DOI 10.25680/S19948603.2024.140.07.

20. 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, 2024б. – С. 129-135.

21. 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. – DOI 10.24412/1029-2551-2025-1-001.

22. 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, 2025а. – С. 433-436.

23. 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, 2025b. – С. 26-29.

24. Гамзиков, Г.П. Агрохимия азота в агроценозах / Г.П Гамзиков. *Рос. Акад. с.х. наук, Сиб. отд-ние. Новосибир. гос. аграр. ун-т.* – Новосибирск, 2013. – 790 с.

25. Гатаулина, Г.Г. Растениеводство: учебник / Г.Г. Гатаулина, В.Е. Долгодворов, П.Д. Бугаев: под ред. Г.Г. Гатаулиной. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 608 с.

26. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2021 г. № 892-ст: дата введения 01.08.2022 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75803.pdf> (дата обращения 04.05.2022)

27. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО (с Изменением N 1): государственный стандарт союза ССР: утвержден и введен в действие постановлением

Государственного комитета СССР по стандартам от 26 марта 1985 г. № 820: дата введения 01.07.1986 г.: внесено Изменение N 1, утвержденное и введенное в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.06.2022 N 519-ст с 01.01.2023: // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023490/titles> (дата обращения 04.05.2022)

28. ГОСТ 26212-2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 августа 2021 г. № 891-ст: дата введения 01.08.2022 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/757/75796.pdf> (дата обращения 04.05.2022)

29. ГОСТ 27821-2020. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06 октября 2020 г. № 749-ст: дата введения 01.01.2022 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/739/73951.pdf> (дата обращения 04.05.2022)

30. ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 799-ст: дата введения 01.01.2013 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293788/4293788445.htm> (дата обращения 04.05.2022)

31. ГОСТ 13496.4-2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 08 августа 2019 г. № 488-ст: дата

введения 01.08.2020 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727957.pdf> (дата обращения 08.10.2022)

32. ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания фосфора: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 19 марта 1998 г. № 66-ст: дата введения 01.01.1999 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827784.pdf> (дата обращения 08.10.2022)

33. ГОСТ 30504-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 28 апреля 1998 г. № 161-ст: дата введения 01.01.1999 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/89/8956.pdf> (дата обращения 08.10.2022)

34. ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка: межгосударственный стандарт: введен в действие 01.06.1993 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/28/28268.htm> (дата обращения 08.10.2022)

35. ГОСТ 26489-95. Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО: государственный стандарт союза ССР: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 марта 1985 г. № 821: дата введения 01.07.1986 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023496/titles> (дата обращения 05.05.2023)

36. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 8 февраля 1985 г. № 283: дата введения 01.07.1986

г.: дата введения 01.01.1986 г. // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/201/20148.pdf> (дата обращения 14.04.2024)

37. ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО: государственный стандарт союза ССР: введен в действие 01.07.1993 г // Библиотека нормативной документации. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828275.htm> (дата обращения 14.04.2024)

38. Генкель, П.А. Физиология сельскохозяйственных растений. Т.4: Физиология пшеницы / П.А. Генкель. – М.: МГУ, 1969. – 556 с.

39. Гриб, С. И. Коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза и урожайность сортов пшеницы яровой мягкой при разном уровне азотного питания / С. И. Гриб, И. И. Берестов, Р. В. Мельников // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2017. – № 53. – С. 91-97.

40. Гусева, Ю.Е. Практикум по системе удобрения: учебное пособие / Ю.Е. Гусева, А.Н. Налиухин, В.А. Демин; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – 136 с.

41. Даценко, Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты [монография] / Ю. С. Даценко ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Географический фак. – Москва: ГЕОС, 2007. – 251, [1] с: ил., табл.: 22 см.

42. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. – М: Альянс, 2011. – 416 с.

43. Егоров, В. С. Последствие разных систем удобрения на процессы несимбиотической азотфиксации и денитрификации на дерново-подзолистой почве / В. С. Егоров // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 1. – С. 13-16.

44. Емцев, В.Т. Микробиология: учебник для бакалавров / В.Т. Емцев, Е.Н. Мишустин. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 445 с.

45. Жигарева, Т.Л. Использование растениями и превращение в почве азота аммиачной селитры в зависимости от известкования и внесения молибдена: дис. ... канд. с.х. наук: 06.01.04 / Тамара Леонидовна Жигарева. – Москва, 1972. – 156 с.
46. Журбицкий, З. И. Теория и практика вегетационного метода / З.И. Журбицкий. – Москва: Наука, 1968. – 266 с.
47. Завалин, А. А. Азот и качество зерна пшеницы / А. А. Завалин, О. А. Соколов // Плодородие. – 2018. – № 1(100). – С. 14-17.
48. Завалин, А.А. Биологический и минеральный азот в земледелии России / А.А. Завалин. – М.: Изд-во ВНИИА, 2022 – 256 с.
49. Завалин, А. А. Коэффициент использования растениями азота удобрений и его регулирование / А. А. Завалин, О. А. Соколов // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2019. – № 4. – С. 71-75. – DOI 10.24411/2587-6740-2019-14070.
50. Завалин, А. А. Оценка эмиссии закиси азота в земледелии Чеченской Республики / А. А. Завалин, Т. М. Духанина, М. А. Такаева // Плодородие. – 2023. – № 1(130). – С. 34-39. – DOI 10.25680/S19948603.2023.130.08.
51. Завалин, А.А. Современное состояние проблемы азота в мировом земледелии / А. А. Завалин, Г. Г. Благовещенская, Н. Я. Шмырева [и др.] // Агрохимия. – 2015. – № 5. – С. 83-95.
52. Завалин, А.А. Управление азотным питанием растений в почве / А. А. Завалин, Г. Г. Благовещенская, Л. С. Чернова, Н. Я. Шмырева // Агрохимический вестник. – 2012. – № 4. – С. 38-40.
53. Звягинцев, Д.Г. Биология почв /Д.Г. Звягинцев, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 445 с.
54. Игнатьева, Г.В. Сорта яровой пшеницы для центрального Нечерноземья Российской Федерации / Г. В. Игнатьева, Е. В. Викулина, З. Е. Сатарина, С. А. Булатова // Владимирский земледелец. – 2020. – № 2(92). – С. 56-62. – DOI 10.24411/2225-2584-2020-10121.

55. Каноатов, Х. М. Эффективный способ фосфорнокислотной активации фосфатного сырья / Х. М. Каноатов, О. А. Мансуров, И. Р. Мамажанова // *Universum: технические науки.* – 2020. – № 12-3(81). – С. 49-53.
56. Каплунова, Л.С., Ампилогов Н.Е. Полифосфат мочевины – новое эффективное удобрение / Л.С. Каплунова, Н.Е. Ампилогов // *Агрохимия.* – 1970. – №9. – С.1-7.
57. Каранкевич, Е. В. Влияние гидротермических условий на процессы аммонификации и нитрификации соединений азота в торфяных почвах разных стадий эволюции / Е. В. Каранкевич, Н. Н. Семенов // *Мелиорация.* – 2013. – № 1(69). – С. 131-139.
58. Кидин, В.В. Агрохимия: учебное пособие для подготовки бакалавров по направлению 35.03.03 "Агрохимия и агропочвоведение" / В. В. Кидин; М-во сельского хоз-ва Российской Федерации, Российский гос. аграрный ун-т - МСХА им. К. А. Тимирязева. – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 349 с.
59. Кидин, В.В. Агрохимия азота, фосфора и калия: учебное пособие / В.В. Кидин. – М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2014. – 254 с.
60. Кидин, В. В. Влияние рыхления и аэрации почвы разных горизонтов на ее биологическую активность, аммонификацию и денитрификацию / В. В. Кидин, В. В. Зенкина // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* – 2008. – № 3. – С. 33-41.
61. Кидин, В. В. Газообразные потери азота и динамика почвенного дыхания из разных слоев дерново-подзолистой почвы / В. В. Кидин, А. А. Прасолова // *Агрохимический вестник.* – 2014. – № 5. – С. 29-31.
62. Кидин, В.В. Использование растений азота удобрений в условиях Ставропольского края и баланс его в системе «почва-растение»: дис. ...канд. биол. наук: 06.01.04 / Кидин Виктор Васильевич. – Москва, 1974. – 147 с.
63. Кидин, В.В. Особенности питания и удобрения сельскохозяйственных культур: учеб. пособие / В.В. Кидин. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2009. – 412 с.
64. Кидин, В.В. Практикум по агрохимии / В.В. Кидин, И.П. Дерюгин, В.И. Кобзаренко [и др.]: под ред. В.В. Кидина. – М.: КолосС, 2008. – 599 с.

65. Кирюшин, В. И. Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования / В. И. Кирюшин // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т. 30, № 3. – С. 19-25.
66. Козел, Е. Г. Сравнительная оценка применения медленнодействующих форм карбамида при выращивании листового салата на выщелоченных черноземах Тюменской области / Е. Г. Козел // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. – 2020. – № 3(60). – С. 33-39. – DOI 10.34655/bgsha.2020.60.3.005.
67. Козел, Е. Г. Сравнительная оценка применения разных форм мочевины при возделывании картофеля / Е. Г. Козел, Г. Н. Филисюк // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 12. – С. 119-122.
68. Кореньков, Д.А. Агрохимия азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М.: Наука, 1976. – 222 с.
69. Кореньков Д.А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений / Д.А. Кореньков. – М., 1999. – 299 с.
70. Кореньков Д.А. Удобрения их свойства и способы использования / Д.А. Кореньков. – М.: Колос, 1982. – 415 с.
71. Кошкин, Е.И. Частная физиология полевых культур / Е.И. Кошкин, Г.Г. Гатаулина, А.Б. Дьякова: под ред. Е.И. Кошкина. – М.: КолосС, 2005. – 344 с.
72. Кравец Г.В. Формирование фосфатных покрытий на гранулах карбамида: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 / Кравец Галина Викторовна. – Ленинград, 1984. – 174 с.
73. Кретович, В.Л. Молекулярные механизмы усвоения азота растениями / В.Л. Кретович, З.Г. Евстигнеева, Т.И. Карякина [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 263 с.
74. Кретович, В.Л. Обмен азота в растениях / В.Л. Кретович. – М., Наука, 1972 – 513 с.
75. Кудеяров, В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений / В.Н. Кудеяров. – М.: Наука, 1989. – 216 с.

76. Кудеяров, В. Н. Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) / В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1192-1205. – DOI 10.31857/S0032180X2010010X.

77. Кудеяров, В. Н. Эмиссионный фактор закиси азота при применении азотных удобрений в земледелии России / В. Н. Кудеяров // Агрохимия. – 2021. – № 11. – С. 3-15. – DOI 10.31857/S0002188121110089.

78. Лаврова, И.А. Ингибиторы нитрификации и эффективность азотных удобрений / И.А. Лаврова. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1990. – 38 с.

79. Лапушкин, В.М. Агрономическая эффективность мочевины пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы / В. М. Лапушкин, М. А. Волкова, А. А. Лапушкина [и др.] // Агрохимия. – 2024. – № 4. – С. 35-40. – DOI 10.31857/S0002188124040049. – EDN DLZQKV.

80. Лапушкин В.М. Влияние обеспеченности почвы подвижным фосфором на эффективность азотных удобрений и формирование элементов структуры урожая яровой пшеницы / В. М. Лапушкин, О. А. Муравьева, А. А. Лапушкина, М. А. Волкова // Плодородие. – 2022а. – № 3(126). – С. 6-12. – DOI 10.25680/S19948603.2022.126.02.

81. Лапушкин, В. М. Использование яровой пшеницей азота капсулированной мочевины / В. М. Лапушкин, М. А. Волкова, А. А. Лапушкина // Плодородие. – 2023а. – № 6(135). – С. 15-19. – DOI 10.25680/S19948603.2023.135.04.

82. Лапушкин В.М. Продуктивность и качество яровой пшеницы в зависимости от уровня минерального питания при выращивании на дерново-подзолистой почве / В. М. Лапушкин, М. А. Волкова, А. А. Лапушкина, О. А. Муравьева // Агрохимический вестник. – 2022б. – № 3. – С. 17-22. – DOI 10.24412/1029-2551-2022-3-003.

83. Лапушкин, В. М. Определение содержания нитратного азота в почве методом УФ-спектрофотометрии / В. М. Лапушкин // Плодородие. – 2025. – №2(143). – С. 9-13. – DOI 10.25680/S19948603.2025.143.02.

84. Лапушкин, В. М. Эффективность минеральных удобрений, модифицированных ингибиторами нитрификации и уреазы, при внесении под

яровую пшеницу / В. М. Лапушкин, А. А. Лапушкина // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 1. – С. 5-21. – DOI 10.26897/0021-342X-2025-1-5-21.

85. Лапушкин, В.М. Эффективность новых форм NPK-удобрений с замедленным и регулируемым высвобождением питательных веществ при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве / В. М. Лапушкин, Ф. Г. Игралиев, А. А. Лапушкина [и др.] // Агрохимия. – 2023b. – № 2. – С. 29-35. – DOI 10.31857/S0002188123020096.

86. Ленточкин, А. М. Оценка состояния посевных площадей зерновых культур / А. М. Ленточкин // Пермский аграрный вестник. – 2019. – № 1(25). – С. 55-62.

87. Любава, пшеница мягкая яровая (9052397) [Электронный ресурс] // Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию: офиц. сайт. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/lyubava-pshenitsa-myagkaya-yarovaya-9052397/> (дата обращения: 29.10.2025).

88. Макаров, Б.Н. Газовый режим почвы / Б.Н. Макаров. – М.: Агропромиздат, 1988. – 105 с.

89. Макаров, Б.Н. Газообразные потери азота дерново-подзолистых почв и удобрений /Б.Н. Макаров, Т.А. Патрикеева // Роль азота в земледелии дерново-подзолистых почв. Сборник статей. – 1974. – 271 с.

90. Малкандуев, Х. А. Понятие и требования к качеству зерна пшеницы / Х. А. Малкандуев, Р. И. Шамурзаев, А. Х. Малкандуева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6(110). – С. 203-216. – DOI 10.35330/1991-6639-2022-6-110-203-216.

91. Мамай А.В. Микробная трансформация соединений азота и углерода в лесных почвах средней тайги (на примере Карелии): дис. ... канд. биолог. Наук: 03.02.03 / Мамай Анастасия Витальевна. – Москва, 2014. – 153 с.

92. Маннхайм, Т. Удобрение культур стабилизированными азотными удобрениями / Т. Маннхайм, Н. Бергер // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2015. – № 3. – С. 28-30.
93. Минеев, В.Г. Пути улучшения качества зерна пшеницы / В.Г. Минеев. – М.: Колос, 1971. – 188 с.
94. Муравин, Э.А. Агрохимия: учебник для студ. учреждений высш. образования / Э.А. Муравин, Л.В. Ромодина, В.А. Литвинский. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 304 с.
95. Мухина, И.М. Вклад нитрификации и денитрификации в образование закиси азота в профиле сельскохозяйственной дерново-подзолистой супесчаной почвы / И. М. Мухина, Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов // Агрофизика. – 2015. – № 3. – С. 19-25.
96. Мухина, М. Т. Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития / М. Т. Мухина, Р. А. Боровик, А. А. Коршунов // Плодородие. – 2021. – № 4(121). – С. 77-82. – DOI 10.25680/S19948603.2021.121.23.
97. Неттевич, Э.Д. Яровая пшеница в нечерноземной зоне / Э.Д. Неттевич. – М.: Россельхозиздат, 1976. – 220 с.
98. Никитин, С. Н. Влияние различных видов минеральных удобрений на продуктивность и качество зерна яровой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья / С. Н. Никитин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 5(83). – С. 65-71. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-05-07.
99. Никитин, С. Н. Продуктивность яровой пшеницы и окупаемость минеральных удобрений при применении биологических препаратов / С. Н. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Сельскохозяйственные науки. – 2024. – Т. 3, № 1(9). – С. 46-52. – DOI 10.37313/2782-6562-2024-3-1-46-52.
100. Новиков, Н.Н. Биохимия растений: учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений / Н.Н. Новиков. – М.: КолосС, 2012. – 679 с.

101. Новиков, Н.Н. Состав белков и качество зерна яровой мягкой пшеницы (T. Aestivum) в зависимости от уровня азотного питания и применения фиторегуляторов при выращивании на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве / Н.Н. Новиков, А.А. Жарихина // Известия ТСХА. – 2012. – №5. – С. 73-81.

102. Новоселов, С. И. Влияние агроэкологических условий на аммонифицирующую и нитрифицирующую способность почвы / С. И. Новоселов // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2015. – Т. 1, № 4(4). – С. 42-47.

103. Новоселова, Е.С. Влияние биологического азота на урожайность и качество зерна яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве потока Нечерноземной зоны: автореф. дис. канд. биол. Наук: 06.01.04 / Новоселова Екатерина Сергеевна – Йошкар-Ола. – 2007. – с. 24

104. Объемы приобретения минеральных удобрений АПК России [Электронный ресурс] // Российская ассоциация производителей удобрений (РАПУ). URL: <https://rapu.ru/analytics/> (дата обращения: 29.10.2025)

105. Осипов, А. И. Биологический круговорот азота атмосферы / А. И. Осипов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 42. – С. 97-103.

106. Павлов, А.Н. Накопление белка в зерне пшеницы и кукурузы. / А.Н. Павлов. – М.: Наука, 1967 – 339 с.

107. Пасынков, А. В. Эффективность азотных удобрений при возделывании яровой тритикале на супесчаных почвах / А. В. Пасынков, Ю. В. Хомяков, Е. Н. Пасынкова // Агрехимический вестник. – 2021. – № 4. – С. 23-28. – DOI 10.24412/1029-2551-2021-4-005.

108. Пасынкова, Е. Н. Эффективность минеральных удобрений и азотных подкормок в период вегетации нового сорта озимого тритикале / Е. Н. Пасынкова, Л. П. Бекиш, А. В. Пасынков // Агрехимия. – 2025. – № 6. – С. 26-34. – DOI 10.31857/S0002188125060042.

109. Патент № 2776275 С1 Российская Федерация, МПК С05G 3/40. Способ получения удобрений с замедленным и контролируемым высвобождением

питательных веществ: № 2021126117: заявл. 02.09.2021: опубл. 15.07.2022 / А. М. Норов, Д. А. Пагалешкин, П. С. Федотов [и др.]; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова". – EDN FGZDKC.

110. Педько, А. Д. антропогенное эвтрофирование / А. Д. Педько, К. В. Дорошенко, Г. Г. Боровик // Colloquium-Journal. – 2021. – № 23-1(110). – С. 4-5.

111. Петербургский А.В. Азот в современной земледелии / А.В. Петербургский // Тезисы докладов Всесоюзного рабочего совещания по Международной программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера» Проект 9а «Экологическая оценка последствия использования удобрений в наземных и пресноводных экосистемах». – 1982. – С. 3-4.

112. Петров, А.Ф. Влияние азотных удобрений на урожай и качество зерна яровой пшеницы / А. Ф. Петров, А. Н. Мармулев, А. Г. Митракова, Н. В. Галузий // Инновации и продовольственная безопасность. – 2017. – № 4(18). – С. 14-19.

113. Пироговская, Г. "Умные" удобрения / Г. Пироговская // Наука и инновации. – 2020. – № 5(207). – С. 28-32.

114. Посевные площади сельскохозяйственных культур в Российской Федерации (часть 1) [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики : офиц. сайт. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/bul_dr/sx/Posev_tom1-vsxp16.rar (дата обращения: 08.10.2025).

115. Посыпанов, Г.С. Растениеводство: учеб. пособие / Г.С. Посыпанов, В.Е. Долгодворов, Б.Х. Жеурков и др.: под ред. Г.С. Посыпанова. – М.: КолосС, 2007. – 612 с.

116. Прасолова, А. А. Изучение газообразных потерь азота и динамика почвенного дыхания в черноземе выщелоченном / А. А. Прасолова // Агрехимический вестник. – 2014. – № 6. – С. 25-27.

117. Проберж, Э. С. Влияние погодных факторов на эффективность удобрений в почвозащитном севообороте / Э. С. Проберж // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2004. – № 4(4). – С. 20-21.

118. Промышленное производство в России. 2023: статистический сборник / Росстат. – Москва, 2023. – 259 с.
119. Прянишников, Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии СССР / Акад. Д. Н. Прянишников: Акад. наук СССР. – Москва, Ленинград: изд. и 2-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР, 1945. – 199 с.
120. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. Т.1.– М.: Колос, 1965. – 767 с.
121. Норов, А.М. Пути решения вопросов устойчивого развития и климатической повестки в производствах минеральных удобрений: возможности, технологии, продукты / А.М. Норов [и др.] // Узбекский химический журнал. – 2023. – Спец.номер. – С.171-179.
122. Пшеница и ее улучшение / Пер. с англ. Н. А. Емельяновой и Н. М. Резниченко; Под ред. д-ра с.-х. наук М. М. Якубцинера [и др.]; [Предисл. заслуж. деят. науки, д-ра биол. наук, проф. Н. Козьминой и др.]. – Москва: Колос, 1970. – 519 с.
123. Реестр пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, 2025.
124. Руделев, Е.В. Минерализация-иммобилизация азота в основных типах почв России и эффективность азотных удобрений: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Е.В. Руделев. – Москва, 1992. – 34 с.
125. Руделев, Е.В. Минерализация-иммобилизация азота в основных типах почв России и эффективность азотных удобрений: автореф. дис. д-ра. биол. наук: 06.01.04 / Руделев Евгений Викторович – Москва. – 1992. – с. 34
126. Сабилов, А.А. Инновационные минеральные удобрения и установление их экономической эффективности в сельском хозяйстве / А.А. Сабилов, А.М. Сабилов, Р.Х. Хузиахметов, Е.И. Царегородцев // Евразийский Союз Ученых. – 2015.- № 4 (13). – С.164-167.
127. Самохвалов, С.Г. Методические указания по определению аммонифицирующей способности почв / С.Г. Самохвалов, В.Г. Прижукова, Г.А. Майорец, Т.С. Груздева, Т.А. Яковлева. – М.: РАСХН, 1993. – 18 с.

128. Самохвалов С.Г. Методические указания по определению нитрифицирующей способности почв / С.Г. Самохвалов, В.Г. Прижукова, М.Н. Арсеньева, Т.С. Груздьева. – М.: ЦИНАО, 1984. – 17 с.

129. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 янв. 2021 г. № 2 [Электронный ресурс]. – М., 2021. URL: <https://178.fsvps.gov.ru/files/sanpin-1-2-3685-21-ot-28-01-2021/> (дата обращения: 10.10. 2025).

130. Сапожников, Н.А. Азот в земледелии нечерноземной полосы. / Н.А. Сапожников: под ред. доктора с.х. наук Н.А. Сапожникова – Л., Колосс, 1973. – 332 с.

131. Семенов, В. М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве / В. М. Семенов // Агрохимия. – 2020. – № 6. – С. 78-96. – DOI 10.31857/S0002188120060101.

132. Скаженник, М.А. Коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза и физиологические факторы его повышения у зерновых культур (обзор) / М. А. Скаженник, В. С. Ковалев, И. В. Балясный [и др.] // Рисоводство. – 2025. – Т. 24, № 2(67). – С. 3-13. – DOI 10.33775/1684-2464-2025-67-2-6-13.

133. Смирнов, П.М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с ^{15}N), второе переработанное и дополненное издание. / П.М. Смирнов. – М: ТСХА, 1977. – 72 с.

134. Смирнов, П.М. Вопросы агрохимии азота (в исследованиях с ^{15}N), второе переработанное и дополненное издание / П.М. Смирнов. – М: ТСХА, 1982. – 74 с.

135. Смирнов П.М. Ингибиторы нитрификации и эффективность азотных удобрений / П.М. Смирнов, Б.А. Ягодин, Э.А. Муравин [и др.]: под ред. Б.А. Ягодина. – М.: ТСХА, 1987. – 66 с.

136. Смирнов, П.М. Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями: автореф. дис...д-ра с.х. наук: 533 / П.М. Смирнов. – Москва, 1970. – 43 с.

137. Соколов, О.А. Нитраты в окружающей среде / О.А. Соколов, В.М. Семенов, В.А. Агаев. – Пушино, ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1990. – 316 с.
138. Соколов, О.А. Теория и практика рационального применения азотных удобрений / О.А. Соколов, В.М. Семенов. – М.: Наука, 1992. – 207 с.
139. Соколов, А. В. Баланс азота в дерново-подзолистых почвах / А. В. Соколов; Почвенный институт им. В. В. Докучаева. – Москва: Наука, 1966. – 223 с.
140. Сычев, В. Г. Эффективность применения карбамида с ингибитором уреазы на картофеле / В. Г. Сычев, Н. И. Аканова, М. М. Визирская // Овощи России. – 2019. – № 3(47). – С. 104-108. – DOI 10.18619/2072-9146-2019-3-104-108.
141. Титова, В. И. Влияние мочевины, модифицированной сорбентом на основе глауконита, на агрохимические свойства серой лесной почвы / В. И. Титова, Е. И. Семенова // Агрохимический вестник. – 2021. – № 3. – С. 35-39. – DOI 10.24412/1029-2551-2021-3-008.
142. Тихонов, В. Е. Роль денитрификации в убыли органического вещества в агросистемах / В. Е. Тихонов, А. И. Климентьев // Аридные экосистемы. – 2005. – Т. 11, № 28. – С. 77-84.
143. Торшин, С.П. Размер и состав газообразных потерь азота почвы и удобрений в различных условиях: автореф. дис. ... канд.биолог. наук: 06.01.04 / Торшин Сергей Порфирьевич. – Москва, 1982. – 17 с.
144. Третьякова, Е.П. Влияние температуры на процессы аммонификации и нитрификации в подзолистых почвах крайнего севера / Е.П. Третьякова // Почвоведение. – 1977. – №6. – С.158-162.
145. Турчин, Ф.В. Азотное питание растений и применение азотных удобрений. Избранные труды. / Ф.В. Турчин. – М., «Колос», 1972. – 366 с.
146. Умаров, М.М., Кураков А.В., Степанов А.Л. Микробиологическая трансформация азота в почве / М.М. Умаров, А.В. Кураков, А.Л. Степанов. – М.: ГЕОС, 2007. – 138 с.

147. Филиппова, Л. С. Круговорот азота и его соединений в почве / Л. С. Филиппова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 8(134). – DOI 10.23670/IRJ.2023.134.37.

148. Филисюк, Г.Н. Получение и эффективность применения новой формы капсулированной мочевины под картофель на выщелоченном черноземе Тюменской области: автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук: 06.01.04 /Филисюк Григорий Николаевич. – Тюмень, 2004. – 24 с.

149. Хузиахметов, Р. Х. Инновационная технология пролонгированных карбамидоформальдегидных удобрений и оценка их агрохимической и биостимулирующей эффективности / Р. Х. Хузиахметов, Е. В. Толстогузова, А. С. Низамов // Инновации и "зеленые" технологии: Вторая Всероссийская научно-практическая конференция, Тольятти, 19 апреля 2019 года. – Тольятти: ИП Зуев Сергей Анатольевич, 2019. – С. 209-215.

150. Хузиахметов, Р. Х. Оценка агрохимической эффективности уреаформа в вегетационных опытах / Р. Х. Хузиахметов, А. М. Сабиров, Г. Г. Хабибуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 3. – С. 52-55.

151. Хузиахметов, Р. Х. Технология пролонгированных карбамидоформальдегидных удобрений и оценка их агрохимической эффективности в вегетационных опытах с суданской травой / Р. Х. Хузиахметов, Д. А. Белозеров, С. А. Смирнова // Инновации и "зелёные" технологии : IV Всероссийская научно-практическая конференция : сборник материалов и докладов, Самара, 09 ноября 2023 года. – Самара: Самарская областная универсальная научная библиотека, 2024. – С. 193-198.

152. Церлинг, В.В. Агрохимические основы диагностики минреального питания сельскохозяйственных культур / В.В. Церлинг. – М., Наука, 1978. – 216 с.

153. Цыбулько, Н. Н. Вклад азота почвы и удобрений в формирование урожая сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых почвах / Н. Н. Цыбулько // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 2(61). – С. 43-54.

154. Шаляпин, В. В. Эффективность модифицированного карбамида УТЕС в агроценозе пшеницы мягкой озимой, выращиваемой в условии чернозема выщелоченного Кубани / В. В. Шаляпин, Л. М. Онищенко // Вектор современной науки : Сборник тезисов по материалам Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Краснодар, 15 ноября 2022 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – С. 412-413.

155. Шаповал, О. А. Применение новых пролонгированных форм мочевиноформальдегидных удобрений с включением микроэлементов на яровой пшенице / О. А. Шаповал, Р. А. Боровик // Агрохимический вестник. – 2021. – № 6. – С. 34-37. – DOI 10.24412/1029-2551-2021-6-007.

156. Шафран, С.А. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах нечерноземной зоны и его регулирование / С. А. Шафран, Н. А. Кирпичников, А. А. Ермаков, А. И. Семенова // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 14-20. – DOI 10.31857/S0002188121050100.

157. Шеуджен, А.Х. Агробиогеохимия чернозема. 2-е изд. доп. И перераб. /А.Х. Шеуджен. – Майкоп: ОАО «Полиграф-ЮГ», 2018. – 308 с

158. Шеуджен, А.Х. Агрохимические основы применения удобрений / А.Х. Шеуджен, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинек. – Майкоп: ОАО «Полиграф-ЮГ», 2013а – 571 с.

159. Шеуджен, А. Х. Азотный статус растений и продуктивность рисового агроценоза при применении карбамида УТЕС / А. Х. Шеуджен, М. А. Перепелин // Рисоводство. – 2023. – № 1(58). – С. 57-63. – DOI 10.33775/1684-2464-2023-58-1-57-63.

160. Шеуджен А.Х., Трубилин И.Т., Онищенко Л.М. Удобрения и оценка экономической эффективности их применения: учебное пособие / А.Х. Шеуджен, И.Т. Трубилин, Л.М. Онищенко. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2013b. – 357 с.

161. Шеуджен, А. Х. Эффективность применения на посевах риса модифицированного карбамида (®УТЕС) / А. Х. Шеуджен, Т. Н. Бондарева,

П. Н. Хачмамук [и др.] // Рисоводство. – 2020. – № 2(47). – С. 44-53. – DOI 10.33775/1684-2464-2020-47-2-44-53.

162. Шеуджен, А.Х. Географические закономерности действия удобрений / А.Х. Шеуджен, Т.Н. Бондарева, Л.М. Онищенко, С.В. Есипенко. – Майкоп: ОАО «Полиграф-ЮГ», 2017. – 95 с.

163. Эмер, Н.Р., Структурно-функциональные особенности микроорганизмов цикла азота в почвах с длительным применением минеральных удобрений: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.03 / Эмер Наталья Рудольфовна. – Москва, 2016. – 136 с.

164. Яровая мягкая пшеница Любава [Электронный ресурс] // Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»: офиц. сайт. – URL: <https://ficnemchinovka.ru/page28713867.html> (дата обращения: 29.10.2025).

165. Abalos, D. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency / D. Abalos, S. Jeffery, A. Sanz-Cobena, G. Guardia [et al.] // Agric. Ecosyst. Environ. – 2014. – Vol. 189. P. 136-144. – DOI 10.1016/j.agee.2014.03.036

166. Achilea, O. Slow- and controlled release, and stabilized fertilizers / O. Achilea // Products & Trends. NewAg International 03-'16. – 2021. – P.32-39

167. Ahmed, M. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health / M. Ahmed, M. Rauf, Z. Mukhtar, [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – Vol. 24, No. 35. – P. 26983-26987. – DOI 10.1007/s11356-017-0589-7.

168. Andersson, A. Nitrogen redistribution in spring wheat: doctoral thesis dissertation department of crop science / A. Andersson. – Alnarp. – 2005. – 35 p.

169. Aneja, V. P. Characterization of atmospheric nitrous oxide emissions from global agricultural soils / V. P. Aneja, W. H. Schlesinger, Qi. Li [et al.] // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1, No. 12. – P. 1-11. – DOI 10.1007/s42452-019-1688-5.

170. Babadi, F.E. New coating formulation for the slow release of urea using a mixture of gypsum and dolomitic limestone. / F.E. Babadi, R. Yunus, S.A. Rashid, [et al.] // Particuology. – 2015. – Vol. 23. – p. 62–67. – DOI 10.1016/j.partic.2014.12.011.

171. Babar, S.K. Comparison of Conventional and Encapsulated Urea on Growth and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) / S.K. Babar, N.A. Hassani, I. Rajpar, [et al.] // The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM). – 2019. – Vol. 6. – P. 181-187.

172. Ball, B.C. Seasonal nitrous oxide emissions from field soils under reduced tillage, compost application or organic farming / B.C. Ball, B.S. Griffiths, C.F.E. Topp, [et al.] // Agriculture, Ecosystem and Environment. – 2014. – Vol. 189. – P. 171–180. – DOI 10.1016/j.agee.2014.03.038.

173. Bamatov, I. Slow release mineral fertilizers – The production and the usage processes / I. Bamatov // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021 (1). – P. 020039.– DOI 10.1063/5.0193246.

174. Barth, G., Performance of nitrification inhibitors with different nitrogen fertilizers and soil textures / G. Barth, S. von Tucher, U. Schmidhalter, [et al.] // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2019. – Vol. 000. – P. 1-7. – DOI 10.1002/jpln.201800594

175. Bi, S. Degradable controlled release fertilizer composite prepared via extrusion: Fabrication, characterization, and release mechanisms / S. Bi, V. Barinelli, M. J. Sobkowicz // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 2. – P. 301. – DOI 10.3390/polym12020301.

176. Broschat, T. K. Release Rates of Soluble and Controlled- release Potassium Fertilizers / T. K. Broschat // HortTechnology. – 1996. – Vol.6(2). – P.128-131.

177. Buchkina, N. Soil Physical Properties and Nitrous Oxide Emission from Agricultural Soils / N. Buchkina, E. Rizhiya, S. Pavlik, [et al.]// Advances in Agrophysical Research. – Shanghai, 2013. – P. 193-220

178. Cantarella, H. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review / H. Cantarella, R. Otto, J.R. Soares, A.G.B. Silva // Journal of Advanced Research. – 2018. – Vol. 13. – P. 19–27. – DOI 10.1016/j.jare.2018.05.008.

179. Cao, Ya. Organic-C quality as a key driver of microbial nitrogen immobilization in soil: A meta-analysis / Ya. Cao, Zh. He, T. Zhu, [et al.] // Geoderma. – 2021. – Vol. 383. – P. 114784. – DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114784.

180. Chaopu, T. Improving Nitrogen Safety in China: Nitrogen Flows, Pollution and Control / T. Chaopu, Ya. Xiaoyuan, X. Longlong, [et al.] // *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. – 2022; Vol. 9(3). – P. 465-474. – DOI 10.15302/J-FASE-2022454.

181. Charles, A. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis / A. Charles, P. Rochette, D. A. Angers [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2017. – Vol. 236. – P. 88-98. – DOI 10.1016/j.agee.2016.11.021.

182. Chen, S. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers / S. Chen, M. Yang, C. Ba, [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 615. – P. 431-437. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.209

183. Clapp, J. G. Urea-triazone N characteristics and uses / J. G. Clapp // *The Scientific World Journal*. – 2001. – Vol. 1. – P. 103–107. – DOI 10.1100/tsw.2001.356.

184. Controlled-release fertilizers (CRFs): benefits and developments [Электронный ресурс] / International Fertilizer Association (IFA). – Paris, 2023. – 4 p.

– URL: https://assets.fsnforum.fao.org/public/contributions/2023/IFA_CRF%20Backgrounder_0.pdf (дата обращения: 13.10.2025).

185. Cross, L. Public Summary – World Outlook for Fertilizer Demand, Nitrogen, Phosphates and Potash from 2022 to 2023 / L. Cross, A. Gruère // IFA Strategic Forum, Washington DC, 31 October-2nd November 2022. – P.1-13.

186. Dai, Y. Effects of nitrogen application rate and a nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonia oxidizers and N₂O emissions in a grazed pasture soil / Y. Dai, H. J. Di, K. C. Cameron, [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2013. – Vol. 465. – P. 125–135. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.08.091.

187. De Datta, S. K. Integrated nitrogen management in irrigated rice / S. K. De Datta, R. J. Buresh // *Advances in Soil Science*. – 1989. – Vol. 10. – P. 143–169.

188. Denisova, K.O. Nitrous Oxide: Production, Application, and Protection of the Environment / K. O. Denisova, A. A. Ilyin, R. N. Rummyantsev [et al.] // *Russian*

Journal of General Chemistry. – 2019. – Vol. 89, No. 6. – P. 1338-1346. – DOI 10.1134/S107036321906032X.

189. Du, Ch. W. Release Characteristics of Nutrients from Polymer-coated Compound Controlled Release Fertilizers / Ch. W. Du, J. M. Zhou, A. Shaviv // Journal of Polymers and the Environment. – 2006. – Vol. 14, No. 3. – P. 223-230. – DOI 10.1007/s10924-006-0025-4.

190. Dubey, A. Zeolite coated urea fertilizer using different binders: fabrication, material properties and nitrogen release studies / A. Dubey, D. R. Mailapalli // Environmental Technology & Innovation. – 2019. – Vol. 16. – P. 100452. – DOI 10.1016/j.eti.2019.100452.

191. Elhassani, C.E. Urea-impregnated HAP encapsulated by lignocellulosic biomass-extruded composites: A novel slow-release fertilizer / C. E. Elhassani, M. Aqlil, A. M. Nzenguet [et al.] // Environmental Technology and Innovation. – 2019. – Vol. 15. – P. 100403. – DOI 10.1016/j.eti.2019.100403.

192. Emami, N. Fabrication of smart magnetic nanocomposite asymmetric membrane capsules for the controlled release of nitrate / N. Emami, A. Razmjou, F. Noorisafa, [et al.] // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. – 2017. – Vol. 8. – P. 233–243. – DOI 10.1016/j.enmm.2017.09.001.

193. Fan, C. Nitrification inhibitors mitigated reactive gaseous nitrogen intensity in intensive vegetable soils from China / C. Fan, B. Li, Z. Xiong // Science of The Total Environment. – 2018. – Vol. 612. – P. 480–489. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.08.159.

194. Fu, J. Classification research and types of slow controlled release fertilizers (SRFs) used – a review / J. Fu, C. Wang, X. Chen, [et al.] // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2018. – Vol. 49, № 17. – P. 2219-2230. – DOI 10.1080/00103624.2018.1499757.

195. Garzón, J. E. Emisiones antropogénicas de amoníaco, nitratos y óxido nítrico: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano / J. E. Garzón, E. A. Cárdenas // Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia. – 2013. – Vol. 60, № 2. – P. 121-138.

196. Gil-Ortiz, R. Enhanced Agronomic Efficiency Using a New Controlled-Released, Polymeric-Coated Nitrogen Fertilizer in Rice / R. Gil-Ortiz, M. Á. Naranjo, A. Ruiz-Navarro [et al.] // *Plants*. – 2020. – Vol. 9, No. 9. – P. 1183. – DOI 10.3390/plants9091183.
197. Gil-Ortiz, R. New Eco-Friendly Polymeric-Coated Urea Fertilizers Enhanced Crop Yield in Wheat / R. Gil-Ortiz, M. Á. Naranjo, A. Ruiz-Navarro [et al.] // *Agronomy*. – 2020. – Vol. 10, No. 3. – P. 438. – DOI 10.3390/agronomy10030438.
198. Govil, Sh. Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives / Sh. Govil, N. Van Duc Long, M. Escribà-Gelonch, [et al.] // *Industrial Crops and Products*. – 2024. – Vol. 219. – P. 119160. – DOI 10.1016/j.indcrop.2024.119160.
199. Hermida, L. Slow release urea fertilizer synthesized through recrystallization of urea incorporating natural bentonite using various binders / L. Hermida, J. Agustian // *Environmental Technology & Innovation*. – 2019. – Vol. 13. – P. 113-121. – DOI 10.1016/j.eti.2018.11.005.
200. Hoang, T. T. H. Nitrogen fertilization effects on methane and nitrous oxide emissions from wetland rice fields of Central Vietnam / T. T. H. Hoang, T. Do, T. N. V. Hoang, [et al.] // *International Journal of Agriculture and Biology*. – 2018. – Vol. 20. – DOI 10.17957/IJAB/15.0685.
201. Holz, M. Rhizosphere carbon priming: a plant mechanism to enhance soil nitrogen accessibility? / M. Holz, E. Paterson, J. Pausch // *Plant and Soil*. – 2023. – Vol. 488, No. 1-2. – P. 175-185. – DOI 10.1007/s11104-023-05979-8.
202. Horstmann, L. Potential risks of the nitrification inhibitors nitrapyrin and DMPP: a review on non-target effects on microorganisms and environmental fate in agricultural soil / L. Horstmann, E. Gözdereliler, U. E. Bollmann, [et al.] // *ChemRxiv*. – 2025. – DOI: 10.26434/chemrxiv-2025-0tr1r.
203. Ibrahim, K. R. M. Comparative performance of different urea coating materials for slow release / K. R. M. Ibrahim, F. E. Babadi, R. Yunus // *Particuology*. – 2014. – Vol. 17. – P. 165-172. – DOI 10.1016/j.partic.2014.03.009.

204. IFA Market Intelligence Service. World outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2021 to 2022: public summary / IFA Strategic Forum, 15–17 November 2021. – P. 1-6.

205. Iftime, M. M. Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention / M. M. Iftime, G. L. Ailiesei, E. Ungureanu, [et al.] // Carbohydrate Polymers. – 2019. – Vol. 223. – P. 115040. – DOI 10.1016/j.carbpol.2019.115040

206. Jenkinson, D. S. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen: the so-called “priming” effect / D. S. Jenkinson, R. H. Fox, J. H. Rayner // Journal of Soil Science. – 1985. – Vol. 36, № 3. – P. 425-444.

207. IPCC. Climate change: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. T. F. Stocker [et al.]. – New York: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.

208. ISO 8157:2015. Fertilizers and soil conditioners – Vocabulary. – 2015.

209. Isobe, K. Nitrification and nitrifying microbial communities in forest soils / K. Isobe, K. Koba, S. Otsuka, [et al.] // Journal of Forest Research. – 2011. – Vol. 16. – P. 351-362.

210. Kaur, H. Nitrogen fertilizer and pronitridine rates for corn production in the Midwest U.S / H. Kaur, K. A. Nelson, Ch. K. Wikle [et al.] // Field Crops Research. – 2024. – Vol. 306. – P. 109200. – DOI 10.1016/j.fcr.2023.109200.

211. Kiran, J. K. Effects of controlled release urea on the yield and nitrogen nutrition of flooded rice / J. K. Kiran, Y. M. Khanif, H. Amminuddin, [et al.] // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2010. – Vol. 41, № 7. – P. 811-819. – DOI 10.1080/00103621003592333

212. Kottegoda, N. Urea-hydroxyapatite nanohybrids for slow release of nitrogen / N. Kottegoda, C. Sandaruwan, G. Priyadarshana, [et al.] // ACS Nano. – 2017. – Vol. 11. – P. 1214–1221. – DOI 10.17863/CAM.7219.

213. Krauss, M. Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley winter wheat cropping sequence / M. Krauss,

R. Ruser, T. Müller, [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2017. – Vol. 239. – P. 324–333. – DOI 10.1016/j.agee.2017.01.029

214. Ladha, J. K. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects / J. K. Ladha, H. Pathak, T. J. Krupnik, [et al.] // *Advances in Agronomy*. – 2005. – Vol. 87. – P. 85–156. – DOI: 10.1016/S0065-2113(05)87003-8.

215. Lakshani, N. Release Kinetic Models and Release Mechanisms of Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers / N. Lakshani, H. S. Wijerathne, Ch. Sandaruwan [et al.] // *ACS Agricultural Science and Technology*. – 2023. – Vol. 3, No. 11. – P. 939-956. – DOI 10.1021/acsagscitech.3c00152.

216. 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 [et al.] // 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. – DOI 10.1088/1755-1315/1212/1/012021.

217. Lapushkin, V. M. Effect of coated urea and NPK-fertilizers on spring wheat yield and nitrogen use efficiency / V. M. Lapushkin, A. A. Lapushkina, S. P. Torshin // *Brazilian Journal of Biology*. – 2024. – Vol. 84. – P. 279269. – DOI 10.1590/1519-6984.279269.

218. Lawrencja, D. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release / D. Lawrencja, S. K. Wong, D. Yi. S. Low [et al.] // *Plants*. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 238. – DOI 10.3390/plants10020238.

219. Lenka, S. Impacts of fertilizers use on environmental quality / S. Lenka, C. M. Rajendiran, M. L. Dotaniya, [et al.] // *National Seminar on Environmental Concern for Fertilizer Use in Future*, Bidhan Chandra Krishi Viswavidyalaya, Kalyani. – Society for Fertilizers and Environment, 2016. – Vol. 26. – P. 19–25.

220. Lesschen, J. P. Differentiation of nitrous oxide emission factors for agricultural soils / J. P. Lesschen, G. L. Velthof, W. de Vries, [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2011. – Vol. 159. – P. 3215–3222. – DOI 10.1016/j.envpol.2011.04.001

221. Lewu, F. B. Controlled release fertilizers for sustainable agriculture / F. B. Lewu, T. Volova, S. Thomas, [et al.] // Academic Press, 2021. – P. 253.
222. Li, Q. A new urease-inhibiting formulation decreases ammonia volatilization and improves maize nitrogen utilization in North China Plain / Q. Li, X. Cui, X. Liu, [et al.] // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, № 1. – Art. 43853. – DOI 10.1038/srep43853.
223. Li, T. Enhanced efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem / T. Li, W. Zhang, J. Yin, [et al.] // Global Change Biology. – 2018. – Vol. 24, № 2. – P. 511–521. – DOI 10.1111/gcb.13918.
224. Li, Y. Synthesis and performance of bio-based epoxy coated urea as controlled release fertilizer / Y. Li, C. Jia, X. Zhang, [et al.] // Progress in Organic Coatings. – 2018. – Vol. 119. – P. 50–56. – DOI 10.1016/j.porgcoat.2018.02.013
225. Li, Z. Vital roles of soil microbes in driving terrestrial nitrogen immobilization / Z. Li, Z. Zeng, D. Tian [et al.] // Global Change Biology. – 2021. – Vol. 27, No. 9. – P. 1848-1858. – DOI 10.1111/gcb.15552.
226. Liu, Ch. Optimizing nitrogen management diminished reactive nitrogen loss and acquired optimal net ecosystem economic benefit in a wheat-maize rotation system / Ch. Liu, D. Ren, H. Liu [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 331. – P. 129964. – DOI 10.1016/j.jclepro.2021.129964.
227. . Liu, Ch. The effects and mechanism of urease inhibitor and its combination with nitrification inhibitor on nitrous oxide emission across four soil types / Ch. Liu, B. Li, Q. Wu [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2025. – Vol. 16. – P. 1663261. – DOI 10.3389/fpls.2025.1663261.
228. Liu, G. Controlled-release and slow-release fertilizers as nutrient management tools / G. Liu, L. Zotarelli, Y. Li, D. Dinkins, [et al.] // HS1255. EDIS. – 2014. – P. 1-6.
229. Luo, J. Effect of nitrification inhibitor on nitrous oxide emissions in pasture soils / J. Luo, C. A. M. de Klein, M. Shepherd, [et al.] // 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 1–6 August 2010. – Brisbane: International Union of Soil Sciences, 2010. – P. 59–62.

230. Lv, J. Mitigation of reactive nitrogen loss from arable soils through microbial inoculant application: a meta-analysis / J. Lv, X. Zhang, Z. Sha, [et al.] // *Soil & Tillage Research*. – 2024. – Vol. 235. – P. 105883. – DOI 10.1016/j.still.2023.105883.

231. Lyu, H. Drive soil nitrogen transformation and improve crop nitrogen absorption and utilization: a review of green manure applications / H. Lyu, Y. Li, Y. Wang, [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2024. – Vol. 14. – P. 1–15. – DOI 10.3389/fpls.2023.1305600.

232. Messiga, A. J. Nutrients Leaching in Response to Long-Term Fertigation and Broadcast Nitrogen in Blueberry Production / A. J. Messiga, K. Dyck, K. Ronda [et al.] // *Plants*. – 2020. – Vol. 9, No. 11. – P. 1530. – DOI 10.3390/plants9111530.

233. Meybeck, A. Greening the economy with climate-smart agriculture: food security and climate change / A. Meybeck, V. Gitz // FAO, Hanoi, Vietnam. – 2012. – P. 1-52.

234. Mohib, A. W. Nitrogen cycling dynamics: investigating volatilization and its interplay with N₂ fixation / A. W. Mohib, P. Niazi, S. M. Barai, [et al.] // *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*. – 2024. – Vol. 3, № 1. – P. 17–31. – DOI: 10.55544/jrasb.3.1.4.

235. Morgan, K. T. Release mechanisms for slow- and controlled-release fertilizers and strategies for their use in vegetable production / K. T. Morgan, K. E. Cushman, S. Sato // *HortTechnology*. – 2009. – Vol. 19, № 1. – P. 10–12. – DOI 10.21273/HORTSCI.19.1.10.

236. Nauer, P. A. On-farm trial on the effectiveness of the nitrification inhibitor DMPP indicates no benefits under commercial Australian farming practices / P. A. Nauer, B. J. Fest, L. Visser, [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2018. – Vol. 253. – P. 82–89. – DOI: 10.1016/j.agee.2017.10.022.

237. Naz, M. Y. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review / M. Y. Naz, S. A. Sulaiman // *Journal of Controlled Release*. – 2016. – Vol. 225. – P. 109–120. – DOI 10.1016/j.jconrel.2016.01.037

238. Ouyang, X.-J. Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils / X.-J. Ouyang, G.-Y. Zhou, Z.-L. Huang, [et al.] // *Pedosphere*. – 2008. – Vol. 18. – P. 503–514. – DOI 10.1016/S1002-0160(08)60041-7.

239. Pasda, G. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on yield and quality of agricultural and horticultural crops / G. Pasda, R. Hähdnel, W. Zerulla // *Biology and Fertility of Soils*. – 2001. – Vol. 34. – P. 85-97 – DOI 10.1007/s003740100381

240. Patil, S. S. Controlled and slow-release fertilizers / S. S. Patil // *Emerging Trends in Agriculture Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – P. 23–35. DOI 10.22271/int.book.237.

241. Pereira, E. I. Novel slow-release nanocomposite nitrogen fertilizers: the impact of polymers on nanocomposite properties and function / E. I. Pereira, C. C. da Cruz, A. Solomon, [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2015. – Vol. 54. – P. 3717–3725.

242. Portugal, J. R. Do cover crops improve the productivity and industrial quality of upland rice? / J. R. Portugal, O. Arf, S. Buzetti [et al.] // *Agronomy Journal*. – 2020. – Vol. 112, No. 1. – P. 327-343. – DOI 10.1002/agj2.20028.

243. Priya, E. A review on slow-release fertilizer: nutrient release mechanism and agricultural sustainability / E. Priya, S. Sudipta, P. K. M. Pradip // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 12, № 4. – P. 113211. – DOI 10.1016/j.jece.2024.113211.

244. Qi, Z. Coated, Stabilized Enhanced-Efficiency Nitrogen Fertilizers: Preparation and Effects on Maize Growth and Nitrogen Utilization / Yu. Dong, M. He [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2021. – Vol. 12. – DOI 10.3389/fpls.2021.792262.

245. Qiu, W. Nitrous oxide emissions from animal urine as affected by season and a nitrification inhibitor dicyandiamide / W. Qiu, H. J. Di, K. C. Cameron, [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. – 2010. – Vol. 10, No. 7. – P. 1229-1235. – DOI 10.1007/s11368-010-0242-2.

246. Rashti, M. R. Assessment of N₂O emissions from a fertilized vegetable cropping soil under different plant residue management strategies using ¹⁵N tracing techniques / M. R. Rashti, W. J. Wang, C. R. Chen, [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2017. – Vol. 598. – P. 479–487. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.04.030.

247. Ravishankara, A. R. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century / A. R. Ravishankara, J. S. Daniel, R. W. Portmann // *Science*. – 2009. – Vol. 326, № 5949. – P. 123–125. – DOI 10.1126/science.1176985.

248. Regulation (EC) No 2003/2003 of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 relating to fertilizers (Text with EEA relevance) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.legislation.gov.uk/eur/2003/2003> (дата обращения: 23.10.2025).

249. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance) // *Official Journal of the European Union*. – 2019. – L 170. – P. 1–114.

250. Ribeiro, P. Nitrogen rate drives the effectiveness of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in reducing N₂O emissions from limed soil subjected to temporary waterlogging / P. Ribeiro, A. Singh, A. Sagervanshi, [et al.]// *Applied Soil Ecology*. – 2025. – Vol. 213. – P. 106287. – DOI 10.1016/j.apsoil.2025.106287.

251. Rizhiya, E. Ya. Effect of biochar on N₂O emission, crop yield and properties of Stagnic Luvisol in a field experiment / E. Ya. Rizhiya, I. M. Mukhina, E. V. Balashov [et al.] // *Zemdirbyste*. – 2019. – Vol. 106, No. 4. – P. 297-306. – DOI 10.13080/z-a.2019.106.038.

252. Robertson, G. P. Nitrogen transformations / G. P. Robertson, P. M. Groffman // *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. – 2015. – P. 407–438. DOI 10.1016/B978-0-12-415955-6.00014-1

253. Rose, T. J. Low pH of a high carbon gleysoil contributes to nitrification inhibition resulting in low N₂O soil emissions and limited effectiveness of nitrification inhibitors / T. J. Rose, L. J. Kearney, L. van Zwieten, [et al.]// *Soil Systems*. – 2020. – Vol. 4, № 4. – Art. 75. – DOI 10.3390/soilsystems4040075.

254. Runge, M. Physiology and ecology of nitrogen nutrition / M. Runge // *Physiological Plant Ecology*. – 1983. – No. 3. – P. 163–200.

255. Sarkar, K. Polyvinyl alcohol based hydrogels for urea release and Fe (III) uptake from soil medium / K. Sarkar, K. Sen // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 6. – P. 736–744. – DOI 10.1016/j.jece.2018.01.004.
256. Sato, S. Nitrogen recovery and transformation from a surface or sub-surface application of controlled-release fertilizer on a sandy soil / S. Sato, K. T. Morgan // *Journal of Plant Nutrition*. – 2008. – Vol. 31(12). – P. 2214–2226. – DOI: 10.1080/01904160802466646.
257. Sempeho, S. I. Encapsulated urea-kaolinite nanocomposite for controlled release fertilizer formulations / S. I. Sempeho, H. T. Kim, E. Mubofu, [et al.] // *Journal of Chemistry*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–17. – DOI 10.1155/2015/237397.
258. Sempeho, S. I. Meticulous overview on the controlled release fertilizers / S. I. Sempeho, H. T. Kim, E. Mubofu, [et al.] // *Advances in Chemistry*. – 2014. – Vol. 2014. – Art. 363071. – P. 16. – DOI: 10.1155/2014/363071.
259. Senbayram, M. N₂O emission and the N₂O/(N₂O + N₂) product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations / M. Senbayram, R. Chen, A. Budai, [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2012. – Vol. 147. – P. 4–12. – DOI 10.1016/j.agee.2011.06.022.
260. Sharma, M. Dicyandiamide: modern tool for nitrogen management / M. Sharma, N. K. Sankhyan, G. Sharma // *Just Agriculture e-Newsletter*. – 2023. – Vol. 3, № 8. – P. 142–146.
261. Shaviv, A. Advances in controlled release of fertilizers / A. Shaviv // *Advances in Agronomy*. – 2001. – Vol. 71. – P. 1–49.
262. Shaviv, A. Controlled release fertilizers / A. Shaviv // *Proceedings of the IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt, Germany, 28–30 June 2005*.
263. Shcherbak, I. Global meta-analysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen / I. Shcherbak, N. Millar, P. Robertson // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2014. – Vol. 111, № 25. – P. 9199–9204. – DOI: 10.1073/pnas.1322434111.

264. Sikora, J. The impact of a controlled-release fertilizer on greenhouse gas emissions and the efficiency of the production of Chinese cabbage / J. Sikora, A. Szeląg-Sikora, M. Kuboń [et al.] // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 8. – P. 2063. – DOI 10.3390/en13082063.

265. Song, Yu. Development of Slow-Release Fertilizers with Function of Water Retention Using Eco-Friendly Starch Hydrogels / Yu. Song, L. Ma, Q. Duan [et al.] // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, No. 20. – P. 4835. – DOI 10.3390/molecules29204835.

266. Song, L. Global Soil Gross Nitrogen Transformation Under Increasing Nitrogen Deposition / L. Song, Zh. Li, Sh. Niu // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2021. – Vol. 35, No. 1. – DOI 10.1029/2020gb006711.

267. Torres-Oliver, V. Role of nitrogen and nutrients in crop nutrition / V. Torres-Oliver, O. G. Villegas-Torres, M. L. Dominguez-Patino, [et al.] // *Journal of Agricultural Science and Technology B*. – 2014. – Vol. 4. – P. 29–37.

268. Trenkel, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture / M. E. Trenkel. – 2nd ed. – Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. – 163 p.

269. Trenkel, M. E. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture / M. E. Trenkel. – Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 1997. – 156 p.

270. Tufail, M. A. Mediation of gaseous emissions and improving plant productivity by DCD and DMPP nitrification inhibitors: Meta-analysis of last three decades / M. A. Tufail, M. Irfan, W. Umar [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 30, No. 23. – P. 64719-64735. – DOI 10.1007/s11356-023-26318-5.

271. Tufail, M. A. Unraveling the efficacy of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) in reducing nitrogen gases emissions across agroecosystems: A three-decade global data synthesis (1993–2021) / M. A. Tufail, A. Naeem, M. S. Arif [et al.] // *Fuel*. – 2022. – Vol. 324. – P. 124725. – DOI 10.1016/j.fuel.2022.124725.

272. Urea [Электронный ресурс] // IFASTAT — International Fertilizer Association : офиц. сайт. — URL:

<https://www.ifastat.org/supply/Nitrogen%20Products/Urea> (дата обращения: 29.10.2025).

273. Van Cleemput, O. Nitrate and nitrite reduction in flooded gamma-irradiated soil under controlled pH and redox potential conditions / O. Van Cleemput, W. H. Patrick // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1974. – Vol. 6, № 1. – P. 85–88.

274. Vanlauwe, B. Maize yield as affected by organic inputs and urea in the West-African moist savanna / B. Vanlauwe, K. Aihou, S. Aman, [et al.] // *Agronomy Journal*. – 2001. – Vol. 93, № 5. – P. 1191–1199.

275. Versino, F. Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release / F. Versino, M. Urriza, M. A. García // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2019. – Vol. 134. – P. 302–307. – DOI 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.037.

276. Vibelsol [Электронный ресурс] // BASF Agricultural Solutions : офиц. сайт. — URL: <https://agriculture.basf.com/cn/en/Crop-Protection/Vibelsol> (дата обращения: 28.10.2025).

277. Vinther, F. P. Effects of plant residues on crop performance, N mineralisation and microbial activity including field CO₂ and N₂O fluxes in unfertilised crop rotations / F. P. Vinther, E. M. Hansen, J. E. Olesen // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2004. – Vol. 70, № 2. – P. 189–199.

278. Vitousek, P. M. Nitrogen and nature / P. M. Vitousek, S. Hättenschwiler, L. Olander, [et al.] // *Ambio: A Journal of the Human Environment*. – 2002. – Vol. 31, № 2. – P. 97–101.

279. Wang, W. Nitrous oxide emission and fertilizer nitrogen efficiency in a tropical sugarcane cropping system applied with different formulations of urea / W. Wang, G. Park, S. Reeves, [et al.] // *Soil Research*. – 2016. – Vol. 54. – P. 572–584. – DOI 10.1071/SR15314.

280. Wang, Q. The utilization and roles of nitrogen in plants / Q. Wang, S. Li, J. Li, [et al.] // *Forests*. – 2024. – Vol. 15. – P. 1191. – DOI: 10.3390/f15071191.

281. Watson, C. J. Volatilization of ammonia from solid and liquid urea surface-applied to perennial ryegrass / C. J. Watson, R. J. Stevens, R. J. Laughlin, [et al.] // *The Journal of Agricultural Science*. – 1992. – Vol. 119 (2). – P. 223–226.
282. WMO Greenhouse Gas Bulletin / World Meteorological Organization. – 2024. – 10–28 October.
283. Wu, Y. Chemical fertilizer use efficiency and its determinants in China's farming sector / Y. Wu // *China Agricultural Economic Review*. – 2011. – Vol. 3. – P. 117–130.
284. Xiao, Q. Prediction of nitrogen release from sigmoid-type controlled release fertilizers in greenhouse production of strawberry and cucumber / Q. Xiao, X. Fan, X. Ni, [et al.] // *Science China Life Sciences*. – 2017. – Vol. 60, № 9. – P. 1051–1054. – DOI 10.1007/s11427-016-9078-3.
285. Xiaoyu, N. A novel slow-release urea fertiliser: physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism / N. Xiaoyu, W. Yuejin, W. Zhengyan, [et al.] // *Biosystems Engineering*. – 2013. – Vol. 115. – P. 274–282. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2013.04.001.
286. Yamamoto, C. F. Slow-release fertilizers based on urea/urea–formaldehyde polymer nanocomposites / C. F. Yamamoto, E. I. Pereira, L. H. C. Mattoso, [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 287. – P. 390–397. – DOI 10.1016/j.cej.2015.11.023.
287. Yang, Y.-C. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat / Y.-C. Yang, M. Zhang, L. Zheng, [et al.] // *Agronomy Journal*. – 2011. – Vol. 103, № 2. – P. 479–485. – DOI 10.2134/agronj2010.0343.
288. Ye, H. Mu. Degradable polyester/urea inclusion complex applied as a facile and environment-friendly strategy for slow-release fertilizer: Performance and mechanism / H. Mu. Ye, H. F. Li, C. Sh. Wang [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 381. – P. 122704. – DOI 10.1016/j.cej.2019.122704.
289. Yu, X. Release mechanism of a novel slow-release nitrogen fertilizer / X. Yu, B. Li // *Particuology*. – 2019. – Vol. 45. – P. 124–130. – DOI: 10.1016/j.partic.2018.09.005.

290. Zhang, M. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers / M. Zhang, Y. C. Yang, F. P. Song, [et al.] // Journal of Chemical Fertilizer Industry. – 2005. – Vol. 32. – P. 7–12.

291. Zhao, C. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the yield, nitrogen use efficiency, and grain quality of single season late japonica rice / C. Zhao, Z. Gao, G. Liu, [et al.] // Agronomy. – 2023. – Vol. 13(1). – P. 276. – DOI 10.3390/agronomy13010276.

292. Zheng, W. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system / W. Zheng, M. Zhang, Z. Liu, [et al.] // Field Crops Research. – 2016. – Vol. 197. – P. 52–62. – DOI 10.1016/j.fcr.2016.08.004.