

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева»

На правах рукописи

ИВАНОВ РОМАН ГЕННАДЬЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ БИОМОДИФИЦИРОВАННОГО КАРБАМИДА НА
ПРОДУКТИВНОСТЬ ГРЕЧИХИ ПОСЕВНОЙ
ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ В УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОГО НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ
РОССИИ**

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:

доктор сельскохозяйственных наук, доцент

Налиухин А.Н.

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Обзор литературы.....	13
1.1. Народнохозяйственное значение гречихи.....	13
1.1.1. Роль гречихи в продовольственном секторе России	18
1.1.2. Гречиха: вклад в здоровье человека и устойчивость экосистемы	24
1.1.3. Глобальная динамика производства гречихи: агроэкологические и экономические детерминанты	32
1.2. Биологические свойства гречихи, её адаптационные требования к климатическим условиям и оптимизация минерального питания.....	37
1.2.1. Требования культуры к климатическим условиям	41
1.2.2. Требования гречихи к минеральному питанию	44
1.3. Влияние ризобактерий на урожайность сельскохозяйственных культур в агроэкосистеме	49
1.3.1. Воздействие микробных препаратов на агробиохимические параметры почвы и продуктивность агроценозов.....	50
1.3.2. Симбиотические особенности бактерий рода <i>Bacillus</i> в ассоциациях с растениями	58
Глава 2. Объекты, условия и методика проведения экспериментального исследования	61
2.1. Объекты исследования и их характеристика.....	61
2.2. Методика постановки лабораторных и полевых опытов	63
2.3. Метеорологическая характеристика периодов проведения экспериментального исследования.....	71
Глава 3. Результаты исследований.....	76
3.1. Влияние обработки азотных удобрений штаммом <i>B.s. Ч-13</i> на микробиологическую активность и питательный режим дерново- слабоподзолистой легкосуглинистой почвы в посевах гречихи	76
3.1.1. Биомасса почвенных микроорганизмов.....	76
3.1.2. Микробо-опосредованная эмиссия CO ₂ в посевах гречихи на фоне применения биомодифицированных азотных удобрений.....	81
3.1.3. Уреазная активность дерново-слабоподзолистой почвы при применении биомодифицированного карбамида в агроценозе гречихи	86
3.1.4. Динамика содержания нитратного (NO ₃ ⁻) и аммонийного (NH ₄ ⁺) азота в дерново-слабоподзолистой почве под посевами гречихи при применении биомодифицированного карбамида	90
3.2. Влияние биомодифицированной мочевины на морфологические, физиологические показатели растений и качество зерна гречихи.....	96

3.2.1. Прохождение фенологических фаз, полевая всхожесть, сохранность, общая выживаемость растений	96
3.2.2. Прирост сырой биомассы, высота растений, длина междоузлий	102
3.2.3. Влияние биомодифицированной мочевины на показатели развития фотосинтетического аппарата гречихи.....	107
3.2.4. Формирование элементов продуктивности растений гречихи, урожайность и вынос элементов питания с урожаем.....	111
3.2.5. Анализ фенольного профиля растений и технологические качества зерна гречихи	126
3.3. Экономическая эффективность применения биокарбамида при возделывании гречихи посевной на дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почве.....	134
Заключение	138
Предложения производству	141
Список литературы.....	142
Приложения.....	178

Введение

Актуальность работы. Гречиха (род *Fagopyrum* Mill, сем. *Polygonaceae*) — значимая культура для мирового продовольственного обеспечения. Происходит из Азии и культивируется на большинстве континентов, исключая Антарктиду и Австралию. Гречневая крупа, получаемая из гречихи, по биологическим свойствам не уступает другим зерновым и превосходит пшеницу, рожь и ячмень. Гречиха – псевдозерновая культура, богатая рутином, кверцетином и другими биологически активными веществами. Её ценность обусловлена уникальным биохимическим составом зерна и вегетативной массы. Применяется как страховая культура при гибели озимых/яровых посевов, медонос (например, в Рязанской области, Башкортостане, Алтайском крае) и природный регулятор: корневая система подавляет рост сорняков за счет аллелопатических свойств и снижает токсичность алюминия в почве.

Развивающиеся страны усиливают внимание к биологизации земледелия, включая рациональное использование удобрений. Азотные удобрения – ключевой элемент интенсивного сельского хозяйства, их потребление увеличивается в связи с ростом населения (до 9 млрд. к 2050 г.), особенно в Азии (КНР). Чрезмерное внесение N-удобрений вызывает экологические проблемы: засоление почв, эвтрофикацию водоёмов, рост выбросов N₂O, разрушающего озоновый экран Земли. Соответственно, преодоление экологических рисков требует оптимизации их внесения для повышения эффективности минерального питания растений.

Актуальной представляется задача обеспечения небобовых культур биологическим и минеральным азотом. Хотя ранее считалось, что гречиха не нуждается в минеральных удобрениях из-за её особенностей, полевые опыты, проведенные в разное время, подтверждают их эффективность. Перспективное направление – использование ризобактерий (*PGPR*), улучшающих доступность минеральных элементов, синтезирующие

фитогормоны, и в этой связи приводящие к стимулированию роста растений. Особый интерес представляют бактерии рода *Bacillus sp.*, на основе которых создаются микробные удобрения, оптимизирующие взаимодействие в системе «почва-растение-удобрение». Исследования гречихи в Московской области ограничены, особенно в аспектах минерального питания и адаптации к агроклиматическим условиям региона, что связано с её экономически рискованным возделыванием из-за нестабильной урожайности. Актуальность работы определяется двумя направлениями: изучение влияния азотных удобрений, модифицированных культурой *B.s. Ч-13*, на продуктивность гречихи в условиях Нечерноземья, и разработка агротехнических методов оптимизации азотного питания небобовых культур для повышения эффективности применения минеральных удобрений.

Степень разработанности темы исследования. В последние годы возрос интерес к биоудобрениям, способным улучшить питательный режим растений, особенно к азотным. Изучением действия биоудобрений на различных зерновых культурах ученые занимаются достаточно длительное время. Исследования проведены по установлению действия биопрепаратов на: пшенице (*Хамова О.Ф., Шулико Н.Н., Тукмачева Е.В., 2022; Лана В.В. и др., 2020*), ячмене (*Налиухин А.Н., 2022; Гамзаева Р.С., 2016; Кожемяков А.П., Проворов Н.А., Завалин А.А., 2004*), горохе (*Алешин М.А., Завалин А.А., 2023; Ситало Г.М., 2015*), кукурузе (*Ригер А.Н., 2014; и др.*), сое (*Сырмолот О.В., 2013*), люпине (*Титова В.И., Судакова Т.Е., 2021*), рисе (*Илюшко М.В., Литвиненко В.Н., 2013*), овсе (*Налиухин А.Н., 2023; и др.*). Следует подчеркнуть, что проведенные исследования преимущественно сфокусированы на оценке эффективности предпосевной бактериализации семян, тогда как анализ взаимосвязи между урожайностью культуры и применением удобрений, инокулированных микроорганизмами рода *Bacillus sp.*, остается недостаточно изученным. Особенности ферментативной активности почв нашли своё отражение в работах многих авторов (*Пронько В.В., и др., 2009; Нарушева Е.А., 2012; Чевердин А.Ю., Чевердин Ю.И., Турусов В.И., 2019;*

Herbien S.A., Neal J.L., 1990; Li Z., et al., 2019; Contersini F.J., Melo R.R., et al., 2018; Пуртова Л.Н. и др., 2022; Tabatabai M.A., 1994; Caldwell B.A., 2005., et al.), но исследований, проведенных на дерново-подзолистых почвах в литературе недостаточно. Повышению продуктивности растений гречихи в агроклиматических условиях Московской области в большинстве своём связаны с применением регуляторов роста растений, а не минеральных удобрений (*Л. Д. Прусакова, О. С. Мишина, С. Л. Белоухов, 2013; А.В. Коротков, А.Н. Фесенко, В.В. Вакуленко, 2010*), в том числе повышение продукции фенольных соединений гречихой (*Н.В. Загоскина, В.В. Казанцева, А.Н. Фесенко, 2018; И.В. Глотова и др., 2016; Park C.H., 2017; Naveed M., et al., 2018; И.В. Горькова, 2019*). Влиянию азота на различные зерновые культуры посвящены работы как отечественных (*Налухин А.Н., Новиков Н.Н., 2023; Завалин А.А., и др., 2015; Сычев В.Г., Шафран С.А. 2018, 2020 и др.*), так и зарубежных авторов (*Jan M.T., et al., 2009; Li. Z., et al., 2019; Altomare C., Tringovska I., 2011*). Эффективность применения азотных удобрений на гречихе обозначены во многих работах (*Zhao Z.B., et al., 2020; Lui C., et al., 2013; Wang C., et al., 2015; Arrington L.B., Shive J.W., 1935; Bai L., Zhang X., Liu B., et al., 2022*). Проведенный анализ научных источников свидетельствует о недостаточной изученности влияния биомодифицированных азотных удобрений на питание гречихи в условиях дерново-подзолистых почв центральной зоны Нечерноземья.

Цель исследования: изучить влияние биомодифицированного карбамида (*шт. B.s. Ч-13*) на урожайность и качество зерна гречихи посевной, а также биологические свойства дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почвы.

Объект исследования: карбамид $((\text{NH}_2)_2\text{CO})$, гранулы которого инокулированы споровой формой шт. *B.s. Ч-13*.

Для решения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Оценить влияние традиционного и биомодифицированного карбамида на биологическую активность почвы (биомассу микроорганизмов,

эмиссию CO₂, активность уреазы), и содержание минерального азота (N-NH₄ и N-NO₃) в почве в агроценозе гречихи;

2. Изучить влияние карбамида и его биомодификации на морфофизиологические показатели растений гречихи: содержание фотосинтетических пигментов (*ChL.a*, *ChL. b.*, *Carot.*) в листьях, и рутина в соломе гречихи исследуемых сортов;

3. Изучить влияние возрастающих доз карбамида и его биомодификации на урожайность зерна гречихи посевной и его показатели качества (сырой белок, сырой жир, массу 1000 семян, пленчатость);

4. Определить действие различных доз азотного удобрения и его биомодификации (*B.s. Ч-13*) на вынос азота, фосфора и калия (NPK) с основной и побочной продукцией, а также на удельный вынос NPK, коэффициент использования азота из удобрений.

5. Оценить экономическую эффективность применения биомодифицированного карбамида (шт. *B.s. Ч-13*) при культивировании гречихи на дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почве.

Научная новизна. Выявлена сортоспецифичность реакции гречихи на биомодифицированные азотные удобрения. Впервые показано, что биомодификация карбамида позволяет получить дополнительную прибавку урожайности зерна сорта Дикуль при внесении N₃₀ – 3,1 ц/га, N₆₀ – 0,9 ц/га; на сорте Даша достоверную прибавку обеспечивает только доза N₆₀ – 1,9 ц/га. Доказано, что биомодификация существенно увеличивает отдачу от 1 кг азота карбамида на сорте Дикуль на 10,3 кг/кг при дозе N₃₀ и 1,6 кг/кг при внесении N₆₀ в эквивалентных дозах. На сорте Даша применение биомодифицированного карбамида позволяет расширить диапазон оптимальных доз в интервале 30-60 кг N/га, обеспечивая окупаемость на уровне 8,2-8,3 кг/кг. Азотные удобрения повышают массу 1000 семян и пленчатость зерна. Установлено, что применение биомодифицированного карбамида обеспечивает максимальный прирост биомассы микроорганизмов в почве, что может стать основой для новых агротехнологий в умеренно-

континентальном климате. Установлена связь между применением биомодифицированного карбамида и улучшением питательного режима дерново-подзолистых почв: выявлено положительное влияние на содержание нитратов (NO_3^-), аммония (NH_4^+) и активность уреазы, что ранее не было системно изучено в контексте выращивания гречихи. Выявлено, что биомодификация повышает содержание рутина в соломе до – 60-70 мг/г, в лузге - 9-12 мг/г у обоих изучаемых сортов. Получены новые данные об удельном выносе азота, фосфора и калия с 1 т зерна гречихи (с учётом побочной продукции) для изучаемых сортов, который при дозе N_{60} (на калийном фоне) составляет для сорта Дикуль – $\text{N}_{60}\text{P}_{30}\text{K}_{100}$ и сорта Даша – $\text{N}_{70}\text{P}_{30}\text{K}_{110}$.

Практическая и теоретическая значимость. Полученные экспериментальные данные вносят определенный вклад в изучение проблемы минерального питания растений гречихи различных сортов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки приёмов возделывания гречихи в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России. Для практического использования разработана технология применения биомодифицированных азотных удобрений для основного внесения в почву под растения гречихи двух сортов: Дикуль и Даша. Показано, что в условиях Центральной части Нечернозёмной зоны России при выращивании гречихи сортов Дикуль и Даша на зерно рекомендуется применять карбамид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, обработанный культурой *B.s. Ч-13* с предпосевным внесением в почву в дозе 30-60 кг/га в сочетании с калийным удобрением (K_2SO_4) в дозе K_{60} , обеспечивая урожайность на уровне 12-16 ц зерна/га. В работе представлены рекомендации по оптимизации доз внесения удобрений для повышения их эффективности в агроценозе гречихи. Исследование формирует теоретическую базу для перехода от эмпирического подхода в агрохимии к системно-экологическому, где почвенная микробиота становится полноправным элементом моделей управления плодородием.

Полученные результаты могут быть интегрированы в учебные курсы по агрохимии, почвоведению и устойчивому сельскому хозяйству.

Методология и методы исследований. Полевые двухфакторные опыты на сортах гречихи Даша и Дикуль были заложены на агробиостанции ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет» (геогр. координаты: 55.796980, 39.012410 (Московская область, г. Орехово-Зуево) на дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почве. Общая площадь делянок - 2 м², учетная площадь – 1 м². Повторность опытов - четырёхкратная (прил. А - Д), размещение – систематическое. Агрохимический анализ почвы, растений был проведён по действующим методикам и ГОСТам. Дисперсионный анализ – по модели двухфакторного дисперсионного анализа, выявление закономерностей – с использованием корреляционных и регрессионных методов. Закладка полевых опытов проведена согласно основным методическим требованиям (Доспехов, 1985).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение биомодифицированного карбамида в агроценозе гречихи на дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почве увеличивает микробную биомассу почвенных микроорганизмов (Смб), интенсифицирует микробо-опосредованное почвенное дыхание и уреазную активность;

2. Повышение доз азота под сорта Дикуль и Даша увеличивает синтез фотосинтетических пигментов в листьях растений гречихи, сохраняя при этом стабильное соотношение между *Chl.a/Chl.б.* в диапазоне 2 – 2,5/1, увеличивая при этом содержание каротиноидов (*Carot.*) что по нашему мнению обеспечивает защиту фотосистем от окислительного стресса;

3. Биологическая модификация гранул карбамида культурой В.с. Ч-13 позволяет получить дополнительную прибавку урожайности зерна гречихи: по сорту Дикуль: N_{30m} – 3,1 ц/га, N_{60m} – 0,9 ц/га, по сорту Даша N_{60m} – 1,9 ц/га, обеспечивая окупаемость 1 кг азота 21,3-11,9 кг и 8,2 кг зерна соответственно;

4. Внесение карбамида, модифицированного *B.s. Ч-13*, увеличивает содержание и хозяйственный вынос NPK с основной и побочной продукцией гречихи, а также удельный вынос на 1 т зерна с учётом побочной продукции, который в среднем составляет для сорта Дикуль – N₆₀P₃₀K₁₀₀ и сорта Даша – N₇₀P₃₀K₁₁₀.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты и выводы выполненной диссертационной работы докладывались на Всероссийской научной конференции «Экология и природопользование: тенденции, модели, прогнозы, прикладные аспекты» (г. *Рязань*, 27 марта 2024 г.), IX Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием «Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий» (г. *Новосибирск*, 20 декабря 2024 г.), Международной научно-практической конференции в рамках мероприятий «Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации», 300-летия Российской академии наук (г. *Краснодар*, 24-25 апреля 2024 г.), 58-ой Всероссийской конференции с международным участием молодых ученых, специалистов-агрохимиков и агроэкологов (г. *Москва*, 29 ноября 2024 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение инновационного развития сельского хозяйства к 110-летию со дня рождения видного государственного и общественного деятеля, первого директора Дагестанского НИИСХ Кисриева Фрида Гасановича (25-26 апреля 2024 г., г. *Махачкала*), VII Международной научно-практической конференции «Приоритетные векторы развития промышленности и сельского хозяйства» (г. *Макеевка*, 18 апреля 2024 г.), Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Смирнова Б.А. «Актуальные проблемы и перспективы развития современного земледелия» (3 апреля 2025 г. г. *Ярославль*), XV Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт,

проблемы и пути их решения» (25 июня 2025 г., г. Ульяновск), на Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летнему юбилею основоположника агрохимической науки академика Дмитрия Николаевича Прянишникова (12-14 ноября 2025 г., г. Москва). Степень достоверности результатов проведенного исследования подтверждается большим количеством выполненных экспериментов. Полевые, лабораторные опыты проведены в 2023-2025 гг. в четырехкратных повторностях по каждому варианту опыта. Статистическая обработка выполнена с помощью программ Excel 2021. Авторы используют достаточный математический инструментарий для моделирования проведенных экспериментов (двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями, корреляционно-регрессивный анализ). Степень достоверности экспериментальных данных и результатов их обработки подтверждена использованием классических методов агрохимического исследования почв и растений.

Личный вклад соискателя. Автор самостоятельно выполнил полевые, лабораторные опыты, химический анализ почвы и растений, провел статистическую обработку полученных данных, подготовил материалы для выступления на конференциях, написание статей, и итоговое оформление диссертации.

Публикации результатов исследований. По теме работы опубликовано 15 научных статей, в том числе 3 статьи – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 2 статьи в МБД, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 182 страницах, состоит из введения трёх глав основной части: обзор литературы, характеристики объектов и методов исследования, результатов исследования, заключения, предложений производству, списка литературы, включающего 332 источника, в том числе 210 на иностранном языке, 5 приложений. Работа включает 12 рисунок и 26 таблиц.

Благодарности. Соискатель выражает благодарность научному руководителю заведующему кафедрой агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева д.с.-х.н. Налиухину А.Н. за руководство работой, д-р.с.-х.наук, профессору Белопухову С.Л., к.с.-х.н., доценту Мишиной О.С. за идеи, наставление и помощь, президенту ГГТУ к.ф.н., доценту Юсуповой Н.Г., за вклад в подготовку исследования, д. фарм. наук, профессору Ханиной М.А., за возможность исследования рутина. Особую благодарность адресую супруге Кузнецовой Д.Д. за стойкость, понимание и моральную поддержку.

Отдельные слова благодарности — моим родителям за поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

Глава 1. Обзор литературы

1.1. Народнохозяйственное значение гречихи

Гречиха (*Fagopyrum Mill.*, сем. *Polygonaceae*) – крупяная культура, обладающая уникальными агрономическими и биохимическими характеристиками, обусловленными её происхождением из субтропических регионов Восточной Азии (Китай). Широкое распространение в умеренных широтах связано с адаптивностью к различным почвенно-климатическим условиям. Культура имеет полифункциональное значение: пищевое (источник белка, рутина), фармацевтическое (сырьё для БАД) и биотехнологическое (фиторемедиация). Актуальность исследований связана с поиском методов оптимизации возделывания для расширения ареала и повышения продуктивности в условиях лимитирующих факторов.

Современные таксономические исследования указывают на Восточную Азию как центр происхождения культурной гречихи. Первые естественные популяции дикорастущего предка (*F. esculentum ssp. ancestrale*) были идентифицированы в 1990 г. в провинции Юннан (Китай) (*Ohnishi, 1991*). К 2009 г. описано 40 популяций диких форм, сосредоточенных преимущественно в долине реки Донжий (Китай), где они занимают ареал протяженностью 150 км (*Ohnishi, 2010*). Генетическое разнообразие диких таксонов подтверждает гипотезу азиатского происхождения (*Кротов, 1975; Campbell, 1997*), однако альтернативные данные свидетельствуют о возможной аутохтонности западного Тибета (Индия) на основании находок морфологически варьируемых форм (*Комаров, 1938; Столетова, 1958*). Ключевым аргументом в пользу китайской гипотезы стало открытие в провинции Юннан подвида *F. esculentum ssp. ancestrale* – прямого предка культивируемой гречихи (*Kishima et. Al., 1995; Ohnishi, Matsuoka, 1996*), что подтвердило теорию Н.И. Вавилова о восточноазиатском центре доместикировки вида.

Эволюция рода *Fagopyrum* характеризуется отсутствием чёткой филогенетической преемственности между современными крупносемянными видами, что объясняется предполагаемым вымиранием промежуточных таксонов (Фесенко И.Н., Фесенко Н.Н., 2010). Ключевым адаптационным механизмом *F. esculentum* стала рекомбинантная генетическая система, обеспечившая его экологическую пластичность, что проявилось в способности мигрировать из высокогорных районов в долины и успешно распространяться вплоть до арктических зон (Фесенко И.Н., Фесенко Н.Н., 2010).

Гречиха возделывается в глобальном масштабе, демонстрируя агроэкологическую адаптивность к маргинальным почвам и экстремальным климатическим условиям. В регионах Африки (Танзания, ЮАР) и Южной Америки (Бразилия) культура ценится за свои диетические свойства, тогда как в Японии и странах Европейского союза она классифицируется как компонент функционального питания, способствующий профилактике метаболических и сердечно-сосудистых патологий (Фесенко и др., 2017; Ставропольский, Муталимов, 2019). Франция занимает лидирующие позиции в Западной Европе по урожайности (31,9 тыс. га), а Италия активно использует гречиху для ревитализации депрессивных аграрных зон (Брунори и др., 2010). В Швейцарии, несмотря на исторический спад производства в 1950 – х годах, с 2014 г. наблюдается возрождение коммерческого выращивания на основе импортного сырья (Lustenberger R., F. Escher et al., 1977; Strahm et al., 2018). Страны СНГ (Беларусь, Казахстан) сталкиваются с низкой рентабельностью производства гречихи вследствие нестабильной урожайности (Лазаревич, 2021; Коберницкий и др., 2022). Мировое лидерство в производстве сохраняют Россия и Китай, где культура занимает стратегическое положение в системе растениеводства. Ключевым фактором глобального распространения гречихи остаётся её способность к росту на бедных почвах, что подтверждается успешной интродукцией в горные

районы Апеннин и Альп (*Brunori et al., 2005; Н.В. Парахин, 2010; Strahm et al., 2019*).

Гречневая крупа выделяется высоким нутритивным профилем, занимая второе место среди круп по содержанию липидов (после овса и проса) и уступая по уровню белка только бобовым (*Агапкин, 2017; Meng et al., 2019; J.L. Dong et al., 2019*). Её белковая фракция включает 18 аминокислот с доминированием лизина и аргинина, треонина и валина (*Liwei, 2002; Казакова, Карпиленко, 2005*), что обеспечивает повышенную биологическую ценность. Содержание белка в муке варьирует от 8,5-18,9% в зависимости от сорта (*Krkoskova, Mrazova, 2005*). В сравнении с пшеницей, зерно гречихи содержит на 20-30% больше протеинов, жиров и растворимых пищевых волокон при сниженной доле углеводов (*Маркова, Сидорова, 2022*). Данные характеристики позволяют классифицировать гречиху как функциональный продукт, обладающей доказанным позитивным влиянием на метаболические процессы и качество жизни (*Дзахмишева, Хоконова, 2021*). Уникальные фагопиритолы обеспечивают долгосрочную стабильность белков, усиливая потенциал гречихи как стратегической сельхозкультуры (*Павловская и др., 2006*)

Белок гречихи демонстрирует выраженную биологическую активность, включая ингибирование липогенеза, активацию антиоксидантных ферментов (SOD, CAT, GSH-Px) и противоопухолевые эффекты (*Ruan, Chen, 2008*). Его гиполипидемическое действие превосходит соевый аналог, снижая уровень холестерина в плазме и риск холелитиаза (*Kreft, Germ et al., 2022*). Уникальные полипептиды культуры – ингибиторы протеаз, аллергены, тиаминсвязывающие белки – привлекают внимание как перспективные биокомпоненты функционального питания (*Fu et. Al., 2009; Wang et al., 2010*). Гречиха характеризуется высоким содержанием рутина – доминирующего флавоноида, обладающего гипохолестеринемическим, антиоксидантным и терапевтическим потенциалом в лечении диабета, гипертонии и сердечно-сосудистых патологий (*Zou et al., 2009*). Рутин или его акликон кверцетин

демонстрирует капилляростабилизирующее, радиопротекторные и кардиопротекторные свойства, усиливая абсорбцию аскорбиновой кислоты (Березов, Коровкин, 1998; Машковский, 2005). Кислотный гидролиз рутина остаётся ключевым методом получения кверцетина (Каримова и др., 2016). Данные биоактивные соединения определяют фармацевтическую ценность вида, позиционируя его как перспективное сырьё для производства лекарственных средств (Апаева, Ямансарова и др., 2014).

Рутин и его агликон кверцетин проявляют выраженную фармакологическую активность, включая способность кверцетина преодолевать гематоэнцефалический барьер и накапливаться в церебральных тканях (Kawabata et al., 2015; Henna et al., 2020). In vitro - исследования подтверждают ингибирующее действие рутина, кверцетина и других метаболитов на пролиферацию опухолевых клеток (Kayashita et al., 1999; Guo et al., 2010; Kreft et al., 2013). Фенольные соединения гречихи демонстрируют антипролиферативный эффект в отношении клеточных линий рака молочной железы и аденокарциномы лёгких (Li et al., 2017; Li et al., 2022). Селекционные программы акцентированы на создании сортов с повышенным содержанием рутина, обеспечивающего адаптацию к стрессовым условиям и формирующего основу для устойчивого возделывания (Никитина, Борцова, 2018). Синтез рутина в гречихе регулируется агрохимическими методами: применение регуляторов роста (Люрастим, Модус, БИОС) увеличивает его содержание в плодах на 56% (Коротков и др., 2011).

Гречиха демонстрирует сортовую и географическую зависимость урожайности и накопления рутина, что требует селекции высокопродуктивных генотипов с повышением содержанием флавоноидов (Kitabayashi et al., 1995; Oomah, Mazza, 1996; Brunori, Kadyrov, 2007). Оптимизация агротехник, включая системы удобрений, стимулирует синтез рутина через регуляцию физиолого-биохимических процессов. Культура лидирует по накоплению витаминов (тиамин, рибофламин, токоферол) и

минералов (до 3% от массы зерна), с максимальной концентрацией макро- и микроэлементов в зародыше (7-10%) и оболочках (*Танашкина и др., 2019; Марьин и др., 2016; Зверев, 2007; Скирухин, 2008*).

Гречневая крупа содержит органические кислоты (лимонная, малеиновая, щавелевая), улучшающее пищеварение, витамины группы В, РР, Р и рутин, критически важных для физиологических процессов (*Савицкий, 1970*). Как источник клетчатки и резистентного крахмала с низким гликемическим индексом, что обуславливает её диетическую ценность (*Takahama et al., 2011*). Несмотря на эволюционную адаптацию, *F. esculentum* остаётся культурой с низкой урожайностью, что связано с агротехническими факторами (недостаточным учетом биологических особенностей), физиологическими ограничениями (израстанием побегов при внесении удобрений, ведущих к полеганию), генетической спецификой (гетеростилией и дефектами эмбриогенеза, затрудняющими селекцию) (*Савицкий, 1970; Фесенко, 1983; Plazek, 2023*). Ключевые направления исследования включают: селекция – ограничение вегетативного роста для повышения устойчивости, корреляция метеоусловий с накоплением флавоноидов, зависимость урожайности от биомассы и архитектоники растений (*Фесенко и др., 2015; Магафурова, Хуснутдинов, 2022; Brunori et al., 2005; Sokoloff et al., 2023; Иванов Р.Г., Налухин А.Н., 2025*).

Повышение урожайности гречихи при сохранении её технологических качеств остаётся актуальной задачей (*Иванов, Налухин, 2024*). Исследования подтверждают, что азотно-фосфорные удобрения, преимущественно влияют на урожайность, а азотные – на качество зерна (повышение белковости на 1-3% при дозах N₆₀-N₉₀) (*Ягодин и др., 1989; Броваренко, 1981; Городний, 1976*). Семенная продуктивность зависит от развития главных и боковых побегов первого порядка (*Сальников, 1988*). Метеофакторы (засуха, температурный фактор) снижают урожайность, что требует адаптивных агротехнологий (*Siracusa et al., 2017; Gavric et al., 2018*). Народно-хозяйственная ценность гречихи связана с её уникальными свойствами:

способностью усваивать труднорастворимые фосфаты, улучшая доступность фосфора для последующих культур (*Прянишников, 1929*), и широким применением в пищевой и фармацевтической отраслях благодаря биохимическому составу. Приоритетные направления исследований включают оптимизацию доз и систем удобрений для баланса урожайности и качества зерна, а также разработку устойчивых к стрессам агротехнологий с учётом роли вегетативных структур.

1.1.1. Роль гречихи в продовольственном секторе России

С XV века гречиха стала важной экспортной культурой в России благодаря своей биологической адаптивности (*Важов, 2013*). Она улучшает почву, снижает заболеваемость последующих культур корневыми гнилями и подавляет сорняки, такие как овсюг и пырей, что способствует повышению урожайности сельскохозяйственных растений (*Новиков, 2012*). Культура также интегрируется в агросистемы, усиливая фитосанитарный потенциал и взаимодействие с животноводством и пчеловодством (*Зюкин, 2014; Марченко, 2019*). Такая интеграция создает устойчивый агроэкологический цикл, повышая рентабельность обоих направлений. Ключевые зоны возделывания: Центральное Черноземье, Юг Нечерноземья, Поволжская лесостепь, Предгорья Северного Кавказа, Урал и Алтай (*Зотиков, 2010 и др., 2010*). Алтайский край занимает более 40% российских посевов гречихи. Россия производит половину мирового урожая этой культуры, полностью обеспечивая внутренние потребности (*Тимошенко, 2020*), что подчёркивает её стратегическую роль в продовольственной безопасности страны.

Производство сельхозкультур, особенно зерновых, напрямую влияет на экономику и продовольственную безопасность России (*Карпенко, Антонцев, 2018*). Ключевые направления развития включают: создание высокопродуктивных сортов с улучшенными товарными качествами и оптимизацию объёмов зерна для внешних рынков и внутренних нужд (*Чистяков, 2014; Груздев, Генералов, 2017*). Гречиха, как стратегическая

культура, обладает значительным экспортным потенциалом, что усиливает её роль в решении задач импортозамещения и укреплении позиций России на мировом агрорынке. Интенсификация агротехнологий способствует росту урожайности в российском растениеводстве (Зюкин и др., 2023). Однако, гречиха отличается нестабильной урожайностью из-за чувствительности к почвенно-климатическим условиям, уровню минерального питания, агротехническим приёмам (Иванов, Налиухин, Кузнецова, 2024).

По данным официальной статистики Росстата, в 2023 году посевные площади под основные сельскохозяйственные культуры увеличились в среднем на 9,4% по сравнению с 2022 годом. В частности, посевные площади пшеницы выросли на 256 тыс. га (0,9%), ржи — на 60 тыс. га (5,7%), ячменя — на 0,1%, овса — на 11,1%, проса — на 61 тыс. га (25,7%), а гречихи — на 147 тыс. га (12,9%). Если сравнивать данные 2023 года с 2010 годом, то можно увидеть, что посевные площади под гречиху увеличились на 206 тыс. га (19,1%), под пшеницу — на 3146 тыс. га (11,8%), а под ячмень — на 773 тыс. га (10,7%). В то же время посевные площади под другие культуры сократились: под рожь — на 923 тыс. га (52,5%), под овёс — на 992 тыс. га (34,2%), а под просо — на 223 тыс. га (42,8%) (табл. 1).

Таблица 1

Динамика посевных площадей в Российской Федерации, отводимых под гречиху (2010-2023 гг.), тыс. га (по данным Росстата, 2023)

Год	S	Абсолютный прирост		Темп роста		Темп прироста		Содержание 1% прироста	
		Ц*	Б**	Ц	Б	Ц	Б	Ц	Б
2010	1080	-	-	100	100	-	-	-	1080
2017	1692	612	612	156,6	156,6	56,6	56,7	10,8	1692
2018	1045	-647	-35	61,7	96,7	-38,2	-3,3	16,2	1045
2019	811	-234	-269	77,6	75,0	-22,4	-24,9	10,5	811
2020	873	62	-207	107,6	80,8	7,7	-19,2	8,1	873
2021	981	108	-99	112,3	90,8	12,4	-9,2	8,7	981
2022	1139	158	59	116,1	105,5	16,1	5,5	9,8	1139
2023	1286	147	206	112,9	119,1	13,0	19,1	11,4	1286

*Ц – цепной механизм (год, следующий за предыдущим), **Б – базисный механизм (2010 г.)

Анализ исторических данных об урожайности сельхозкультур помогает лучше понять реализацию их биологических особенностей в различных условиях произрастания. Из-за сокращения обрабатываемых земель традиционные методы уже не обеспечивают высокую урожайность, поэтому нужны инновационные подходы, включая аналитику больших данных. Исследования (*Sagar, Cauvery, 2018; Basso, Liu, 2019*) подтверждают, что анализ больших данных улучшает точность прогнозов урожайности.

Урожайность гречихи остаётся относительно низкой, при этом её показатели не демонстрируют резких колебаний в отличие от других зерновых культур, таких как пшеница, рожь, ячмень, овёс и просо. Для преодоления сложившегося плато в урожайности необходимы внедрение инновационных агротехнологий и выведение новых сортов этой культуры.

Максимальная урожайность гречихи отмечена в 2020 г. (10,9 ц/га), минимальная урожайность наблюдается в 1991 г. (4,7 ц/га). Урожайность гречихи в целом по России возрастает: за последние годы в РФ фиксируется максимальная урожайность культуры. В первую очередь возрастающая тенденция связана с внедрением в сельскохозяйственную практику детерминантных сортов. Увеличение урожайности гречихи за исследуемый период составляет 130% или 6,1 ц/га (рис. 1).

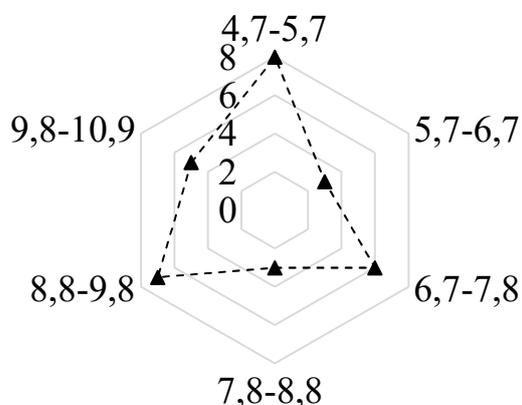


Рисунок 1. Частота встречаемости урожайности гречихи (1990-2022 гг.) (по данным Росстата)

Примечание: 4,7-5,7 ц/га (1991, 1993, 1995, 1996, 1994, 2001, 2002, 1998), 5,7-6,7 ц/га (1999, 2010, 1992 гг.), 6,7-7,8 (1997,2000, 2005, 1990, 2004, 2012 гг.), 7,8-8,8 (2006, 2003,2007 гг.), 8,8-9,8 ц/га (2009, 2008, 2013, 2014, 2011, 2015 гг.), 9,8 – 10,9 ц/га (2019, 2021, 2017, 2016, 2020 гг.).

Исследования показывают, что урожайность ячменя зависит от влажности и применения удобрений, повышая выход продукции на 15-18% (Гаева, 2017), а генетическое сходство пшеницы и ячменя открывает возможности для селекции высокопродуктивных сортов (Nadolska-Orczyk A. et al., 2017). В условиях необходимости увеличения производства продовольствия для растущего населения (Saeed F. Et al., 2023) овёс рассматривается как экологичная альтернатива животным продуктам, чья урожайность и питательная ценность могут быть улучшены за счет азотных удобрений (Allwood et al., 2021; Kamal, 2022). В этом контексте особую актуальность приобретает изучение способов повышения продуктивности гречихи, чьё текущее «плато» урожайности требует внедрения инновационных агротехнологий и новых сортов.

Нечерноземье — сельскохозяйственный и промышленный район в европейской части России. Он объединяет несколько экономических районов, включая Северо-Западный, Северный и Центральный. Центральный экономический район Нечерноземья включает Брянскую, Владимирскую, Ивановскую, Калужскую, Костромскую, Московскую области, Москву, Орловскую, Рязанскую, Смоленскую, Тверскую, Тульскую и Ярославскую области.

В Брянской области посевные площади под гречиху варьировались от 2,9 тыс. га (2020 г) до 7,8 тыс. га (2022 г.), а урожайность – от 8,4 ц/га (2021 г. до 16,1 ц/га) (2022 – 2023 гг.). Ивановская и Калужская области выделяли под культуру менее 1 тыс. га, с урожайностью до 9,5 ц/га. В Московской области посевные площади стабильно составляли 0,2 тыс. га, но урожайность снизилась с 8,6 ц/га (2021 г.) до 5,3 ц/га (2023 г.). Основные площади сосредоточены в фермерских хозяйствах, что подчеркивает потенциал для внедрения инновационных агротехнологий.

Орловская область лидирует по масштабам: посевы достигали 60,8 тыс. га (2023 г.) при урожайности до 15,5 ц/га (2020 г.). Рязанская и Смоленская области демонстрируют рост: в Рязанской урожайность выросла с 9,6 ц/га (2020), до 17,8 ц/га (2023 г.), а площади – с 4,3 до 7,1 тыс. га; в Смоленской области урожайность увеличилась до 13,6 ц/га (2023 г.), а посевы до 10,2 тыс. га. (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ урожайности гречихи в регионах Центрального Нечерноземья, ц/га (по данным Росстата)

Регион РФ (область)	Урожайность, ц/га				Средняя урожайность, ц/га
	2020	2021	2022	2023	
Рязанская	9,6	12,9	14,6	17,8	13,7
Брянская	12,6	8,4	16,1	16,1	13,3
Орловская	15,5	9,4	13,0	15,0	13,2
Тульская	13,2	7,8	14,5	14,2	12,4
Смоленская	10,4	9,2	11,8	13,6	11,2
Калужская	9,5	9,1	7,2	7,1	8,3
Ивановская	8	7,3	9,2	7,4	7,9
Московская	0	8,6	8,8	5,3	7,6
Средняя урожайность, ц/га	9,8	9,08	11,9	12,0	11,0

Примечание: САТ °С (для Рязанской области 2200-2300, для Брянской области – 2150-2450, для Орловской области 2225, для Тульской области 2100 – 2350, Смоленская область 1900 – 2200, Калужской – 2181, Ивановской 2000, Московской области – 1800 – 2200). Зосадков, мм (Рязанская область – 400 – 600, Брянская область – 560 – 640, Орловская область – 400-410, Тульская область – 555-665, Смоленская область – 332, Калужская область – 600, Ивановская область – 300-250, Московская область – 250 – 270).

Гречиха – важная сельскохозяйственная культура, а её урожайность в регионах Центрального Нечерноземья демонстрирует значительные различия. Наименьшая урожайность зафиксирована в Московской области – 7,56 ц/га, что на 32-44% ниже показателей регионов – лидеров. Рязанская область занимает первое место по продуктивности культуры, несмотря на ограниченные посевные площади.

В период с 2020 г. по 2023 г. урожайность гречихи демонстрировала разнонаправленную динамику в регионах Центрального Нечерноземья. Регионы с ростом урожайности за счет разных факторов: Рязанская, Брянская области, регионы со снижением урожайности: Орловская и Калужская

области, регионы с противоречивой динамикой: Тульская и Смоленская области. Рязанская область показала рост урожайности на 31,9% ($In.c. = 1,32$). Индекс фиксированного состава составил 1,3212 (+32,1% за счет продуктивности), а индекс структурных сдвигов – 1,0064 (+0,6% за счет изменения посевных площадей), Средняя урожайность за 2023 г. – 4,9 ц/га, при базисном уровне – 3,69 ц/га. Брянская область увеличила урожайности на 7,6% ($In.c. = 1,0763$). Несмотря на снижение продуктивности (-0,7%, $If.s. = 0,9935$), расширение площадей (+8,3%, $Ic.c. = 1,0834$) обеспечило рост. Средняя урожайности 6,08 ц/га. В Орловской и Тульской областях негативное влияние оказали структурные и изменения посевных площадей ($I c.c. < 1$), Калужская и Ивановская области столкнулись с системным снижением продуктивности ($If.s. < 1$).

Несмотря на то, что Московская область демонстрирует наименьшую урожайность гречихи в регионе (7,6 ц/га за 2020-2023 гг.), её исключение из расчета индексом обусловлено неполнотой данных (отсутствие статистических показателей за 2020 год). При этом даже без учета структурных сдвигов и продуктивности абсолютные значения урожайности в Московской области остаются критически низкими на фоне других регионов. Например, в 2023 г. её урожайность была в 1,6 раза ниже, чем в Брянской области (6,08 ц/га), и почти в 2 раза ниже, чем в Тульской области (11,4 ц/га). К основным причинам низкой урожайности гречихи в Московской области можно отнести: недостаток макроэлементов, некорректное соотношение и применение удобрений и др.

Для разрешения проблемы необходимо адаптировать систему удобрений с учётом специфики гречихи. Этот подход позволит выявить, является ли низкая урожайность следствием почвенных особенностей или результатом неоптимального управления минеральным питанием, что особенно важно для регионов с неблагоприятным климатом.

1.1.2. Гречиха: вклад в здоровье человека и устойчивость экосистемы

Современные научные исследования демонстрируют растущий интерес к изучению полезных свойств различных частей гречихи (зерна, листьев, лузги) для сохранения здоровья человека. Многочисленные исследования подтверждают, что употребление гречневой крупы оказывает значительный положительный эффект на организм (*Kreft M., 2016*). Зерно гречихи, будучи высокопитательным компонентом рациона, обладает широким спектром биологически активных свойств, что связано с уникальным составом функциональных веществ (*Gimenez-Bastida J. A., Zielinski H., 2015*). К ним относятся флавоноиды, фитостерины, фагопирины, фагопиритолы, фенольные соединения, резистентный крахмал, пищевые волокна, лигнаны, витамины, минералы и антиоксиданты, что позволяет классифицировать гречиху как высокоактивную псевдокрупку (*Ahmed A., et al, 2014*).

Особое внимание исследователи уделяют антиоксидантной активности гречихи, которая превосходит показатели других злаков (овёс, ячмень) благодаря высокой концентрации флавоноидных соединений. Например, эксперименты *Holasova M. и соавторов (2002)* выявили, что антиоксидантный потенциал семян и листьев гречихи превышает таковой у её соломы и лузги. Кроме того, гречневая крупа служит основным пищевым источником рутина – ключевого флавоноида, играющего значительную роль в профилактике ряда заболеваний (*Lee L.S., et al., 2016*).

Зерно гречихи, несмотря на схожесть базового химического состава с другими злаками (крахмал – 60-70%, белок – 10-12%, пищевые волокна – 10%, липиды – 3%, зола – 2,5%), отличается уникальным набором биологически активных компонентов (*Skrivan P., et al., 2023*). Помимо макронутриентов, в его состав входят полифенолы, d-хиро-инозитол и витамины, которые определяют функционально-оздоровительные свойства крупы (*Potkule J., Punia S., 2021*). Пророщенное зерно гречихи демонстрирует исключительную концентрацию микронутриентов: в 100 г продукта

содержится 48,55% суточной нормы Mn, 24% Cu, 18,9-34% Fe, 23% витамина B1 и 12,7% витамина E (M. Zenkova, 2021). Это подтверждает выводы Л.Д. Прусаковой и соавторов (2013) о роли гречихи как ключевого элемента диетического и профилактического питания, особенно для детей и лиц с хроническими заболеваниями.

Как отмечалось ранее (Гуляева Т.И. и др., 2017; Е.Г. Прудникова и др., 2018), все части растения богаты флавоноидами (рутин, кверцетин, гиперозид) и фенольными соединениями, включая бензойные кислоты и катехины. Шелуха гречихи, согласно исследованиям И.В. Горьковой и соавт. (2016), служит источником Р-витаминных препаратов для профилактики атеросклероза и тромбоза. Исследования согласуются с работами А.В. Мягчилова и Л.И. Соколовой (2011), доказавших целесообразность переработки отходов в БАДы, что усиливает экологическую и экономическую ценность культуры. Флавоноиды, как растительных полифенолов, обладают широким спектром действия, включая антиоксидантные, антибактериальные и фунгицидные свойства (И.Ю. Солохина, 2020). Их высокая биологическая активность обусловлена наличием гидроксильных групп в молекуле (М.Н. Запратов, 1957), а структурной основой служит у-пироновое кольцо с фенольными и гидроксильными группами (Р.С. Насибуллин и др., 2008). Наиболее ценным флавоноидом, содержащимся в гречихе, является рутин (витамин Р), который ранее традиционно получали из софоры японской (до 25% содержания, Tiedtke J., 2006). Однако в России декоративные виды софоры непригодны для этого (А.В. Коротков и др., 2010), что делает актуальным исследование Н.Е. Павловской (2015), доказавшей возможность получения до 22,45 кг рутина с гектара вегетативной массы гречихи.

Данные о высоком содержании рутина в гречихе (до 3-5% в цветущих побегах, А.В. Крикова, 2006) дополняют выводы о её антиоксидантных свойствах (Гуляева Т.И. и др., 2017) и роли профилактике заболеваний. Путь синтеза рутина через фенилпропаноидный метаболизм (Li X et al., 2010) подтверждает возможность его накопления в растении, что открывает

перспективы для использования не только зерна, но и вторичного сырья (шелуха, побега) в производстве лекарственных препаратов. Рутин демонстрирует генопротекторный эффект при остром и хроническом воздействии (Е.Е. Карманова, А.С. Соломатина, 2017). Его накопление в гречихе зависит от фазы развития: скороспелые формы максимально аккумулируют рутин в генеративных органах, а в вегетативных – к массовому цветению (И.В. Горькова, 2019). Исследования подтверждают способность рутина улучшать гликемический контроль, липидный профиль и снижать риск сосудистых осложнений при диабете (А. Ghorbani, 2017). Рутин индуцирует аутофагию в раковых клетках (Park M. H. et al., 2016) и усиливает эффективность химиотерапии, преодолевая лекарственную устойчивость через ингибирование насосов оттока и активацию апоптоза (Iriti M. et al., 2017). Нанопрепараты на основе рутина и кверцетина демонстрируют синергизм в противоопухолевой активности (Ghanbari-Movahed M. et al., 2022), модулируя клеточные сигнальные пути (Pandey P. et al., 2021). Как единственная зерновая культура, содержащая рутин и кверцетин (Vollmannová A. et al., 2021), гречиха подтверждает свой статус стратегического ресурса для медицины и фармацевтики, что согласуется с исследованиями по использованию её вторичного сырья.

Проведенный анализ подтверждает, что уровень минерального питания влияет на накопление рутина в гречихе (Иванов, Налухин, 2025). Исследования демонстрируют возможность стимуляции синтеза этого флавоноида за счет применения биологически активных соединений. Например, обработка Люрастимом повышает содержание рутина в зерне сортов Молва и Темп на 46% (Коротков А.В., и др., 2010), что согласуется с данными о ключевой роли фенилпропаноидного пути. Однако в условиях Московской области динамика накопления биофлавоноидов гречихой, включая рутин, изучена недостаточно.

Хлорогеновая кислота – эфирное соединение кофейной и хинной кислот – играет ключевую роль в фенилпропаноидном метаболизме растений,

выступая производным коричных кислот (*Grace S.C., et al., 1998*). Она повышает устойчивость растений к абиотическим стрессам и защищает от травоядных насекомых (*Kundu A., Vadassery J., 2019*), а также накапливается в гречихе при выращивании по технологии органического земледелия (*Zvikas V., et al., 2016*). Кислота демонстрирует противоопухолевую активность (*J.Deka S., et al., 2017*), улучшает качество костной ткани и обладает целым рядом полезных свойств (*Miao M., Xiang L., 2020*). Основной диетический источник – кофе (*Olthof M.R., Katan M.B., 2001*). Обработка растений гречихи 2% раствором ретарданта хлорхолина хлороидом увеличивает синтез хлорогеновой кислоты (*Sytar O., et al., 2014*), что согласуется с данными о стимуляции фенольных соединений по действием БАВ. Парадоксально, но обработка растений гречихи фитогормонами (ИУК, гиббереллиновая кислота) усиливает синтез хлорогеновой кислоты и флавоноидов в проростках (*Park C.H. et al., 2017*). Аналогичный эффект (+50%) наблюдается при применении хитозана, жасмоновой и салициловой кислот (*Park C.H., et al., 2019*). Хитозан, как аминополисахарид, также повышает урожайность и лежкость культуры. Несмотря на данные о влиянии регуляторов роста на продукцию 3-кофеилхинной кислоты, влияние минеральных удобрений на синтез хлорогеновой кислоты остается малоизученным. Галловая кислота – эндогенный полифенол, содержащийся в гречихе, чае, винограде и вине. Аналогично с хлорогеновой кислотой, галловая кислота проявляет противоопухолевую активность, а также антимикробные и противовоспалительные свойства (*Verma et al., 2013; Choubey, 2015*). В растениях гречихи кислота и её производные участвуют в аллелопатическом подавлении сорняков, ингибируя рост корней и побегов (*Iqbal Z. et al., 2003; Kalinova J. et al., 2007*). Добавление галловой кислоты в гречишную муку улучшает её физико-химические свойства (*Wu D. Et al., 2023*), что расширяет возможности использования в пищевой промышленности. Кислота синтезируется гидролизом танинов и перспективна для медицины, включая лечение депрессии и нарушений липидного обмена (*Choubey S. et al., 2015*).

Рутин, хлорогеновая и галловая кислоты – ключевые биоактивные вещества гречихи, обладающие антиоксидантными и стресс-протекторными свойствами. Их накопление в листьях, стебле и лузге позволяет применять растение как источник для фармацевтического сырья (*В.В. Казанцева, Е.А. Гончарук, А.Н. Фесенко и др., 2015*). Показано, что уровень обеспеченности элементами питания влияет на рост гречихи и накопление метаболитов (*Цыпурская Е.В., 2019*). Кроме того, растения с разной ploидностью ($2n$ и $4n$) различаются по способности синтезировать фенольные соединения на ранних этапах онтогенеза (*Н.В. Загоскина, В.В. Казанцева, А.Н. Фесенко и др., 2018*).

При наличии кадмия (Cd) в почве гречиха замедляет рост проростков, но усиливает синтез фенолов, демонстрируя адаптационный потенциал (*Н.В. Загоскина, В.В. Казанцева, И.В. Глотова и др., 2016*). Это подтверждает роль фенольных соединений как маркеров устойчивости к абиотическим стрессам. Кратковременная электромагнитная обработка семян усиливает накопление флавоноидов и коричных кислот в листьях гречихи (*О.А. Суша, 2016*). Фенольные соединения растения служат маркерами в хемотаксономических исследованиях, а сама гречиха — модель для изучения их метаболизма (*В.В. Казанцева, Н.В. Загоскина, 2018*). Опыление пчелами не только повышает урожайность, но и влияет на биохимический состав: у опыляемых растений снижается содержание минералов в биомассе из-за их расхода на формирование завязей (*Д.М. Панков, 2012*). При этом зерно гречихи сохраняет высокую питательную ценность, содержит магний (8%), фосфор (20%), калий (20%), кальций и натрий (*Л.И. Бутенко, Л.В. Лигай, 2013*), что делает её важным источником микроэлементов.

Таким образом, регулируя агротехнические и генетические параметры, можно оптимизировать производство биоактивных веществ гречихи для медицины и функционального питания. Гречиха выступает связующим звеном между агротехникой, биоразнообразием и экологической устойчивостью. Её способность адаптироваться к стрессам, поддерживать

опылителей, улучшать качество почвы и служить источником функциональных продуктов подчеркивает её многогранную роль в сохранении и восстановлении экосистем.

Гречиха – высокопродуктивная культура-медонос, обеспечивающая урожайность меда до 70-100 кг/га для наиболее перспективных сортов (*Campbell., 1997*). Нектар продуцируется одноклеточными трихомами, расположенными на эпидермисе в вентральной зоне восьми нектарных желез. Эти железы формируются на цветоножке, чередуясь с тычинками. Интенсивность секреции нектара варьируется в зависимости от: морфотипа цветка, возраста растения, расположения соцветия в структуре побега, освещенности в период цветения (*Cawoy V., Kinet J.V., et al., 2008*).

Опыление медоносными пчелами повышает массу зерна, индекс урожайности и качество продукции за счет формирования крупных выполненных зерен (*Singh M.M., 2008*). Несмотря на значительный вклад диких опылителей в сельхозпродуктивность (*Garibaldi L. A., Carneiro L. G., 2014*), их популяции сокращаются из-за применения инсектицидов, патогенов и инвазивных видов (*Potts S. G., Imperatriz-Fonseca V., 2016*). В исследованиях медоносные пчелы составляли до 80% посетителей цветков (*Goodman R., Hepworth G., Kaczynski P., 2001*), однако региональные особенности сохраняют роль специфических опылителей — например, шмелей *Bombus ardens sakagamii* и *B. hypocrite sapporoensis* на Хоккайдо (*Sasaki H. et al., 2007*) (приложение №1).

Помимо пчёл, в опылении гречихи участвуют муравьи (*Formicidae*), переносящие пыльцу. Обработка инсектицидами, приводящая к гибели муравьев, снижает завязываемость семян, что подчеркивает их роль в репродуктивном успехе культуры (*Natsume K., Hayashi S. et al., 2022*). Гречиха также выступает инструментом экологической инженерии, как покровная культура усиливает биоконтроль членистоногих вредителей и поддерживает локальные популяции опылителей (*Campbell J. W. et al., 2016*), способствует сохранению биоразнообразия в агроландшафтах, создавая кормовую базу для

насекомых (*Fijen T. P. M., van Bodegraven V., 2022*). Данные актуальны в контексте глобального сокращения численности диких опылителей, требуя пересмотра подходов к интегрированной защите растений.

Исследования *Cordeiro G. D.* и коллег (2023) выявили обратную корреляцию между повышением температуры и нектаропродуктивностью гречихи: при росте температур на 3–5°C выделение цветочного аромата и нектара сокращалось втрое, что потенциально снижает привлекательность культуры для опылителей. Этот эффект усугубляется изменением состава летучих органических соединений (ЛОС), критичных для взаимодействия с насекомыми. Как ранее установил *Knudsen J. T.* с соавт. (2006), гречиха продуцирует как широко распространенные аттрактанты (линалоол, фенилацетонитрил, индол), так и редкие компоненты (3-пиридинкарбоксальдегид, 2-метилпирозин), формирующие уникальный ароматический профиль. Учитывая зависимость урожайности от активности опылителей (*Singh M. M., 2008; Garibaldi L. A. et al., 2014*), климатически обусловленное снижение аттрактивности цветков может усилить негативные последствия антропогенного давления на популяции насекомых, описанные *Potts S. G.* (2016). Это подтверждает необходимость адаптивных агротехнологий, включая селекцию термотолерантных сортов и минимизацию пестицидной нагрузки (*Campbell J. W. et al., 2016; Fijen T. P. M. et al., 2022*).

Исследования в области повышения нектаропродуктивности гречихи актуальны для решения экологических (сокращение биоразнообразия, климатические изменения) и продовольственных проблем. Современные подходы включают регуляцию фитогормональных процессов и применение стимуляторов роста.

Ауксины, цитокинины и гиббереллины усиливают опыление и завязываемость семян (*Bernier G. et al., 1993*). Пик нектаровыделения приходится на ранние фазы цветения, а стимуляторы роста повышают урожайность (*Plažek A. et al., 2023*). Однако внесение хелатированных форм

Cu, Mn и Fe не оказывает значимого влияния на сахаристость нектара, его объём или урожайность (*Liszewski M., 2021*). Приоритетными остаются методы, направленные на оптимизацию гормонального статуса растений и фенологически обоснованное применение стимуляторов, тогда как коррекция микроэлементного состава требует дополнительного изучения.

Влияние минеральных удобрений на нектаропродуктивность гречихи изучено слабо. Данные по другим культурам (например, клеверу) демонстрируют, что фосфаты стимулируют рост растений, но снижают выход нектара при избытке калия (*Ryle M., 1954*).

Гречишный мёд, отличающийся тёмно-коричневым цветом и патока-подобным ароматом (*Pasini F. et al., 2013*), содержит повышенные концентрации минералов, сахаров и фенольных соединений (*Cheng N. et al., 2017*), витамины (группы B, ниацин, рибофлавин) и органические кислоты (уксусная, лимонная) (*Atrouse O. M. et al., 2004*), а также биоактивные компоненты с антиоксидантными, противомикробными и противовоспалительными свойствами (*Bogdanov S. et al., 2008; Gośliński M. et al., 2021*).

Потребление мёда из гречихи повышает антиоксидантную активность сыворотки крови (*Gheldof N. et al., 2003*), что подтверждает его роль в профилактике заболеваний. Вариабельность состава и биологической активности мёда зависит от ботанико-географических факторов (*Alzahrani H. A. et al., 2012; Moniruzzaman M. et al., 2013*). Приоритетным направлением остаётся изучение агротехнических методов повышения нектаропродуктивности, тогда как гречишный мёд сохраняет потенциал как функциональный продукт питания.

Гречиха — уникальная культура с двойным агроэкологическим значением. Она служит ценным медоносом, обеспечивая производство гречишного мёда с антиоксидантными, противовоспалительными и противомикробными свойствами. Её ремонтантность и растянутое цветение привлекают насекомых-опылителей, что полезно для биозащиты культур.

Однако биологический потенциал гречихи изучен недостаточно. Большинство исследований проводится за рубежом, где акцент делается на адаптацию к климатическим изменениям и оптимизацию фитогормональных процессов. Необходимы дальнейшие работы по: управлению гормональным балансом для повышения нектаровыделения, изучению роли гречихи в устойчивых агросистемах, анализу влияния удобрений на качество нектара.

Интеграция этих направлений усилит экономическую и экологическую ценность гречихи в условиях глобальных вызовов.

1.1.3. Глобальная динамика производства гречихи: агроэкологические и экономические детерминанты

Анализ глобальных трендов производства гречихи требует изучения рыночных механизмов, определяющих её возделывания, включая агроклиматические условия и государственную аграрную политику (*Фесенко А.Н., Фесенко И.Н., 2017*). Мировой опыт свидетельствует, что ключевыми лимитирующими факторами выступают: биоклиматические ограничения, конкуренция на зерновом рынке, селекционные приоритеты. На фоне негативных последствий глобального изменения климата для увеличения производства гречихи перед учеными встает сложная проблема одновременного повышения, как урожайности, так и их устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды, улучшения качества продукции (*Зотиков В. И., Наумкина Т. С., Сидоренко В. С., 2010*).

Динамика мирового производства гречихи (1992 – 2019 гг.) характеризуется снижением валового сбора на 68% (2,4 млн.т), что связано с сокращением посевных площадей и низкой рентабельностью культуры (*Поспелова И.Н., 2021*). К 2019 г. лидерами производства оставались Россия (2-е место по площадям) и Китай, однако урожайность в РФ существенно уступала показателям других стран (*Алтухов А.И., Полутина Т.Н., 2014*). Ряд исследователей повышение урожайности гречихи видят в применении

удобрений; результаты по исследованию реакции современных сортов гречихи разного морфотипа послужат основой для совершенствования системы удобрения этой культуры и важной научной информацией при создании новых сортов интенсивного типа, характеризующиеся как агрохимически эффективные (Корнель А.Н., Емельянова В.Н., 2011). Гречиха остается традиционной культурой для России с длительной историей возделывания. В последние десятилетия глобальный интерес к ней возрос благодаря уникальным агрономическим и пищевым свойствам. Ведущими производителями выступают Китай, Россия, Беларусь, Франция, США, Бразилия, Канада и Япония.

Географическая специфика производства гречихи демонстрирует региональную асимметрию. В Африке единственным крупным производителем остается Танзания, где экспортноориентированные посадки сосредоточены в высокогорных районах с достаточным увлажнением (500 – 1500 мм.). Австралия полностью исключена из мировой цепочки производства гречихи из-за климатической несовместимости (200-300 мм./год) в критическую фазу развития. Такая диспропорция подчёркивает зависимость культуры от строгих агроэкологических параметров.

За период с 1994 по 2022 гг. наблюдается устойчивое снижение урожайности гречихи на фоне сокращения посевных площадей (на 68% к 2019 г.). Несмотря на это, Европа сохраняет лидерство в мировом производстве, обеспечивая 48,5% общего объема зерна, что связано с традиционными аграрными практиками в России, Беларуси и Франции. Азия (45,3%) демонстрирует рост за счет Китая, где культура активно внедрена в севооборот. На долю Америки (5,8%) и Африки (0,4%) приходится минимальный вклад, при этом ключевым африканским производителем остается Танзания.

Анализ динамики посевных площадей (по данным FAO STAT) и урожайности гречихи (1994-2022 гг.) показывает, что посевные площади сократились на 45,9% (на 1,89 млн. га), достигнув минимального значения в

2022 г. (1,4 млн. га к 2020 г.). Среднегодовое снижение составляет 4,3%, несмотря на кратковременный рост в 2000 г. (+603,5 тыс. га). Урожайность демонстрирует противоречивую динамику: рост на 23,6% в 2020-2022 гг. (до 472 тыс. т) на фоне общего снижения на 40,8% за весь период. Среднегодовое падение – 3,7%. Индекс переменного (+1,6%) и фиксированного состава (+3,8%) указывают на рост урожайности за счет агротехнологий, но структурные сдвиги в размещении посевов снизили среднюю урожайность на 2,1% за 2020–2022 гг. физический объём вырос на 20,3%, однако стоимость продукции упала на 35,8% из-за роста мировых цен на 23,6%. В долгосрочной перспективе (1994–2022) спад физического объёма на 19,6% компенсирован ростом цен на 2,3%, что привело к увеличению стоимости товарооборота на 23,9%.

Китай, обладая лишь 7% мировых пахотных земель, сталкивается с вызовами обеспечения продовольственной безопасности для 1,4 млрд. человек населения, что обуславливает интенсивное использование азотных удобрений (около 30% глобального потребления N) (*Chen W., et al., 2024; Gu B., et al., 2015*). Несмотря на роль азота как ключевого фактора повышения урожайности (*Завали А.А., и др., 2015*), его избыточное внесение провоцирует экологические риски, включая деградацию почв и эвтрофикацию водоемов. За период наблюдений посевные площади под гречихой (по данным FAO STAT) сократились на 50,7% (643,2 тыс. га), со среднегодовым снижением на 4,9% (45,9 тыс. га). Максимальное расширение отмечено в 2000 г. (+68 тыс. га), минимальное — в 2002 г. (-290 тыс. га). Урожайность демонстрирует неоднородную динамику: краткосрочный рост на 18,3% (92,45 тыс. т) в 2020–2022 гг. контрастирует с долгосрочным спадом на 74,2% (1717,6 тыс. т) за весь период. Среднегодовое сокращение урожайности составило 9,2% (122,7 тыс. т), при среднем значении 986,3 тыс. т. Структурные изменения посевных площадей способствовали росту средней урожайности на 1,3%, однако совокупное влияние факторов привело к снижению валового сбора на 3,3%, в том числе: сокращение площадей — -2,3%; снижение урожайности — -1,0%.

Контрастная динамика наблюдается в Бразилии, где агроэкологические условия и политика поддержки сельского хозяйства формируют иную модель производства гречихи, требующую отдельного анализа. Бразилия, являясь ключевым сельхозпроизводителем в глобальном масштабе, демонстрирует экстенсивно-интенсивную модель развития: за 40 лет урожайность сельскохозяйственных культур выросла на 206% при увеличении посевных площадей на 61% (*Cherubin M. R. et al., 2022*). Интенсификация сопровождается ростом применения азотных удобрений, что частично связано с расширением сельхозугодий за счёт вырубки лесов Амазонии (28,8% территории страны) (*de Mello K. et al., 2020*). Посевы гречихи локализованы преимущественно в южных регионах, где агроэкологические условия оптимальны для её возделывания (*Talamini M. V. et al., 2023*).

Несмотря на общемировую тенденцию сокращения площадей (по данным FAO STAT), в Бразилии зафиксирован слабopоложительный тренд: прирост к 2022 г. относительно 1994 г. — 1,7% (+0,79 тыс. га); среднегодовое увеличение — 0,1% (0,0564 тыс. га), при среднем значении 46,55 тыс. г.; максимальное расширение площадей отмечено в 2014 г. (+2 тыс. га), минимальное — в 2016 г. (-1,955 тыс. га). Урожайность гречихи характеризуется долгосрочным ростом на фоне краткосрочной волатильности: с 1994 по 2022 гг. валовой сбор увеличился на 31,5% (+15,4 тыс. т), несмотря на снижение на 0,8% (-0,052 тыс. т) в 2020–2022 гг.; среднегодовой прирост — 2%, при средней урожайности 56 тыс. т; пиковые значения зафиксированы в 1996 г. (+9,84 тыс. т), антирекорд — в 1998 г. (-9,95 тыс. т).

Таким образом, китайский опыт подчёркивает противоречие между необходимостью интенсификации сельского хозяйства и экологической устойчивостью, актуальное для стран с высокой демографической нагрузкой и ограниченными земельными ресурсами. Бразильская модель агроразвития, сочетающая экстенсификацию и технологизацию, обеспечивает рост продуктивности гречихи даже в условиях ограниченного расширения

посевных площадей. Однако зависимость от азотных удобрений и антропогенная трансформация экосистем Амазонии требуют балансировки между экономической эффективностью и экологической устойчивостью.

Танзания, занимающая 42% сельскохозяйственных угодий от общей территории (Wineman A., et al., 2020), демонстрирует экспоненциальный рост производства гречихи с 2012 года. К 2020 г. посевные площади достигли максимума – увеличение на 24,8 тыс.га с 2000 г., со среднегодовым приростом 42,9% (2,26 тыс.га). Писк расширения площадей зафиксирован в 2012 г. (+8,5 тыс. га). Урожайность за 2000-2022 г. выросла на 27,17 тыс. т при среднегодовом увеличении на 46,9% с максимальным скачком в 2012 г.

Франция, третий глобальный потребитель пестицидов и седьмой — удобрений (Bayramoglu B., Chakir R., 2016), сталкивается с последствиями интенсивного сельского хозяйства: 98% выбросов аммиака (NH₃) связаны с агросектором, из них свыше 50% — с применением азотных удобрений (Ramanantenasoa M. M. J. et al., 2018). Деградация водных ресурсов из-за нитратов отмечается с 1970–2000 гг. (El Khattabi J. et al., 2018), что усугубляет экологические риски в Европе (Bouraoui F., 2020). Динамика производства гречихи (1994–2016 гг.) (по данным FAO STAT): посевные площади к 2016 г. выросли на 556,7% (+49,55 тыс. га) с ежегодным приростом 18,7% (4,5 тыс. га). Максимальное расширение — в 2016 г. (+28,35 тыс. га), спад — в 2006 г. (-9,07 тыс. га). Урожайность увеличилась на 554,4% (+143,59 тыс. т) за период, со среднегодовым ростом 13,05 тыс. т. Пики продуктивности зафиксированы в 2004 и 2016 гг.

Канада демонстрирует неоднозначную динамику производства гречихи. В 2022 г. посевные площади (по данным FAO STAT) увеличились на 18,4% (+1,8 тыс. га) по сравнению с 2020 г. при среднем значении 9,67 тыс. га. Максимальный прирост площадей отмечен в 2018 г. (+9,47 тыс. га), минимальный — в 2004 г. (-7,9 тыс. га). С 1994 г. общий прирост составил 8,4% (+0,9 тыс. га). Урожайность в 2022 г. выросла на 21,7% (+1,93 тыс. т) относительно 2020 г., но за весь период снизилась на 12,7% (-1,57 тыс. т) при

средней урожайности 9,96 тыс. т и ежегодном сокращении на 1,2% (-0,14 тыс. т).

Проведенный анализ свидетельствует о глобальном распространении гречихи (*Fagopyrum esculentum Moench*) как сельскохозяйственной культуры, за исключением Австралии, где её производство отсутствует на современном этапе. Региональные лидеры по валовому сбору дифференцированы по макрорегионам: Франция (Европа), Китай (Азия), Танзания (Африка), Бразилия (Южная Америка) и Канада (Северная Америка). Культура демонстрирует выраженную зависимость от агроклиматических условий, включая температурный режим, влагообеспеченность и эдафические характеристики почв. Максимальная реализация её биологического потенциала наблюдается в регионах с оптимальным сочетанием тепловых ресурсов, достаточного гидрологического обеспечения и высокого плодородия агроландшафтов.

Следует отметить, что существовавшее в агрономической практике устойчивое представление о низкой требовательности гречихи к минеральному питанию является ошибочным. Как показывают современные исследования, уровень макро- и микроэлементного обеспечения напрямую коррелирует с продуктивностью культуры. В дальнейшем изложении будет проведен системный анализ агротехнологических приемов возделывания *Fagopyrum esculentum*, с акцентом на ключевые факторы, детерминирующие формирование высокой урожайности: оптимизацию сроков сева, норм высева, режимов удобрения и методов защиты растений.

1.2. Биологические свойства гречихи, её адаптационные требования к климатическим условиям и оптимизация минерального питания

Морфофизиологические особенности гречихи, детерминированные её филогенетическим происхождением (*Наполова Г.В., Наполов В.В., 2007*),

оказывают существенное влияние на репродуктивную биологию вида. Низкая продуктивность *Fagopyrum spp.* обусловлена комплексом факторов, включая гетеростилию диморфного типа, абортированное развитие зародыша, морфологическую редукцию гинецея, приводящую к ограниченной функциональности женских репродуктивных структур (*Gupta J.J., Yadavi B.P., 2002*). Особенности гречихи лимитируют эффективность оплодотворения и семенную продуктивность даже в оптимальных агроэкологических условиях.

Ключевым фактором, определяющим продуктивность *Fagopyrum esculentum*, выступает архитектура соцветия, обусловленная детерминантным типом роста. Согласно исследованиям *Sokoloff D.D. et al. (2023)*, прицветник гречихи формируется в результате сращения двух профиллов, один из которых индуцирует развитие цветка следующего порядка, что определяет компактность генеративных структур. Соцветия представлены пазушными кистями, несущими гетеростильные цветки (*Наумкин В.П., Лысенко Н.Н., 2014*). Гетеростилия проявляется в диморфизме: короткостолбчатые цветки (тычинки длиннее пестика), длинностолбчатые цветки (пестик превышает длину тычинок). Данная морфологическая адаптация, сочетающаяся с вариабельной окраской венчика (белый, розовый, красный), обеспечивает привлечение широкого спектра опылителей – от апидных до мелких перепончатокрылых.

Плодовая структура (орешек) характеризуется: трехгранной формой с плотной неодревесневшим перекарпием, наличием рудиментарных элементов околоцветника в базальной части, эксцентрическим положением зародыша, окруженного гладким эндоспермом (*Анисимова М.М., 2010*). Эволюционно закреплённые морфогенетические паттерны репродуктивных структур *Fagopyrum esculentum* формируют биологический лимит урожайности, сохраняющий актуальность даже при применении современных агротехнологических решений (приложение Б).

Корневая система гречихи характеризуется стержневым типом строения с развитыми корневыми волосками. Несмотря на способность главного корня достигать глубины 80-100 см, основная масса корневой системы (до 70% биомассы) локализована в пахотном горизонте (0-30 см). Физиологическая особенность корней — экссудация щавелевой кислоты, которая хелатирует ионы алюминия, снижая их токсичность в кислых почвах (*Zheng S.J. et al., 1998*). Данный адаптивный механизм имеет ключевое значение, учитывая, что кислые почвы с повышенным содержанием подвижного Al^{3+} занимают около 50% мировых пахотных площадей (*Kochian L.V., 1995*). При механическом повреждении или полегании растений наблюдается индуцированное образование адвентивных боковых корней.

Стебель гречихи имеет прямостоячую ребристую структуру с полостью внутри и выраженным ветвлением. Окраска варьирует от зелёной до антоциановой (красновато-зелёной) в зависимости от генотипа и условий освещённости. Диаметр стебля (3-8 мм) демонстрирует высокую зависимость от агротехнических приёмов: нормы посева, сроков посева, режима минерального питания. Морфометрические параметры (длина междоузлий, угол отхождения ветвей, соотношение вегетативной/генеративной биомассы) обладают выраженной фенотипической пластичностью, что подтверждено исследованиями влияния плотности посадки и фенологии развития (*Chrungoo N.K., Dohtdong L., Chettry U., 2016*).

Гречиха демонстрирует повышенную склонность к полеганию, которая, по данным исследований, служит ключевым лимитирующим фактором урожайности семян (*Woliński J., 2012*). Интенсивное полегание провоцирует механическое повреждение тканей, угнетение фотосинтетической активности, а также нарушение транспорта ассимилятов к репродуктивным органам, что в совокупности снижает массу 1000 семян и эффективность уборки. Компенсаторным механизмом выступает способность к вторичному ветвлению, обеспечивающему формирование дополнительных генеративных побегов даже при частичной потере ассимиляционной поверхности.

Листовой аппарат характеризуется гетерофиллией: нижние ярусы представлены крупными сердцевидно-треугольными листьями с антоциановым основанием, верхние мелкими сидячими листовыми пластинами стреловидной формой. Современные сорта, как показано в работах *Amelin A.V. с соавт. (2022)*, оптимизируют фотосинтетический потенциал преимущественно за счёт увеличения площади листа, а не пролонгации их функциональной активности. Дозированное внесение азотных удобрений в сочетании с оптимизацией густоты стояния позволяет модулировать архитектуру растений — снижать высоту стебля, увеличивать угол отхождения ветвей второго порядка и интенсифицировать фотосинтетические показатели (*Fang X. et al., 2018*). Такая корректировка морфофизиологических параметров минимизирует риски полегания и повышает индекс урожая (*Иванов Р.Г., Налухин А.Н., Белопухов С.Л., 2026*).

Гречиха проявляет уникальный онтогенез, характеризующийся индетерминантным типом цветения – синхронным формированием генеративных органов (цветение) и репродуктивных структур (плодообразование), что визуализировано в приложении Б. Данная стратегия обеспечивает растению экологическую пластичность, но требует точной синхронизации агротехнических мероприятий. В период от посева до уборки гречиха проходит следующие фазы развития: фаза семядолей, первого листа, бутонизации, начало цветения, полного цветения, созревания. Наступление каждой конкретной фазы и длительность её определяется почвенно-климатическими условиями и обеспеченностью минеральными веществами посевов. Требования культуры к почвенно-климатическим условиям произрастания во многом в период начала цветения - полного цветения, поэтому данные периода являются критическими для получения стабильно высокой урожайности. Плодообразование является вторым критическим периодом в онтогенезе. Именно в фазе плодообразования гречиха чувствительная к климатическим условиям произрастания.

1.2.1. Требования культуры к климатическим условиям

Растения подвержены воздействию различных условий окружающей среды, включая ультрафиолетовое излучение, температурный и водные режимы, доступность питательных веществ и др. (*Germ M., et al., 2016*). Температура поверхности земли увеличилась примерно на 1,1 °C по сравнению со средним значением в 1850-1900 гг., и ожидается, что в течение следующих 100 лет она ещё больше повысится на 2,5-4 °C (*Tollefson J., 2021*). Растения ведут прикрепленный образ жизни, поэтому нуждаются в выработке защитных механизмов, позволяющих выживать в условиях засухи. В свою очередь глобальное повышение температуры ограничивает урожайность сельскохозяйственных культур (*Asseng S., et al., 2015*).

В растениях высокие температуры изменяют ряд физиологических и метаболических процессов и влияют как на способность к росту и развитию, так и на формирование репродуктивных органов (*Driedonks N., Rieu I., Vriezen W. H., 2016*). Температура играет важную роль практически во всех физиолого-биохимических процессах роста и развития сельскохозяйственных культур, таких как фотосинтез, дыхание, транспирация, развитие и рост корней (*Ahad B., Reshi Z. A., 2015*). Известно, что в росте и развитии растений гречихи выделяют две критические стадии, одной из них выступает период начала цветения, к примеру, жара во время репродуктивной стадии может привести к прерыванию развития цветка, снижению завязывания плодов, нарушению оплодотворения (*Rezaei E. E., Siebert S., Ewert F., 2015*). Выживание растений в условиях теплового стресса зависит от способности растений генерировать необходимые физиологические вещества, позволяющие справляться с этим стрессом (*Hasanuzzaman M. et al., 2013*).

Одним из основных процессов, наиболее чувствительных к тепловому стрессу в организме растений является фотосинтез (*Crafts-Brandner S. J., Salvucci M. E., 2002*). Наибольшая активность фотосинтеза у гречихи наблюдается в период полного цветения, это обусловлено наиболее

максимальным формированием биомассы растений, фотосинтез позволяет производить органические вещества, необходимые для созревания плодов. Соответственно, температурный фактор выступает одним из основных факторов в получении стабильно высоких урожаев. В свою очередь отметим, исследования, проведенные коллективом испанских ученых, которые показывают, что высокая концентрация углекислого газа в атмосфере и высокая температура способствует эффективности использования воды и фотосинтезу у гречихи (*Martínez-Goni X. S., Miranda-Apodaca J., et al., 2024*).

Современные исследования выявили специфические механизмы влияния теплового стресса на онтогенез гречихи, варьирующие в зависимости от вида и фенофазы. Исследования *Aubert et al. (2020)* показывают, что температура >27 °C вызывает растянутое цветение (увеличение периода «цветение – плодообразование» на 15-20 дней). *Michiyama и Arikuni (2001)* сообщают, что гипертермия на ранних стадиях индуцирует удлинение гипокотыля и активацию пазушных почек, что приводит к формированию избыточных побегов первого порядка, конкурирующих за ассимиляты с главным побегом. *Jagadish (2020)* отмечает, что пыльца гречихи чувствительна к тепловому стрессу, влияющий на жизнеспособность пестика, при этом оплодотворение и эмбриогенез имеют сравнительно более высокий порог теплового стресса. Сообщается, что гречиха татарская более приспособлена к абиотическим стрессам, чем гречиха посевная (*Zhang L. et al., 2017*).

Водный дефицит и засоление почв критически влияют на урожайность сельскохозяйственных культур (*Ihsan et al., 2016; Adeyemo et al., 2022*). Для гречихи ключевыми аспектами являются: водопользование, чувствительность к засухе, засоление почвы. Эффективность использования воды коррелирует с фотосинтетической активностью и обратно пропорциональная транспирации (*Amelin et al., 2021*). Транспирационная активность листьев имеет высокую наследственную обусловленность, что важно для селекции высокопродуктивных сортов (*Amelin et al., 2022*). Ранние стадии роста и

развития растений гречихи наиболее уязвимы: водный стресс угнетает корневую систему (*Choi et al., 2021*). Накопление солей в прикорневом слое вызывает осмотический стресс, нарушая транспорт воды и подавляя рост и развитие растений (*Салтыгулыева, 2023; Adeyemo et al., 2022*).

Засоление почв, сопровождающееся накоплением Na^+ и Cl^- , провоцирует осмотический стресс, ионный дисбаланс и нарушение корневой аэрации (*Alwan, 2015*). Гречиха посевная (*Fagopyrum esculentum*), как типичный гликофит, демонстрирует высокую чувствительность к солевому стрессу, что проявляется в угнетении роста корней и надземных органов (*Гордеева, 2017*). Экспериментальные данные подтверждают: снижение скорости прорастания семян на 30-40% при концентрации $\text{NaCl} \geq 100$ мМ (*Lim et al., 2012*); изменение метаболизма — активация синтеза γ -аминомасляной кислоты (на 25%) и флавоноидов (на 15%) в условиях засоления (*Zhu, Guo, 2015*).

Помимо солевого стресса, продуктивность культуры лимитируется световым дефицитом, дегидратацией почвы и ветровой эрозией, что объясняет низкую урожайность в традиционных агроценозах (*Семыкин и др., 2008*). Исследования демонстрируют связь географического происхождения растений с их фотопериодической реакцией, что особенно важно для культур с широким ареалом возделывания (*Романова и др., 2019*). Для гречихи свет выступает ключевым фактором, определяющим продуктивность: недостаточная освещенность угнетает ветвление, снижает число цветков и завязей (*Важов, 2013*), интенсивность фотосинтеза напрямую коррелирует с биомассой и семенной продуктивностью (*Stefano, Rosario, 2003*).

Несмотря на высокую требовательность к условиям среды (свет, влага, ветровой режим), гречиха обладает агроэкологическими преимуществами: минимальная потребность в обработке почвы, низкая пестицидная нагрузка, что делает её перспективной для органического земледелия (*Farooq et al., 2016*).

1.2.2. Требования гречихи к минеральному питанию

Внедрение сбалансированной системы удобрения остаётся ключевым агроприемом для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур, включая гречиху (Анохина и соавт., 2020). Исследования Юдина и Никифорова (2010) подтверждают высокую отзывчивость гречихи как на органические, так и минеральные удобрения, однако короткий вегетационный период культуры (45-60 дней) ограничивает период усвоения питательных элементов из почвы (Шевчук, Нечунаева, 2022).

Азот (N) – ключевой элемент живых систем, критически важный для управления продуктивностью сельского хозяйства в условиях растущего спроса (Robertson, Vitousek, 2009). Однако его доступность остается основным лимитирующим фактором для агроэкосистем (Rutting et al., 2018). Дозированное применение N-удобрений повышает урожайность, но избыток приводит к снижению потребительских качеств зерна, включая пищевую ценность и технологические свойства (Gao et al., 2021). В прошлом и настоящем повышение производительности основных систем растениеводства генетическим улучшением использованных сортов и более широким применением внешних ресурсов, таких как вода, удобрения, пестициды и др. С целью повышения эффективности использования ресурсов основное внимание следует уделять повышению урожайности при меньшем количестве азотных удобрений (Spiertz J. H. J., 2009). Внесение азота повышает содержание хлорофилла, скорость ассимиляции, качество урожая, устойчивость к экологическим стрессам, таким как ограниченность доступной воды и засоление почвы (Bondada B. R. et al., 1996; Chen W. et al., 2010). Азот существенно влияет на различные растительные молекулы, такие как аминокислоты, хлорофилл, нуклеиновые кислоты, АТФ и фитогормоны, содержащие азот в качестве структурной части, необходимы для завершения биологических процессов, включающих метаболизм углерода и азота,

фотосинтез и производство белка (*Frink C. R., Waggoner P. E., Ausubel J. H., 1999; Crawford N. M., Forde B. G., 2002*).

В биосфере растения подвергаются воздействию различных форм N, которые включают минеральные и органические формы N в почве, а также газообразные NH₃ и молекулярные N₂ в атмосфере (*von Wirén N., Gazzarrini S., Frommer W. B., 1997*). Большинство растений получают азот (N) из почвы в форме нитратов и аммония, причем некоторые виды отдают предпочтение одной ионной форме перед другой (*Forde B. G., Clarkson D. T., 1999*). В агроценозах очень значительная часть азотных удобрений может теряться из почвы в грунтовые воды, реки и океаны (*Glass A. D. M., 2003*). Нитрат - анион (NO₃) является преобладающей формой неорганического N, доступной высшим растениям (*Miller A. J., Cramer M. D., 2005*).

Известно, что растения развили несколько механизмов регулирования метаболизма N в ответ на доступность N в окружающей среде (*Wang M. et al., 2014*). Исследования показали, что корни растений могут поглощать и использовать различные питательные вещества в почве через ризосферные микроорганизмы, а ризосферные микроорганизмы также могут улучшать почвенную среду и играть важную роль в устойчивости растений к стрессу и болезням (*Castellano-Hinojosa A. et al., 2021*). Внесение азотных удобрений оказывает значительное воздействие на грибные сообщества в почве, ризосфере и эндофитной среде (*Bai, L., Zhang, X., Li, B., Sun, F., et al., 2022*). Таким образом, обнаружение взаимосвязи между растениями и ризосферными микроорганизмами при внесении азотных удобрений может обеспечить новые подходы к стимулированию роста и урожайности сельскохозяйственных культур (*Qiu Q. et al., 2023*). Измайлов С.Ф., Никитин А.В. и др., сообщают о том, что нитрат в растениях является не только одним из основных источников азотного питания, но также выполняет и другую важную роль - сигнальную (*Измайлов С.Ф., Никитин А.В., Родионов В.А., 2018*).

Преобразование нитрат-аниона в организме растения идет с участием ряда ферментов, главные из них: нитратредуктаза, нитритредуктаза. Как только нитрат попадает в растение, он восстанавливается до нитрита при помощи нитратредуктазы, а затем превращается в аммоний, катализируемый нитритредуктазой (Hu M., et al., 2018). Исследования, проведенные в 30-е гг. XX в. показывают, что у гречихи на протяжении большей части активного жизненного цикла растения, поглощение аммонийного азота преобладало над поглощением нитратного азота, скорость поглощения нитратов превышало скорость поглощения аммония только на поздних стадиях роста, когда скорость поглощения одного и другого была относительно низкой, т.е. гречиху можно назвать «поглотителем аммония» (Arrington L. B., Shive J. W., 1935). В почве редукция нитратов идет при участии бактерий - денитрофикаторов, в свою очередь реакция денитрификации - эндотермическая и требует внешнего источника энергии, которым выступает органическое вещество (Водяницкий Ю.Н., Минеев В.Г., 2015).

Чрезмерное применение азотных удобрений на гречихе приводит к низкой эффективности использования азота и низким экономическим выгодам, а также к серьезным экологическим проблемам в сельском хозяйстве (Zhao Z.B., et al., 2020; Иванов Р.Г., Налиухин А.Н., 2025). Неразумное внесение азота не только снизит урожайность и качество сельскохозяйственных культур, но и вызовет серьезные негативные проблемы, включая увеличение производственных затрат, более высокое закисление почвы, снижение качества обрабатываемых земель и загрязнение окружающей среды (Lui C., et al., 2023). Кроме того, в литературе имеются сведения, которые говорят о том, что повышенные дозы азотных удобрений и увеличение густоты посадки приводят к уменьшению содержания лигнина, что приводит к полеганию гречихи (Wang C. et al., 2015). Также азотные удобрения оказывают значительное влияние на развитие эндосперма гречихи, активность ключевых ферментов для синтеза крахмала, накопление крахмала и физико-химические свойства крахмала (Gao L. et al., 2021).

Наряду с запасом в почве минерального азота на эффективность азотных удобрений значительное влияние оказывает содержание подвижного фосфора (*Шафран С.А. И др., 2010*). Фосфор - стратегический элемент, отвечающий за энергетический баланс в биосфере, дефицит которого нарушает процессы, как синтеза, так и распада органических веществ в почве (*Шафронов О. Д., Темников В. Н., 2008*). Почвенный фосфор существует в различных формах, включая неорганический фосфор и органический фосфор. Внимание к проблеме фосфора в сельском хозяйстве за последнее время не случайно, во-первых, апатитовое сырье, из которого производится фосфорное удобрение, является ограниченным невозобновляемым ресурсом, во-вторых, существует проблема переноса фосфора из почвы в воду, что вызывает эвтрофикацию водоёмов (*Johnston A. E. et al., 2014*).

В настоящее время в Нечерноземной зоне резко сократилось применение удобрений, баланс фосфора стал складываться со значительным превышением его выноса урожаями над поступлением в почву, что повлекло за собой снижение содержания подвижного фосфора в почвах зоны (*Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., и др., 2021*). Фосфор играет фундаментальную роль в регулировании физиологических реакций и повышении устойчивости растений к абиотическому стрессу, такому как засуха, засоленность, заболачивание и токсичность тяжелых металлов, кроме того, фосфор является структурным элементом нуклеиновых кислот и играет ключевую роль в передаче энергии (*Hawkesford, M. J. et al., 2023*). После поглощения в растениях фосфор преобразуется в органические формы АТФ и АДФ, которые используются в качестве энергоносителей (*Plaxton W., Lambers H., 2015*).

Гречиха может повысить доступность почвенного фосфора (*Possinger A. R., Byrne L. B., Breen N. E., 2013*). Гречиха на почвах бедных фосфором обладает большой способностью к разрастанию корней, за счет выделения фосфатаз поверхностью корня для повышения доступности Р (*Grant C.A., et al., 2001; Amann C., Amberger A., 1989*).

Калий является жизненно важным макроэлементом и играет важную роль в развитии растений: осморегуляция, регуляция мембранного потенциала, котранспорт сахаров, адаптация к стрессу и рост (*Sanyal S. K. et al., 2020*). Калий играет регуляторную роль в активации ферментов, в процессах синтеза белка, углеводном обмене (*Hasanuzzaman M. et al., 2018*). В условиях засоленности почв калий регулирует ионный гомеостаз и контролирует осмотический баланс (*Assaha D. V. M. et al., 2017*). Элемент способен контролировать раскрытие устьиц в условиях засухи и помогает растениям адаптироваться к условиям водного стресса (*Aksu G., Altay H., 2020*). Доказано, что применение калийных удобрений снижает содержание радиоактивных металлов, например, Cs в гречихе (*Kubo K. et al., 2017*).

Известно, что калий играет важную роль в снижении токсичности тяжелых металлов за счет снижения окислительного стресса, вызванного присутствием тяжелых металлов (*Tere H. D., et al., 2018*). Исходя из того, что гречиха является малоурожайной культурой, *Wang et al.* обнаружили, что обработка калийными удобрениями может способствовать росту корней, увеличивать поглощение питательных веществ почвы ризосферой, а затем увеличивать конечный урожай (*Wang Y. et al., 2019*).

Отметим, что высокие дозы калийных удобрений понижают урожайность культуры вследствие ограничения поглощения азота, фосфора и магния из почвы (*Tang L. et al., 2024*). Показано, что применение калийных удобрений может улучшить разнообразие видов грибов в почве (*Duan Y. et al., 2015*). *Zhihong J. et al., (2004)* доказали, что калийные удобрения способствуют росту почвенных микроорганизмов и способствуют минерализации органического вещества почвы для посадки гречихи.

Физиологическая реакция гречихи (*Fagopyrum esculentum Moench.*) на минеральные удобрения характеризуется нелинейной зависимостью, обусловленной её экологической пластичностью и спецификой азотного метаболизма. Несмотря на высокую отзывчивость на макроэлементы (NPK), культура демонстрирует фенотипическую чувствительность к гипердозам

азота, проявляющуюся в ингибировании фотосинтетической активности, редукции числа генеративных органов и метаболическом дисбалансе. Ключевой проблемой остаётся оптимизация дозировок удобрений, обеспечивающая синергизм между продуктивностью и стрессоустойчивостью. Однако паттерны детоксикации ксенобиотиков в ризосфере гречихи, включая механизмы микробно-растительного взаимодействия, изучены фрагментарно.

1.3. Влияние ризобактерий на урожайность сельскохозяйственных культур в агроэкосистеме

Традиционное сельское хозяйство зависит от минеральных удобрений, негативно влияющих на экологическое состояние окружающей среды и здоровье человека (*Aloo B.N. et al., 2022*). Низкая эффективность использования питательных веществ приводит к потере более 50% химических удобрений (*Fageria N.K., 2014*). Азотные и фосфорные удобрения легко улетучиваются, вымываются и трансформируются в недоступные формы, угрожая биосфере (*Hakim S. et al., 2021*). Ризосфера – ключевая зона взаимодействия корней растений, почвы и микроорганизмов (*Henneron L. et al., 2020*). Через неё растения усваивают азот, фосфор, калий и другие элементы (*Caldwell B.A., 2005*). Управление ризосферой повышает эффективность использования почвенных питательных веществ и продуктивность культур (*Zia R. Et al., 2021*).

Использование биоудобрений восходит к 1980-м годам, когда первые составы *Rhizobium* были запатентованы и проданы в Германии (*Nobbe F., Hiltner L., 1986*). Биоудобрения определяются как препараты, содержащие живые или латентные клетки эффективных штаммов микроорганизмов, которые помогают растениям сельскохозяйственных культур усваивать питательные вещества за счет их взаимодействия в ризосфере (*Okur N., 2018*). Многие из биоудобрений могут фиксировать азот, помогают улучшить доступ

к питательным веществам из органических удобрений и почвенных запасов, улучшают устойчивость к засухе, улучшают здоровье растений и повышают устойчивость к солевому стрессу (*Arora N. K., 2013*). Основным механизмом стрессоустойчивости, вызванный микроорганизмами в ризосфере растений, не совсем понятен, несмотря на различные эффекты, такие как увеличение длины корня, площади поверхности корня, вследствие выработки растительных гормонов, таких как индолилуксусная кислота, гиббереллины, также показана выработка цитокининов и антиоксидантов (*Basu S., Rabara R., Negi S, 2017*). В свою очередь, *Itelima et al.*, рассматривают биоудобрение как микробный инокулянт, содержащий культуру спящих или живых клеток эффективных штаммов N-фиксирующих, P-мобилизующих, K - мобилизующих микроорганизмов (*Itelima et al., 2018*). *Bo Sun et.al (2020)* доказали, что биоудобрения снижают нитрификацию и усиливают денитрификацию в почве, кроме того, снижают потери азота на сельскохозяйственных угодьях на 54% (*Sun B. O. et al., 2020*).

1.3.1. Воздействие микробных препаратов на агробиохимические параметры почвы и продуктивность агроценозов

С экологической точки зрения почва является динамической средой обитания для огромного разнообразия форм жизни (*Wiesmeier M. et al., 2019*). Почвенные микроорганизмы являются компонентами плодородия почв, в свою очередь несимбиотические почвенные или эндофитные бактерии, принадлежащие к родам *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Gluconacetobacter*, *Azoarcus*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Burkholderia*, *Herbaspirillum*, *Clostridium*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter* и *Pseudomonas*, способны фиксировать атмосферный N₂ и было установлено, что они отвечают за снабжение растений биологически фиксированным азотом, а также способны производить биоактивные метаболиты,

отвечающие за индукцию иммунитета у растений (*Altomare C., Tringovska I., 2011*).

Микроорганизмы являются важной и неотъемлемой частью почвы, влияя на различные биогеохимические циклы основных питательных веществ, таких как углерод, азот, сера, фосфор, они также обладают способностью подавлять почвенные патогены (*Sathya A., Vijayabharathi R., Gopalakrishnan S., 2016*). В качестве основных показателей микробной активности почвы и её естественного плодородия выступает активность почвенных ферментов (*Tabatabai M. A., 1994*). Активность почвенных ферментов связана с физико-химическими характеристиками почвы, структурой микробного сообщества, растительности и др. (*Amador J. A. et al., 1997; Waldrop M. P., Balsler T. C., Firestone M. K., 2000; Sinsabaugh R. L., Carreiro M. M., Repert D. A., 2002*). Caldwell B. A. (2005) рассматривает ферментативную активность почвы как прямое выражение метаболических потребностей почвенного сообщества и доступных питательных веществ (*Caldwell B. A., 2005*).

Ключевыми индикаторами реакции почвы на системы удобрений выступают кислотность, сумма обменных оснований, состав гумусовых кислот и активность ферментов азотного, углеводного и окислительно-восстановительного циклов, отражающие как позитивные, так и негативные эффекты агротехнологий (*Минеев В.Г. и соавт., 2004*). Среди ферментов, критически важных для поддержания плодородия, выделяют амилазу, арисульфатазу, β -глюкозидазу, целлюлазу, хитиназу, дегидрогеназу, фосфатазу, протеазу и уреазу (*Das S.K., Varma A., 2011*). Активность почвенных ферментов признана наиболее чувствительным маркером изменений плодородия (*Datt N., Singh D., 2019*), на которую влияют рН, содержание органического вещества, катионообменная емкость, дозы азотных удобрений и вид возделываемой культуры (*Chu B. et al., 2016*). При этом климатические изменения способны модифицировать ферментативную активность, нарушая циклы углерода, азота и фосфора в биосфере (*Gong S. et al., 2015*).

Крахмал как основной углеродный резерв растений подвергается гидролитической деполимеризации под действием амилазы (*Tu C.M., Miles J.R.W., 1976*). Активность каталазы — ключевого фермента оксидоредуктаз — служит индикатором минерализации гумуса: её повышение при длительном применении минеральных удобрений коррелирует со снижением содержания органического вещества (*Пуртова Л.Н. и соавт., 2022; Перминова Е.М. и соавт., 2016*). Каталаза нейтрализует токсичную H_2O_2 , образующуюся при дыхании растений и окислении органики (*Хазиев Ф.Х., 2005; Галстян А.Ш., 1978; Магда Е.В. и соавт., 2022*), что подтверждает её роль в биогеохимических циклах (*Зинченко М.К., 2017*).

Инвертаза, катализирующая гидролиз сахарозы, отражает интенсивность разложения органики (*Вяль Ю.А., Шиленков А.В., 2008; Воронин А.А. и соавт., 2006*). Протеазы, доминирующе продуцируемые микроорганизмами (*Greenfield L.M. и соавт., 2020*), регулируют азотный цикл, гидролизуя белки до аминокислот — доступного источника N для растений (*Jan M.T. и соавт., 2009; Geisseler D., Horwath W.R., 2008; Ortiz-Lopez A. и соавт., 2000*). *Bacillus* spp. синтезируют термостабильные протеазы с повышенной активностью в ризосфере (*Contesini F.J. и соавт., 2018; Vágnerová K., Macura J., 1974*).

Фосфатазы, продуцируемые растениями и микробиотой, определяют фосфорный режим почв. Их активность зависит от pH, состава органического вещества и агротехнологий: снижение на ранних стадиях вегетации пшеницы при внесении N-удобрений сменяется ростом в поздние фазы (*Пилецкая О.А., Прокопчук В.Ф., 2014*). Диагностика фосфатазной активности позволяет выявлять дефицит доступного P (*Стекольников К.Е., Комова А.В., 2017*), при этом органические удобрения усиливают её (*Щур А.В. и соавт., 2016*). Взаимосвязь pH, биоты и конформации ферментов определяет стабильность фосфатаз (*Herbien S.A., Neal J.L., 1990; Li Z. и соавт., 2019; Margalef O. и соавт., 2021*).

Изменение запасов гумуса в условиях климатических изменений коррелирует с активностью полифенолпероксидаз и полифенолоксидаз, регулирующих разложение лигнина и гумификацию (*Yakushev A.V. et al., 2014*). Последние катализируют окисление фенолов с участием кислорода атмосферы. Целлюлазы, ответственные за гидролиз целлюлозы (*Deng S.P., Tabatabai M.A., 1994*), опосредуют повышение плодородия через трансформацию органики целлюлозолитическими микроорганизмами (*Zhao Y. et al., 2005*). Их активность служит индикатором подавления фитофтороза ячменя (*Rasmussen P.H. et al., 2002*). Применение биопрепаратов (мизорин, ризоаргин) с NP-удобрениями повышает численность микробиоты, активность уреазы, амилазы, каталазы и инвертазы в 1,5-2 раза (*Пронько В.В. и соавт., 2009*), тогда как высокие дозы минеральных удобрений (N₄₅P₄₅) угнетают ферментативную активность (*Нарушева Е.А., 2012*). Обработка семян ячменя Флавобактерином и Мизорином усиливает биологическую активность почвы и продуктивность агроценозов (*Гамзаева Р.С., 2016*). Ассоциативные ризобактерии в биопрепаратах активизируют микробные процессы в чернозёмах (*Чевердин А.Ю. и соавт., 2019*).

Бактеризация семян пшеницы Ризоагрином и БиоВайсом повышает продуктивность, увеличивает численность полезных микроорганизмов и подавляет патогенные грибы в засушливых условиях (*Хамова О.Ф. и соавт., 2022*). На черноземе выщелоченном инокуляция ячменя Ризоагрином на фоне NP-удобрений и соломы усиливает накопление нитратного азота и подвижного фосфора (*Шулико Н.Н. и соавт., 2019*). Трехкомпонентный биопрепарат (*A. brasilense + B. circulans + T. longibrachiatum*) стимулирует развитие корневой системы, продуктивность стеблестоя и семян озимых культур на дерново-подзолистых почвах (*Михайловская Н.А. и соавт., 2021*).

Калиплант (*B. circulans*) улучшает аминокислотный состав белка пшеницы, а Азобактерин (*A. brasilense*) повышает содержание сырого протеина в зерне ячменя и ржи (*Лана В.В. и соавт., 2020*). Оптимальная доза N₆₀ кг/га на малогумусных дерново-подзолистых почвах усиливает симбиоз

растений с ризобактериями (*Воробейков Г.А. и соавт., 2011*). Эффективность взаимодействия PGPR с растениями зависит от сорто-штаммовой специфичности, при этом пшеница строже контролирует симбиоз, чем ячмень (*Кожемяков А.П. и соавт., 2004*). Биоплантом-К увеличивает фотосинтетическую активность и урожайность пшеницы как на минеральном, так и на биологическом фоне (*Курсакова В.С. и соавт., 2014*). Ризоторфин (*Rhizobium* sp.) регулирует распределение азота между основной и побочной продукцией гороха (*Алешин М.А., Завалин А.А., 2023*).

На черноземе выщелоченном в степном Поволжье применение БисолбиСана (*Bacillus spp.*) повышает продуктивность гречихи сорта Куйбышевская 85 (*Пронько В.В. и соавт., 2006*). Биологизация технологий возделывания озимой пшеницы увеличивает урожайность на 0,97 т/га, рентабельность и чистый доход (*Мажара В.М. и соавт., 2014*).

Обработка семян гороха сорта Ангела Экстрасолом обеспечивает прибавку урожая на 0,55 т/га (*Ситало Г.М. и соавт., 2015*). Для кукурузы препарат стимулирует развитие вегетативных органов и корневой системы, повышая урожайность силосной массы и фуражного зерна (*Ригер А.Н. и соавт., 2014*). В посевах сои Экстрасол увеличивает массу 1000 семян, количество бобов и продуктивность растения (*Сырмолот О.В., 2013*). У люпина инокуляция семян и некорневая обработка препаратом усиливают образование бобов без изменения числа семян в них (*Титова В.И., Судакова Т.Е., 2021*). В условиях Приморья Экстрасол повышает урожайность риса на 4.0-9.25 ц/га (*Илюшко М.В., Литвиненко В.Н., 2013*).

Применение биопрепаратов (БисолбиСан, Экстрасол и др.) и биологизированных технологий демонстрирует высокую эффективность в повышении урожайности различных сельскохозяйственных культур (гречиха, пшеница, горох, кукуруза, соя, люпин, рис). Эти методы не только увеличивают продуктивность, но и способствуют росту рентабельности и чистого дохода производства. Конкретные препараты показывают разнообразные агрономические эффекты: от стимуляции развития

вегетативных органов до усиления образования бобов и повышения массы семян. Таким образом, внедрение биотехнологий представляет собой перспективное направление для устойчивого развития сельского хозяйства.

Приведенные исследования демонстрируют эффективность биопрепаратов как альтернативы/дополнения к минеральным удобрениям. Внедрение микробных технологий способствует оптимизации выноса элемента питания и повышению эффективности использования минеральных удобрений (NPK) за счет активации физиолого-биохимических механизмов взаимодействия в системе «микроорганизм – растение – почва».

Исследования *Чеботаря В.К., Завалина А.А. и Ариткина (2014)* указывают на устойчивую динамику развития глобального рынка минеральных удобрений, обусловленную комплексом факторов: ограниченность резервов пахотных земель, демографический рост и др. Как отмечает *Захаренко В.А. (2022)*, модернизация аграрного сектора России позволила стране укрепить позиции в мировой индустрии удобрений, войдя в топ-5 производителей минеральных туков.

За период 1961–2022 гг. (по данным ФАО) потребление азотных удобрений (N) увеличилось на 841,29%, фосфорных (P) — на 284%, калийных (K) — на 310,78%, при этом среднегодовые объёмы использования составили: 71,14 млн. т. по азоту, 32,36 млн. т. по фосфору и 24,16 млн. т. по калию. Региональное распределение демонстрирует лидерство Азии по совокупному применению NPK, тогда как Европа занимает первое место по потреблению калийных удобрений (33,6% мирового объёма), что коррелирует с данными ФАО о высокой интенсивности земледелия в этих регионах. При этом, как отмечает *Захаренко В.А. (2022)*, Россия, входя в топ-5 мировых производителей минеральных туков, сохраняет дисбаланс в их применении внутри страны — объёмы внесения остаются ниже мировых норм (*Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б., 2020*), что актуализирует вопрос о рационализации использования удобрений как основы устойчивого развития АПК (*Ефремов Е.Н., 2019*).

Согласно FAO STAT (2022), глобальное потребление азотных удобрений (N) сократилось на 4,4% (-5,02 млн т) по сравнению с 2021 годом, при этом исторический максимум прироста (+7,85 млн т) зафиксирован в 1979 году. Среднегодовое потребление N за 1961–2022 гг. составило 71,53 млн т с темпом роста 7,5% (3,12 млн т/год), а прогнозируемый объём к 2050 году может превысить 140 млн т, особенно в диапазоне 96,1–113 млн т (накопленная частота). Рост спроса связан с демографическим фактором: по данным ООН (*Nations U., 2015*), население Земли к 2050 году превысит 9 млрд, что требует интенсификации сельского хозяйства (*Bashir M. T. et al., 2013*). Однако, как отмечают *Hazell P. и Wood S. (2008)*, чрезмерное применение N-удобрений усиливает экологические риски — от выщелачивания нитратов (NO₃, NH₄) до эмиссии закиси азота (N₂O), которая разрушает озоновый слой и влияет на климат (*Bouwman L. et al., 2013; Thompson R. L. et al., 2019*). Основные источники N₂O — Азия и Америка, где объёмы внесения синтетических туков максимальны (FAO STAT). При этом агротехнические методы снижения потерь азота, включая оптимизацию доз и борьбу с вредителями (*Hashimi R., Hashimi M. H., 2020; Altieri M. A., Nicholls C. I., 2003*), остаются критически важными для баланса между продовольственной безопасностью и экологической устойчивостью.

Ведение сельского хозяйства без применения минеральных и органических удобрений представляется невозможным. Однако внедрение изменений в подходы к управлению, направленных на повышение эффективности использования азота (N) на всех этапах пищевой цепи, приобретает стратегическое значение. Это необходимо для минимизации потерь азота в окружающую среду и снижения связанных с этим негативных последствий (*Springmann M. et al., 2018*).

В советский период минеральные удобрения в основном использовались внутри страны, однако значительная их часть терялась из-за несовершенной транспортировки и хранения (*Левкевич Р.Е., Сенотрусова С.В., 2023; Левкевич Р.Е., Сенотрусова С.В., Христианов К.Н., 2023*). В

настоящее время под зерновые культуры в России вносится в среднем 45 кг/га NPK, включая 25–30 кг/га азота — уровня, недостаточного для полноценного питания растений и обеспечения высокого качества продукции (Сычев В.Г., Милащенко Н.З., Шафран С.А., 2018).

Производство минеральных удобрений в СССР достигло пика в 1980-х годах (+5502 тыс. т), после чего резко сократилось в 1990-х (минимум — 6340 тыс. т в 1995 г.). К 2022 году общий объём производства вырос на 275,8% по сравнению с 1970 годом (на 17 294 тыс. т), достигнув 23 866 тыс. т, при среднегодовом приросте 5,2% (665,15 тыс. т). Однако в 2022 г. по сравнению с 2021 г. производство сократилось на 10,8% (на 2863 тыс. т) (по данным Росстата).

По азотным удобрениям наблюдается устойчивый рост: в 2022 году производство увеличилось на 4,5% (на 518 тыс. т) по сравнению с 2021 годом, а с 1970 года — на 334,4% (на 9177 тыс. т). Среднегодовой объём производства азотных удобрений в 1970–2022 гг. составил 7778,71 тыс. т, при ежегодном приросте 5,8% (352,96 тыс. т). Прогнозируется, что к 2030 году он превысит 15 000 тыс. т (Дюжева Н. В., Тинькова А. А., 2020; Алтухов А. И., Сычев В. Г., Винничек Л. Б., 2019).

Внешний спрос остаётся ключевым драйвером развития отрасли, поскольку внутренний спрос не покрывает производственные мощности (Алтухов А. И., Сычев В. Г., Винничек Л. Б., 2019). При этом с 2018 по 2022 год отмечается рост внесения удобрений: азотных — на 3,42%, фосфорных — на 1,66%, калийных — на 2,55%, что свидетельствует о постепенной интенсификации агропроизводства.

Азотные удобрения остаются наиболее востребованными, поскольку на их долю приходится около половины прироста урожайности (Рыжкова С. М., Кручинина В. М., 2021). Несмотря на уникальную производственную базу по всем видам удобрений в России (Волкова А.В., 2017), повышение их эффективности использования становится стратегической задачей. В этом контексте особое значение приобретает внедрение инновационных и

экологически безопасных решений, включая микробные препараты и умные технологии внесения, что позволит минимизировать потери и снизить нагрузку на окружающую среду (Ибиев Г.З., Савоськина О.А., Чебаненко С.И., 2021).

1.3.2. Симбиотические особенности бактерий рода *Bacillus* в ассоциациях с растениями

Почва выполняет важную функцию в росте и развитии растений, которая содержит микроскопические формы жизни, играющие значительную роль в обеспечении плодородия почвы (Gavrilescu M., 2021). Микроорганизмы выполняют большой спектр экосистемных функций в почве, таких как высвобождение питательных веществ из минералов, азотфиксация и агрегация почвы, формирование органического вещества, показано, что фрагменты оболочек микробных клеток вносят значительный вклад в образование гумуса (Gadd G.M., 2007; Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., et al., 2009; Miltner, A., Bombach, P., et al., 2012). Микроорганизмы в процессе эволюции развили различные механизмы поглощения и ассимиляции минеральных и органических форм азота (Merrick M. J., Edwards R. A., 1995). Большая часть азота, поступающего в почву, находится в форме полимеров, которые сначала должны быть расщеплены на более мелкие единицы внеклеточными ферментами, т.е. цикл азота обусловлен деполимеризацией N-содержащих полимеров, при этом образуются мономеры, которые и используются растениями (Schimel J. P., Bennett J., 2004). Катион аммония считается предпочтительным источником азота для бактерий (Merrick M. J., Edwards R. A., 1995).

Среди бактерий основными кандидатами на благотворное воздействие на растения являются виды родов *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Herbaspirillum*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* и *Serratia* (Mia M. A. B., 2022). Род

Rhizobium хорошо известен в сельском хозяйстве по его способности вступать в симбиотические отношения с корнями бобовых растений с образование клубеньков, а в свою очередь род *Bacillus* в сельском хозяйстве применяется сравнительно недавно и молекулярные механизмы фиксации N₂ изучены недостаточно. Интересные исследования, проведенные Omri Gilhar (2024) и коллегами, которые показали, что бактерии развивают память, позволяющая им адаптироваться к растениям - хозяевам в течение нескольких поколений за счет активации системы реагирования на стресс, что обеспечивает им преимущество в конкурентной борьбе.

Для вступления в симбиоз с корнем *Bacillus subtilis* необходимо на его поверхности образовать пленку, которая индуцируется молекулами растительного происхождения, такими как полисахариды клеточной стенки (Beauregard P. B. et al., 2013) и яблочная кислота (Chen, Y., Cao, S., Chai, Y., Clardy, J., Kolter, R., Guo, J. H., et al., 2012). Allard-Massicotte R. et al. (2016) предлагает следующий механизм образования симбиоза *Bacillus subtilis* с небобовыми растениями; *B. subtilis* притягивается к корню молекулами, выделяемыми растениями, и первый контакт с поверхностью корня зависит от способности бактерии двигаться к растению. Стойкое сцепление бактериальных клеток с поверхностью является первым шагом в формировании биопленки - сложного сообщества бактерий, заключенных в самостоятельно производимую экзополимерную матрицу (Flemming H. C., Wingender J., 2010).

Колонизация корней растений - сложный процесс, включающий в себя несколько этапов, первым из которых является притяжение к корню, второй - закрепление бактерий в корне и использование питательных веществ растительного происхождения (Posada L.F., et al., 2018). Хемотаксис — это процесс, при котором бактерии ощущают свою химическую среду и движутся к более благоприятным условиям (Yssel A., Reva O., Tastan Bishop O., 2011). Основная функция бактериального хеморецептора заключается в том, чтобы помочь в установлении прочной полезной взаимосвязи между

растением и бактериями, кроме того, виды *Bacillus* могут образовывать эндоспоры, которые чрезвычайно устойчивы к суровым условиям окружающей среды (Hashem A., Tabassum B., 2019). Л.Ю. Кузьмина, Т.Н. Архипова (2014) обнаружили, что колонизация поверхности корня проростков пшеницы штаммами *Bacillus subtilis*, вызывает значительные изменения в содержании цитокининов в растениях. А.А. Егоршина, Р.М. Хайруллин (2012) показали, что у проростков пшеницы сорта Казахстанская 10 при обработке эндофитным штаммом *Bacillus subtilis* наблюдается ускорение роста побегов и корней растения, а также транзитно повышался уровень гормонов ИУК и АБК (Егоршина А.А., и др., 2012). В аспекте взаимоотношений растений с эндофитными микроорганизмами практически не изучены тройственные симбиозы, которые могут формироваться с участием растительных организмов, эндофитных бактерий и микоризообразующих грибов, но, в условиях засухи показатели микоризации корней растений уменьшались, та же тенденция наблюдалась и при обработке семян эндофитными бактериями (Кураמיшина З. М., Хайруллин Р. М., Сатарова Л. З., 2015). В литературе показано, что инокуляция семян клетками *B. subtilis* снижает токсический эффект тяжелых металлов, например, никеля что проявляется в сохранении фотосинтетической активности и лучших показателях роста растений пшеницы (Смирнова Ю. В., Кураמיшина З. М., Гомоненко О. В., 2018).

Таким образом, симбиотические отношения между растениями и бактериями рода *Bacillus subtilis* берут своё начало в ризосфере растений, путем образования устойчивых биопленок микроорганизмов на поверхности корня. Устойчивость биопленки определяется двумя факторами: физико-химическим составом почвы и корневыми экссудатами растений.

Глава 2. Объекты, условия и методика проведения экспериментального исследования

2.1. Объекты исследования и их характеристика

В исследовании применялись два сорта гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum* Moench) – Дикуль (селекция ФГБНУ ФНЦ зернобобовых и крупяных культур, 2001 г.) и Даша (совместная разработка ФГБНУ ФНЦ ЗБК и Орловского ГАУ им. Н.В. Парахина), характеризующиеся контрастными агрономическими признаками. В качестве биологического фактора воздействия применён микробный препарат Экстрасол (ООО «Бисолби-Интер», г. Пушкин), зарегистрированный под №174 – 19 – 1434 – 1 и разработанный при участии ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии.

Основу препарата составляет штамм *Bacillus subtilis* Ч-13, обладающий полифункциональной активностью: продуцируя фитогормоны (ауксины, гиббереллины, цитокинины), витамины и антимикробные метаболиты, он стимулирует ростовые процессы растений, повышает доступность макроэлементов за счёт ферментативного гидролиза труднорастворимых соединений в ризосфере и усиливает азотный обмен через частичную фиксацию атмосферного азота. Кроме того, антагонистическая активность штамма в отношении фитопатогенов снижает инфекционную нагрузку на агроценозы. Комплексное действие Экстрасола® направлено на оптимизацию агрохимических параметров почвы (содержание подвижного фосфора, обменного калия, гуминовых кислот) и повышение продуктивности культур в условиях дефицита минерального питания, что особенно актуально в контексте данных о недостаточных нормах внесения в российском земледелии.

Гречиха сорта Дикуль (2001 г.) – хорошо зарекомендовавший себя сорт гречихи. Разновидность – алята. Авторы сорта: Н.В. Фесенко, Г.Е. Мартыненко, С.В. Бобков, А. Молотков. Патент № 1209, 24.12.2001. Плоды

средние, окраска серая, серо-коричневая, крылья средние. Масса 1000 зерен – 28-32 г. Окраска бутонов и венчиков – белая, бело-розовая, размер средний. Высокая устойчивость к полеганию. Отзывчив на внесение удобрений. Метод создания: многократный негативный и массовый отбор из гибридной комбинации Д-13 х на детерминантность, мелколистность, хорошо развитый главный побег и крупную озерненную кисть. Средняя урожайность зерна в Центрально-Черноземном регионе 1,74 т/га. Допущен к использованию в Центральном, Центральном – Черноземном, Волго-Вятском, Нижневолжском, Восточно-Сибирском, Западно-Сибирском и Средневолжском регионах Российской Федерации.

Гречиха сорта Даша (2015 г.) – новый сорт гречихи. Авторы сорта: А.Н. Фесенко, И.Н. Фесенко, Н.Н. Фесенко, О.А. Шипулин, О.В. Бирюкова, А.В. Амелин и др. Патент №9606, 30.11.2015. Среднеспелый короткостебельный детерминантный сорт. Vegetационный период на уровне сорта Дикуль. Главное отличие от сорта Дикуль заключается в экономном габитусе соцветия. Обладает повышенной устойчивостью как к пониженным температурам в период прорастания семян, так и к засухе, что актуально в условиях Московской области. Высокоурожайный, максимальная урожайность – 4,5 т/га. Сорт отзывчив на внесение минеральных удобрений в умеренных дозах. Средняя масса 1000 зерен – 30,4 г. Может обеспечивать получение высоких урожаев без применения минеральных удобрений. Допущен к использованию в Центральном, Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском регионах Российской Федерации.

В опытах по установлению действия биомодифицированных азотных удобрений на рост и развитие растений гречихи использовались: карбамид (мочевина) и сульфат калия. Азот – основное действующее вещество карбамида ((NH₂)₂CO), содержащего – 46,2% N в амидной форме. В качестве фона использовали сульфат калия, содержащий 50% K₂O, а также серу – 17% S. Гречиха – калиелюбивая культура, но негативно реагирует на повышение

концентрации ионов Cl^- в почвенном растворе, поэтому нами, чтобы избежать искусственное угнетение культуры, в качестве фона применялся K_2SO_4 .

2.2. Методика постановки лабораторных и полевых опытов

Полевой мелкоделяночный опыт проводили в 2023-2025 гг. в Московской области. Опытный участок расположен на территории ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет» (55.796980, 39.012410). Почва опытного участка классифицируется как дерново-слабоподзолистая глееватая легкосуглинистая. Общая площадь посевов 0,01 га, общая площадь делянок - 2 м², учетная - 1 м². Повторность опытов четырехкратная (прил. А, Б, В, Г, Д), размещение вариантов - систематическое.

Основные агрохимические свойства почвы опытного участка (среднее 2023 – 2025 гг.): $\text{pH}_{(\text{сол.})} = 6,83$ (нейтральные), $\text{Нг} = 2,86$ мг*экв /100 г почвы, $\text{S} = 7,66$ мг*экв /100 г почвы, содержание N-NO_3 (0-20 см) = 5,18 мг/кг почвы, $\text{N-NH}_4 = 3,03$ мг/кг почвы, подвижного P_2O_5 (по Кирсанову) = 181 мг/кг почвы (V класс, высокая обеспеченность), K_2O (по Кирсанову) = 134 мг/кг почвы (IV класс – повышенное содержание), $\text{N}_{\text{общ.}} = 0,07\%$, гумус (по Тюрину в модификации Симакова) – 2,63%, $\text{N}_{\text{щ.г.}}$ (по Тюрину и Кононовой) = 32,5 мг/кг (II класс – низкое).

Для определения основных агрохимических показателей почвы использовали стандартные методики: кислотность солевой вытяжки - $\text{pH}_{(\text{сол.})}$ по *ГОСТ 26483-85*, гидролитической кислотности (Нг) (*ГОСТ 26212-2021*) по методу Каппена в модификации ЦИНАО с помощью 1 н. раствора CH_3COONa , определение суммы поглощенных оснований в почве по Каппену – Гильковицу (*ГОСТ 27821-2020*), содержание N-NO_3 в почве определялось колориметрическим методом с дисульфифеноловой кислотой с использованием коэффициента 0,226 для пересчета содержания нитратов (NO_3^-) в нитратный азот (N-NO_3) в водной вытяжке, определение содержания аммонийного азота в почве осуществлялось колориметрическим методом по

Е.В. Аринушкиной с использованием реактива Несслера при $\text{pH} > 7$ (0,778 – коэффициент пересчета содержания аммония (NH_4) в аммонийный азот (N-NH_4)); содержание минерального азота ($\text{N}_{\text{мин}}$) – математическим методом как сумму нитратного и аммонийного форм азота ($\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$).

Определение содержания подвижного фосфора и калия в почве вели по методу Кирсанова, фосфор – колориметрическим методом, калий – пламенно-фотометрическим. Содержание общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$) проводили согласно ГОСТ Р 58596-2019. Гумус - по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова с использованием 0,2%-ного раствора фенилантраниловой кислоты ($\text{C}_{13}\text{H}_{11}\text{NO}_2$). Определение легкогидролизуемого азота по Тюрину и Кононовой с обработкой почвы 0,5 н раствором H_2SO_4 . Колориметрическое определение содержания подвижных форм азота осуществлялось на спектрофотометре марки ЭКОВЬЮ В-1200. Определение азота, фосфора и калия в образцах растений (зерно и солома) осуществлялось по стандартным методикам. Азот по методу Кьельдаля, фосфор и калий на пламенном фотометре.

В октябре 2022 года была осуществлена основная вспашка почвы с использованием трактора МТЗ 82.1-23/12 в комплекте с оборотным плугом Unia IBIS L 3+1, оснащённым болтовой защитой. В ноябре была проведена культивация почвы с применением культиватора КНС-4,0 для сплошной обработки. Весной 2023 года для дополнительной обработки почвы использовали минитрактор SHIFENG SF-240 с фрезой ФС-1,4. В последующие сезоны посадки, в 2024 и 2025 годах, для подготовки почвы применяли комбинацию культиватора КНС-4,0 и минитрактора SHIFENG SF-240.

Семена высевали вручную рядовым способом на глубину 2–3 см. Посев осуществляли при температуре почвы 15–18 °С и влажности воздуха около 70%. Расстояние между рядками составляло 7 см. Норма высева — 175 семян на площадь 0,95 м², что соответствует примерно 3 миллионам всхожих семян на гектар. Всего – 64 делянки. В качестве контроля использовались делянки

без внесения удобрений, а фоном служил K_{60} . Предшественником в годы исследования был занятый пар. Перед посевом, который проводился в третьей декаде мая, семена проверяли на жизнеспособность по ГОСТ 12039-82 и всхожесть по ГОСТ 12038-84.

Схема опыта включала два фактора. Фактор А (3 дозы азота) – N_{30} , N_{60} , N_{90} , которые изучали на калийном фоне – K_{60} . Фактор В (биомодификация карбамида): без биомодификации и с инокуляцией препаратом «Экстрасол®». В качестве контроля выступал вариант без внесения удобрений. Приведённая схема применялась для обоих изучаемых сортов – Даша и Дикуль.

Фосфорные удобрения в качестве фоновых не вносили вследствие высокой обеспеченности подвижным фосфором почвы (5-й класс), а также способностью корневой системы гречихи усваивать труднорастворимые фосфаты из почвы.

Для инокуляции (обработки) гранул карбамида использовали микробиологический препарат «Экстрасол®» из расчета 0,1 мл/г карбамида. Процесс проводили вручную с точным соблюдением дозы. Полученную смесь помещали на сутки (24 часа) в условия, защищённые от света и с постоянной температурой 25 °С, для инкубации. После завершения этапа обработанный карбамид однократно внесли в почву в дозах, согласно схеме опыта из расчёта 30, 60 и 90 кг д.в./га.

Для определения биомассы почвенных микроорганизмов применяли методику, разработанную Благодатским, Мирчинк и Паниковым. Суть метода заключается в следующем: при обезвоживании клеток микроорганизмов при температуре 65 °С внутриклеточные компоненты высвобождаются в раствор. Калибровка проводилась с использованием глюкозы, а колориметрическое измерение рабочего раствора осуществлялось при длине волны $\lambda=590$ нм. Полученное по графику содержание С (мг) пересчитывали в углерод микробной биомассы $C_{м/б}$ (мг/1 г абс.-сух.почвы) по формуле 1.

(1)

Расчет углерод микробиомассы, мг/1 г абс. сух. почвы

$$C_{мб} = \frac{(C_{п} - C_{с}) * K_{w}}{0,3 * m}$$

где $C_{мб}$ – углерод микробной биомассы, мг/1 г. абс.-сух. почвы; $C_{п}$ – углерод микробной биомассы подсушенной почвы, мг; $C_{с}$ – углерод микробной биомассы свежей почвы, мг; 0,3 – поправочный коэффициент, примерно равный доле клеточных компонентов, высвобождаемых после регидратации; m – навеска почвы, г; K_{w} – поправка на влажность почвы.

Для измерения актуального дыхания почвы использовался титриметрический метод, разработанный Карпачевским. Суть метода заключается в химическом улавливании углекислого газа (CO_2), выделяемого почвой, с помощью раствора 0,1 н NaOH, который помещался в стеклянный стаканчик на уровне поверхности почвы. Затем проводился процесс титрования с использованием 0,1 н раствора HCl. Параллельно с этим проводился эксперимент, не связанный с поверхностью почвы. Результаты эксперимента обрабатывались по формуле 2.

(2)

Расчет актуального дыхания почвы CO_2 , кг/га в час

$$D = \frac{(V_{оп} - V_{контр.}) * 0,1 * 0,000022 * 10^8 * 60}{S * 20}$$

где, D – интенсивность дыхания почвы, мг CO_2 /10 г абс.-сух.почвы/24 ч; $V_{оп}$ – объём HCl, пошедший на титрование опытного образца, мл; $V_{контр.}$ – объём HCl, пошедший на титрование контрольного образца, мл; 0,1 нормальность кислоты, 0,000022 – количество CO_2 , эквивалентное 1 мл 1н. HCl, кг; 10^8 – коэффициент перевода cm^2 в га; 60 – количество минут в 1 часе; S – площадь поверхности поглотителя, 20 – время опыта, мин.

Уреазная активность определяется путём измерения количества аммиака, который образуется при гидролизе мочевины. Для этого используют реактив Несслера, который позволяет выявить окрашенные компоненты. Исследование уреазной активности проводилось с помощью фотоэлектроколориметрического метода по методике, предложенной И. Н.

Ромейко и С. М. Малинской в 1963 году, как описано в руководстве по определению азота (*Аринушкина, 1970*).

Длительность экспозиции составила 3 часа. Для измерения активности уреазы в почве использовался калибровочный график, который был создан для определения содержания ионов аммония ($N-NH_4$) в образцах почвы.

Биомассу почвенных микроорганизмов, эмиссию CO_2 , проводили в фазу всходов, ветвления и созревания растений. Уреазную активность почвы проводили в стадию всходов, начала цветения, созревания растений. Содержание $N-NO_3$, $N-NH_4$ и N_{min} в стадию всходов, цветения и созревания растений.

Таким образом, выбор фаз роста растений позволяет: проследить динамику изменений в почве в течение вегетационного периода, выявить взаимосвязь между ростом растений и состоянием почвенной среды, оценить влияние агротехнологии на плодородие почвы и продуктивности растений, разработать рекомендации по оптимизации условий выращивания гречихи.

В фазу цветения происходят значительные метаболические изменения в растениях, что влияет на их взаимодействие с почвой. на стадии созревания происходит формирование урожая и отток питательных веществ из почвы. В фазу ветвления происходит интенсивный рост растений, увеличивается из биомасса и потребление питательных веществ.

Для измерения содержания сахара в цветках гречихи применялся рефрактометрический метод. С каждой делянки отбирали по 50 цветков, помещали их в колбу объёмом 250 мл и заливали 100 мл дистиллированной воды.

Затем содержимое колбы тщательно взбалтывали и оставляли на 20 минут для экстракции. После этого раствор фильтровали, и полученный фильтрат применяли для определения количества сахаров.

Валовый сбор сахара определяли с помощью математических расчётов. Для определения содержания хлорофиллов а и b, а также каротиноидов применялась система уравнений Вернона (формула 3). После выполнения

расчётов проводился анализ полученных данных с целью установить концентрацию пигментов в растениях.

(3)

Расчет содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях растений

$$C_{\text{хл. a}} = 11,63 * D_{665} - 2,39 * D_{649}$$

$$C_{\text{хл. b}} = 20,11 * D_{649} - 5,18 * D_{665}$$

$$C_{\text{х}} = 4,75 * D_{452} - 0,226 * (C_{\text{хл. a}} + C_{\text{хл. b}})$$

где, D – оптическая плотность растворов, C – концентрация хлорофилла a и b , каротиноидов мг/л.

Для определения содержания рутина в соломе и лузге гречихи сначала определяли влажность материала, высушивая 2 г сырья в сушильном шкафу при температуре 105°C. Затем сырьё измельчали до размера частиц, проходящих через сито с диаметром отверстий 2 мм, и 1 г помещали в коническую колбу объёмом 250 мл. Сырьё заливали 70% этанолом и нагревали на кипящей водяной бане в течение 30 минут. Экстракцию повторяли трижды и объединяли экстракты.

Далее замеряли объём извлечения и смешивали 5 мл 70% раствора этанола с 3–4 мл исследуемой вытяжки. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре при длине волны 361 нм. Для расчёта содержания рутина в пересчёте на абсолютно сухое вещество использовали формулу 4.

(4)

Определение содержания рутина в сырье гречихи, %

$$X = \frac{A * V_{\text{изв.}} * V_{\text{разв.}} * 100\%}{D * m * (100 - W\%) * V_{\text{алик.}}}$$

где, A – оптическая плотность исследуемого раствора; D – оптическая плотность раствора стандартного образца (216,65), V – объём извлечения (мл), $V_{\text{разв.}}$ – объём разведения, m – масса навески, $W\%$ – влажность растительного материала, $V_{\text{алик.}}$ – объём аликвоты, взятой для проведения анализа.

Для определения площади поверхности листьев применялся метод высечек (Корнилов, 1968). Площадь листьев определяли по формуле 5.

(5)

Определение площади листьев

$$S = \frac{(a * c)}{b}$$

где, а – общая масса сырых листьев (г), b – общая масса сырых высечек (г), с – общая площадь высечек (см²).

Определение фотосинтетического потенциала (ФП) посевов проводили в фазу цветения (м²/га*сут) (Ничипорович А.А., 1961) (формула 6).

(6)

Определение фотосинтетического потенциала посевов, м²/га*сут

$$\text{ФП} = \frac{S_1 + S_2}{2} * D$$

где, S₁ – площадь листьев в начале периода наблюдений (тыс. м²/га), S₂ – площадь листьев в конце периода наблюдений (тыс. м²/га), продолжительность периода наблюдений в сутках.

Наступление фаз фиксировали методом глазомерного наблюдения по появлению 75% признаков. Учет густоты стояния растений проводили по стандартной методике. Сохранность и общую выживаемость растений гречихи рассчитывали математически.

Содержание в % азота, фосфора и калия (NPK) в различных частях растений проводили по общепризнанным методикам. Азот - по Кьельдалю, фосфор – спектрофотометрическим методом, калий – на пламенном фотометре.

Урожайность культуры проводили сплошным методом. Обмолот урожая осуществляли вручную. Для приведения урожая к стандартным условиям проводили перерасчёт на стандартную влажность в 14 % по общепринятой методике.

Масса 1000 семян определяли в соответствии с ГОСТ 12042-80, а процент пленчатости — по ГОСТ 10843-76. Урожайность зелёной массы устанавливали методом взвешивания. После обмолота снопов проводили измерения высоты растений, длины и толщины междоузлий, количества боковых побегов и их длины.

В стадию цветения растений количество цветов и соцветий определяли методом прямого подсчёта. Перед обмолотом снопов прямым подсчётом и взвешиванием определяли число плодов на главном и боковых побегах. Содержание белка и жира в зерне гречихи определяли при помощи БИК-анализа. Валовой сбор — математическим методом. Для характеристики влагообеспеченности территории выращивания, гидротермический коэффициент (ГТК) за тёплый период времени по формуле Г.Т. Селянинова в 2023 г. — 1,3 (зона — обеспеченного увлажнения), в 2024 г. — 1,44 — (зона обеспеченного увлажнения), 2025 г. — 1,9 (зона обеспеченного увлажнения).

Для обработки экспериментальных данных был проведен двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA), что позволило оценить влияние двух независимых факторов (А и В) и их взаимодействие (АхВ) на зависимую переменную. Для количественной оценки взаимосвязей между переменными применялся многоуровневый корреляционно-регрессионный анализ.

Графическая интерпретация выполнена в Microsoft Excel 365 с использованием интерактивных диаграмм рассеяния с линиями тренда (полиномиальными, экспоненциальными, линейными) для визуализации регрессионных моделей, столбчатых диаграмм с 95% доверительными интервалами для представления групповых различий. Каждая визуализация сопровождалась аннотациями. Экспорт графиков в векторном формате (.svg) для сохранения разрешения для публикации.

2.3. Метеорологическая характеристика периодов проведения экспериментального исследования

Погодные особенности местности выращивания связаны с её географическим положением. Город Орехово-Зуево расположен в Московской области, на реке Клязьме, в пределах Мещерской низменности. Гречиха относится к теплолюбивым культурам с коротким вегетационным периодом. Прорастание семян происходит при температуре 7-8 °С, оптимальная температура для появления равномерных всходов – 15-22 °С. Период цветения и созревания является наиболее важным для формирования урожая. Данные получены с ближайшей метеостанции Павловский Посад.

Анализ минимальный температур за 2023-2025 гг. в сравнении с многолетней нормой показывает следующие тенденции: в большинстве периодов 2023-2025 гг. значения выше многолетней нормы, особенно заметно в 2024 г. В 2024 г. зафиксированы рекордные отклонения: +4,7°С к норме в период 11-20 июня и 3,2°С в период 11-20 июля. В 2023 г. аномалии отмечены в период 1-10 июля (+0,2°С) и 11-20 августа (+3,3°С), а в 2025 г. – период 11-20 июля (+3,2°С). Конец августа 2025 г. (21-31 августа) характеризуется сильным похолоданием: 9,9°С при норме 13,7°С, что является самым резким отрицательным отклонением за весь период. Сезонные изменения показывают, что в июне-июле доминируют температуры выше нормы (особенно в 2024 г.), а август демонстрирует нестабильность: в 2023 г. начало августа было на +4,0°С выше нормы, а в 2025 г. конец августа – на -3,8°С ниже нормы. Таким образом, данные свидетельствуют о климатической нестабильности с резкими перепадами между годами и внутри сезонов, тренде на потепление (особенно выраженным в 2024 году) и локальных минимумах, которые могут быть связаны с изменением циркуляции атмосферы (рис.2).

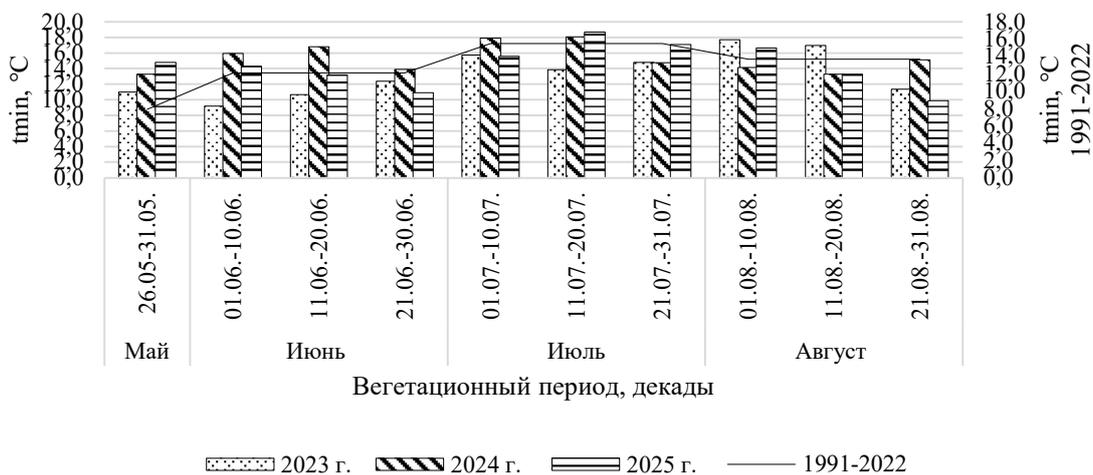


Рисунок 2. Минимальные температуры воздуха за вегетационный период (ночное время суток), °C

Примечание: 2025 г. – самый аномальный по похолоданиям, особенно в конце лета (21-30 июня $-1,2^{\circ}\text{C}$ ($10,9^{\circ}\text{C}$ при норме $12,1^{\circ}\text{C}$, отклонение $-9,9\%$; 21-31 августа 2025 г. – $3,8^{\circ}\text{C}$ ($-2,4^{\circ}\text{C}$ за 2024 г. отклонение $-17,5\%$) отклонение $-27,7\%$). 2023 г. – среднее отклонение $+1,3^{\circ}\text{C}$ (преобладает слабое потепление), 2024 г. среднее отклонение $+3,1^{\circ}\text{C}$ (самый теплый год), 2025 г. среднее отклонение $-0,8^{\circ}\text{C}$ (преобладает слабое похолодание).

Анализ дневных температур показывает доминирование аномалий потепления, особенно в 2024 г., когда почти все периоды имели температуры выше нормы. В 2023 г. и 2025 г. аномалии менее выражены, но также преобладает потепление, за исключением отдельных периодов. В 2024 г. $+8,5^{\circ}\text{C}$ к норме в период 26.05-31.05 и $+4,9^{\circ}\text{C}$ в период с 01.07-10.07. В 2023 г. $+4,9^{\circ}\text{C}$ в период с 01.08-10.08, в 2025 г. $+4,4^{\circ}\text{C}$ в период с 11.07-20.07. Сравнение с минимальными температурами показывает синхронное похолодание в конце августа 2025 г. и усиление дневной жары в июле 2025 г.

В 2025 г. $-1,7^{\circ}\text{C}$ в период 21.06-30.06 и $-2,8^{\circ}\text{C}$ в период 21.08-31.08. В 2024 г. незначительное похолодание в период 01.08-10.08 ($-0,3^{\circ}\text{C}$). В 2023 г. пиковые значения за период 01.08-10.08 ($+4,9^{\circ}\text{C}$) и похолодание в период 21.08.-31.08 ($-1,9^{\circ}\text{C}$). В 2024 г. лето с аномально ранней жарой в конце мая ($+8,5^{\circ}\text{C}$) и снижением в августе. В 2025 г. контрасты между пиковой жарой в июле ($+4,4^{\circ}\text{C}$) и резким похолоданием в августе ($-2,8^{\circ}\text{C}$), а также прохладный июнь. Таким образом, 2024 г. – самый жаркий год ($\Sigma\Delta T=253,7^{\circ}\text{C}$), 2025 г. – самый контрастный с рекордной жарой в июле и резким похолоданием в августе ($\Sigma\Delta T=235,7^{\circ}\text{C}$). В 2023-2024 гг. антициклоны дольше задерживались

над регионом в начале августа. В 2025 г. циклоны в июне «сдвинули» пик жары на середину июля (рис.3).

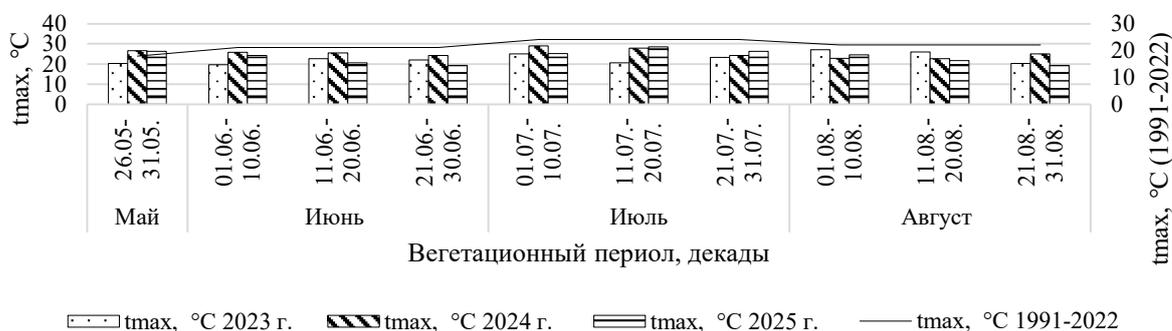


Рисунок 3. Максимальные температуры воздуха за вегетационный период (дневное время суток), °C

Примечание: $At > 14^{\circ}\text{C}$ (2023 г.: $14,1^{\circ}\text{C}$ (11-20.07); 2024 г.: $15,0^{\circ}\text{C}$ (11-20.07); 2025 г.: $14,9^{\circ}\text{C}$ (21-31.07)). $At < 10^{\circ}\text{C}$ (2023 г.: $8,0^{\circ}\text{C}$ (21-31.08); 2024 г.: $9,9^{\circ}\text{C}$ (21-31.08), 2025 г.: $8,5^{\circ}\text{C}$ (21-30.06)). Амплитуда температур 2023-2025 гг. превышает норму на 1-5°C, особенно в июле. Июльские периоды демонстрируют рекордные перепады (до +5°C к норме). Аномально высокие амплитуды 2024 г. совпадают с фазой Эль-Ниньо, усилившей меридиональную циркуляцию. За 2000–2025 гг. средняя амплитуда увеличилась на 1,2°C, что соответствует моделям IPCC.

Анализ средних температур за период 2023 – 2025 гг. в сравнении с нормой (1991-2022 гг.) демонстрирует рост климатической нестабильности, проявляющийся в смещении сезонных пиков, усилении амплитуд. В 2023 г. наиболее теплым периодом стало начало августа (01.08.-10.08: +4,5°C к норме).

В 2024 г. зафиксировано резкое потепление в мае – июне (26.05-20.06: +5-7°C к норме), но похолодание в августе. 2025 г. отметился экстремальными контрастами: рекордное тепло в июле (11-20.07: +3,1°C к норме) и сильное похолодание в конце августа (21-31.08: -3,4°C к норме).

Сезонные сдвиги включают смещение пиков жары: в 2023 году — начало августа, в 2024 — май — июнь, в 2025 — середина и конец июля. Укорочение тёплого периода в 2025 году на 10–15 дней связано с резким похолоданием после 20 августа.

Климатические индикаторы, такие как усиление меридиональной циркуляции и влияние океанических течений (Эль-Ниньо в 2024), объясняют резкие перепады температур (рис. 4).

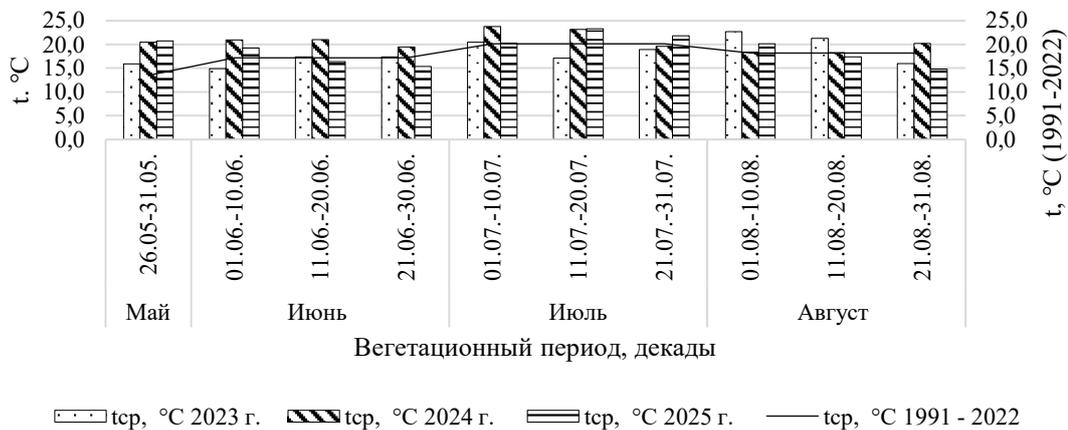


Рисунок 4. Температура воздуха за вегетационный период 2023-2025 гг., °C

В 2023 году наблюдался дефицит осадков в большинстве периодов, особенно в мае — июне (26.05–20.06: 17,2–36,4 мм при норме 40,4–58,7 мм), но был аномально влажный июль (21–31.07: 60,8 мм при норме 55,9 мм). В 2024 году зафиксированы рекордные дожди в середине июня (11–20.06: 110,4 мм при норме 58,7 мм) и дефицит осадков в конце мая (26–31.05: 3,7 мм при норме 40,4 мм). 2025 год отметился экстремальными осадками в середине июня (11–20.06: 126,6 мм при норме 58,7 мм) и недостатком влаги в конце августа (21–31.08: 15,6 мм при норме 52,2 мм) (рис.5).

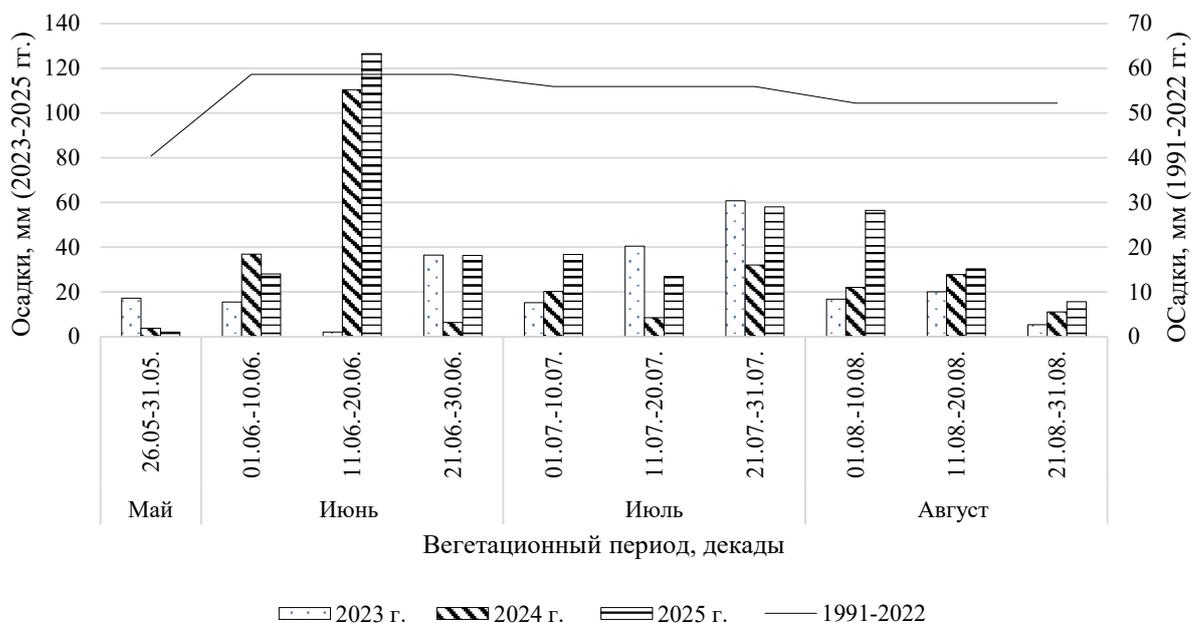
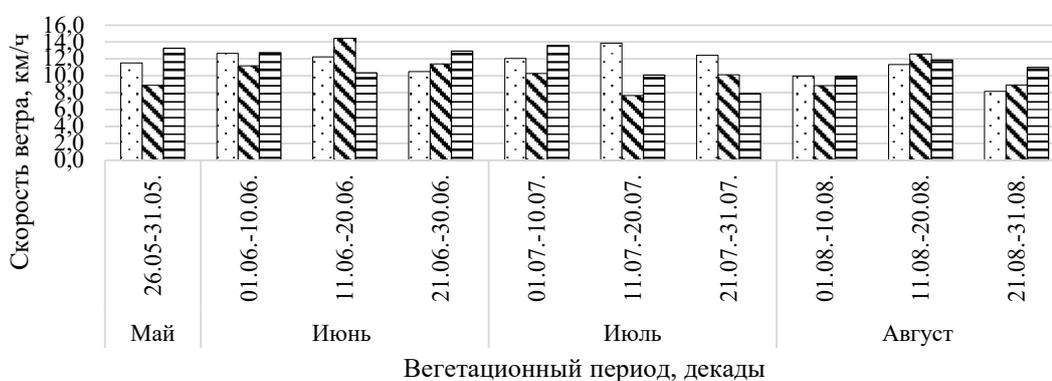


Рисунок 5. Количество осадков, мм

Данные за 2023 – 2025 гг. показывают, что скорость ветра в большинстве периодов соответствовала 1-3 баллам по шкале Бофорта (слабый или умеренный ветер). Однако в отдельных случаях наблюдались кратковременные усиления до 4 баллов (умеренный ветер) (рисунок 6).

В период с мая по август 2023–2025 годов наблюдается вариативность скорости ветра с выраженными сезонными тенденциями. Наиболее ветреным оказался 2023 год (максимум 13,9 км/ч в середине июля), тогда как 2024 год отличался минимальными значениями (минимум 7,7 км/ч в тот же период). 2025 год характеризуется умеренными показателями, но с резкими перепадами: от 13,6 км/ч в начале июля до 7,9 км/ч к его концу.



□ Скорость ветра, км/ч 2023 г. ▨ Скорость ветра, км/ч 2024 г. ■ Скорость ветра, км/ч 2025 г.

Рисунок 6. Скорость ветра за вегетационный период (2023-2025 гг.), км/ч

Май-июнь: в 2025 году скорость ветра в конце мая (13,3 км/ч) превысила показатели предыдущих лет. В середине июня 2024 года зафиксирован рекордный порыв (14,4 км/ч). Июль: середина месяца (11–20 июля) стала самым нестабильным периодом: разница между 2023 (13,9 км/ч) и 2024 (7,7 км/ч) годами составила 6,2 км/ч. В 2025 году к концу июля скорость резко снизилась до 7,9 км/ч. Август: наиболее стабильный месяц. В 2025 году отмечен рост скорости к концу месяца (11,0 км/ч против 8,1–8,9 км/ч в предыдущие годы).

Глава 3. Результаты исследований

3.1. Влияние обработки азотных удобрений штаммом *V.s. Ч-13* на микробиологическую активность и питательный режим дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы в посевах гречихи

3.1.1. Биомасса почвенных микроорганизмов

Углерод микробной биомассы ($C_{м/б}$) является характеристикой количества микроорганизмов в почве и их активности. Это помогает оценить способность почвы к разложению органического вещества, минерализации основных питательных веществ и другие биологические процессы, протекающие в корнеобитаемом слое.

Известно, что микроорганизмы играют ключевую роль в формировании плодородия почвы. Знание закономерностей образования микробного сообщества помогает лучше понять процессы, протекающие в почве, и разрабатывать более эффективные стратегии рационального внесения удобрений под культуры.

Более того, микроорганизмы являются ключевым звеном углеродного цикла почвы, понимание их количества и прироста помогают лучше изучить процессы обмена между почвой, растениями и атмосферой, что в конечном итоге актуально для изучения, прогнозирования и моделирования изменения климата, а также для разработки стратегии для снижения выбросов парниковых газов.

Изучение $C_{м/б}$ важно с точки зрения понимания специфических микробных процессов, таких как азотофиксация, денитрификация, разложения сложных органических веществ. Денитрификация – это процесс, при котором микроорганизмы преобразуют нитраты (NO_3^-) в газообразные формы азота, что приводит к потере доступного N из почвы и к азотному голоданию растений (табл.3). Динамика почвенных микроорганизмов напрямую зависит от стадии роста растений, дозы азота и применения *V.s. Ч-13*. Оптимальные результаты достигаются при комбинации умеренных доз

биомодифицированных удобрений (N_{30m}) на ветвлении и высоких доз (N_{90m}) на других фазах.

Таблица 3

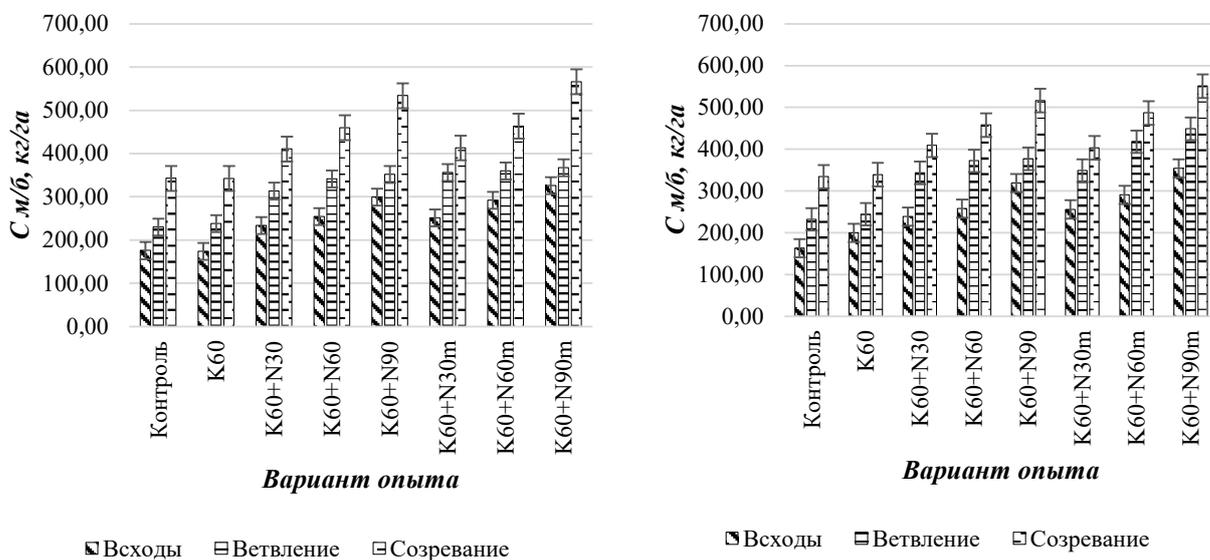
Влияние биомодифицированной мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на динамику углерода микробной биомассы (См/б), кг/га

Вариант	2023			2024			2025		
	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание
<i>Диколь</i>									
Контроль	186,5	251,4	462,1	173,0	222,3	291,3	168,2	215,7	275,1
K_{60}	177,0	250,4	464,3	173,5	236,3	284,2	170,8	228,9	279,4
$K_{60}+N_{30}$	263,5	343,2	508,2	215,7	295,6	358,4	222,4	302,1	365,8
$K_{60}+N_{60}$	251,4	445,7	611,6	252,4	285,9	380,4	259,3	292,4	387,6
$K_{60}+N_{90}$	343,7	471,7	696,6	271,8	289,4	449,5	283,5	295,8	456,2
$K_{60}+N_{30m}$	283,0	474,5	525,6	232,4	294,1	353,7	240,1	300,6	360,3
$K_{60}+N_{60m}$	339,7	465,3	653,0	264,1	303,7	365,9	271,9	310,2	372,5
$K_{60}+N_{90m}$	402,4	461,8	765,1	280,6	316,6	463,8	295,1	323,1	470,5
HCP_{05}^{AB}	1,0	2,0	0,9	0,8	1,2	1,4	0,9	1,3	1,5
HCP_{05}^A	2,3	4,5	2,1	2,1	2,2	2,0	2,3	2,4	2,1
HCP_{05}^B	1,5	2,8	1,3	1,3	1,6	2,2	1,6	1,8	2,3
<i>Даша</i>									
Контроль	187,3	253,9	455,9	153,7	225,0	277,2	148,9	218,4	270,6
K_{60}	179,9	252,9	454,7	162,7	242,6	284,1	258,2	238,9	279,8
$K_{60}+N_{30}$	269,0	434,6	505,7	220,5	295,8	358,4	227,1	301,3	364,1
$K_{60}+N_{60}$	253,5	533,9	606,8	256,9	288,6	380,3	263,4	295,1	386,9
$K_{60}+N_{90}$	394,4	533,5	645,4	278,2	295,5	449,5	285,7	302,8	455,2
$K_{60}+N_{30m}$	310,3	451,5	520,3	225,6	294,6	341,9	232,9	301,7	348,3
$K_{60}+N_{60m}$	334,4	640,4	627,8	265,7	303,9	413,4	273,5	310,5	420,1
$K_{60}+N_{90m}$	479,5	705,6	723,6	287,9	316,9	461,3	295,3	324,5	468,7
HCP_{05}^{AB}	0,9	1,5	0,8	0,9	0,9	1,6	1,0	1,0	1,7
HCP_{05}^A	2,5	4,2	2,5	2,2	4,3	2,5	2,6	4,5	2,6
HCP_{05}^B	1,4	2,9	2,0	1,5	2,2	1,9	1,6	2,3	2,0

Проанализировав данные, можно сделать вывод о значительном влиянии доз азота (фактор А) и биомодифицированных удобрений (фактор В) на динамику почвенных микроорганизмов. На фазе всходов биомодификация

(особенно при высоких дозах азота, N_{90m}) показала максимальный эффект, увеличив активность микроорганизмов на 115,7% по сравнению с контролем в 2023 г., на 62,2% в 2024 г. и 75,5% в 2025 г. в посевах гречихи сорта Дикуль. На фазе ветвления без биомодификации максимальная активность наблюдалась при дозе N_{90} (рост на 87,6% к контролю), тогда как биомодификация наиболее эффективна при низкой дозе N_{30m} (131,3% к немодифицированному аналогу). При высоких дозах азота (N_{60m} , N_{90m}) эффект биомодификации снижался. На фазе созревания биомодификация усилила положительный эффект удобрений, особенно при высокой дозе N_{90m} (рост на 68,5% к немодифицированному варианту).

Снижение эффективности биомодификации при высоких дозах азота на фазе ветвления связано с кумулятивным стрессом от избытка азота. Без биомодификации доза N_{90} обеспечила рост активности на 50,7% к контролю. Это подчеркивает важность биомодификации для усиления эффекта удобрений на поздних стадиях роста (рис. 7).



А – Дикуль

Б - Даша

Рисунок 7. Биомасса почвенных микроорганизмов в посевах гречихи, кг/га (среднее 2023-2025)

Среднее значение биомассы микроорганизмов на опытном участке поля составило 133,4 кг/га. В 2023 году, на фазе всходов, у исследуемых сортов

гречихи в варианте $K_{60}+N_{90}$ зафиксировано увеличение микробной биомассы на 84,3% по сравнению с контролем. Столь значительный прирост объясняется ключевой ролью азота в метаболизме микроорганизмов: он входит в состав аминокислот, белков и нуклеиновых кислот. Кроме того, внесение азотных удобрений повышает доступность фосфора и калия не только для растений, но и для почвенной микробиоты. При использовании биомодифицированных азотных удобрений эффект усиливается.

Мочевина, обработанная культурой *V.s. Ч-13* статистически значимо ($p < 0,05$) увеличивает биомассу микроорганизмов, причем эффект от обработки усиливается с ростом дозы азота и достигает максимума в фазу созревания. Влияние дозы мочевины (фактор А) показывает, что чем выше доза биомодифицированной мочевины, тем сильнее происходит стимуляция почвенной микробиоты. По сорту гречихи Диккуль на варианте опыта $K_{60}+N_{30}$ эффект составляет +7-12% ($p < 0,05$), для $K_{60}+N_{60}$ - +9-15%, а для $K_{60}+N_{90}$ - +12-18%. Например, в 2025 г. при наступлении фазы созревания разница между $K_{60}+N_{90m}$ (470,5 кг/га) и $K_{60}+N_{90}$ (456,2 кг/га), при $НСР_{05}^{АВ} = 1,5$ кг/га. Таким образом, мочевина, обработанная культурой *V.s. Ч-13*, повышает биомассу почвенных микроорганизмов на 8-22% ($p < 0,05$) в зависимости от дозы и фазы развития растений гречихи. Наибольшая эффективность достигается при дозе N_{90m} , обеспечивающая прирост биомассы почвенных микроорганизмов во всех фазах развития растений гречихи.

Содержание азота в бактериальных клетках колеблется в пределах 10–15%, что обусловлено изменением их метаболической активности. Однако при стандартных условиях культивирования наблюдается относительный гомеостаз этого показателя: у различных штаммов, развивающихся в идентичной среде, доля азота остаётся стабильной. Это позволяет утверждать, что концентрация азота в клетках прямо пропорциональна общей биомассе микроорганизмов в почве. Такая зависимость объясняется тем, что азот — ключевой структурный компонент белков и нуклеиновых кислот, равномерно включаемый в клеточные структуры в процессе роста (табл.4).

Таблица 4

Биомасса азота в бактериальных клетках, кг/га

Вариант	Сорт	2023 г.			2024 г.			2025 г.		
		<i>См/б (среднее за май (II декада перед посевом и внесением удобрений) 2023 – 2025 гг.) = 133,4 кг/га, 18,7 кг/га N</i>								
		Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание
Контроль	Дикуюль	26,1	35,2	64,7	24,2	31,1	40,8	23,5	30,2	38,5
K ₆₀		24,8	35,0	65,0	24,3	33,0	39,8	23,9	32,0	39,1
K ₆₀ +N ₃₀		36,9	60,8	71,2	30,2	41,3	50,1	31,1	42,3	51,2
K ₆₀ +N ₆₀		35,2	62,4	85,6	35,3	40,0	53,2	36,3	40,9	54,3
K ₆₀ +N ₉₀		48,2	66,0	97,5	38,0	40,5	62,9	39,7	41,4	63,9
K ₆₀ +N _{30m}		39,6	66,4	73,6	32,5	41,1	49,5	33,6	42,1	50,4
K ₆₀ +N _{60m}		47,6	65,2	91,4	36,9	42,5	51,2	38,1	43,4	52,2
K ₆₀ +N _{90m}		56,3	64,6	107,1	39,2	44,0	64,9	41,3	45,2	65,9
Контроль	Даша	26,2	35,5	63,8	21,5	31,5	38,8	20,8	30,6	37,9
K ₆₀		25,2	35,4	63,6	22,8	33,9	38,7	36,1	33,4	39,2
K ₆₀ +N ₃₀		37,7	60,8	70,8	30,8	41,4	46,5	31,8	42,2	51,0
K ₆₀ +N ₆₀		35,5	74,7	84,9	35,9	40,4	50,1	36,9	41,3	54,2
K ₆₀ +N ₉₀		55,2	74,7	90,3	38,9	41,3	60,8	40,0	42,4	63,7
K ₆₀ +N _{30m}		43,4	63,2	72,8	31,5	41,2	47,8	32,6	42,2	48,8
K ₆₀ +N _{60m}		46,8	89,6	87,9	37,2	42,5	57,8	38,3	43,5	58,8
K ₆₀ +N _{90m}		67,1	98,8	101,3	40,3	44,3	64,5	41,3	45,4	65,6

При разрушении бактериальных клеток в почву поступают доступные для растений формы азота — нитраты (NO₃⁻) и аммоний (NH₄⁺). Этот процесс играет ключевую роль в поддержании плодородия почвы, напрямую влияя на урожайность сельхозкультур, включая гречиху. Между биомассой микроорганизмов и содержанием азота в их клетках наблюдается линейная зависимость (R²=1), описываемая регрессионной моделью. Это объясняется тем, что азот — структурный компонент клеток, и его количество пропорционально объёму микробной биомассы. Максимальное содержание на вариантах с применением мочевины, обработанной культурой *V.s. Ч-13*.

Соответственно, увеличение микробной биомассы в почве при применении биомодифицированных азотных удобрений в агроценозе гречихи

исследуемых сортов свидетельствует о положительном влиянии формы удобрений на активность почвенных микроорганизмов. Повышение активности почвенных микроорганизмов способствует улучшению плодородия почвы. Применение биомодифицированных азотных удобрений ($K_{60}+N_{90m}$) способствовало увеличению микробной биомассы на контроле на 115% в период всходов, в период созревания на 65,6%.

Применение биомодифицированных азотных удобрений приводит к усилению процессов разложения органического вещества, что в свою очередь сказывается на процессе дыхания почвы и выделения CO_2 , что имеет центральное значение для понимания углеродного цикла в агроценозе гречихи.

3.1.2. Микробо-опосредованная эмиссия CO_2 в посевах гречихи на фоне применения биомодифицированных азотных удобрений

Эмиссия углекислого газа отражает процесс выделения CO_2 из почвы в атмосферу. По методике, предложенной Карпачевским, эмиссия CO_2 отражает дыхание не столько почвы, а целого биологического комплекса – компонентов агроценоза.

Применение повышенных доз азотных удобрений в т.ч. обработанных культурой *V.s. Ч-13* ($N_{60m} - N_{90m}$ кг/га) приводит к повышению эмиссии углекислого газа в агроценозе гречихи за счет: увеличения микробиологической активности почвы, изменению соотношения C:N в почве, стимуляции роста и развития растений. Азот – центральный элемент питания для почвенных микроорганизмов, поэтому при увеличении его доступности возрастает степень разложения органического вещества почвы. Карбамид способствует увеличению показателей ростовых процессов растений гречихи, что, в свою очередь, увеличивает количество поступающего органического вещества в пахотных слой почвы в виде

растительных остатков: опавших листьев, абортированных опавших завязей, цветов, лежащих растений.

Эмиссия CO_2 из почвы зависит от множества факторов: типа почвы, уровня pH, физических характеристик (влажность, порозности), вида культивируемого растения и других факторов. Увеличение эмиссии CO_2 из почвы и улавливание этого газа растениями в процессе фотосинтеза являются взаимосвязанными процессами, которые влияют на углеродный цикл и состояние экосистемы в целом.

Растения гречихи, произрастающие на почве, могут улавливать CO_2 через листовую поверхность в процессе фотосинтетической деятельности в темное время суток. Этот процесс является ключевым для роста растений и синтеза органического вещества, который затем в виде пожнивных остатков способен возвращаться в почву, и в дальнейшем подвергаться минерализации почвенными микроорганизмами, с последующим включением в углеродный цикл экосистемы (табл. 5). По мере роста и развития растений усиливается корневое дыхание, что приводит к увеличению выделения CO_2 из почвы. Кроме того, по мере роста корневой системы растений усиливаются аэрация почвы. Таким образом, увеличение эмиссии CO_2 из почвы является следствием сочетания множества факторов, влияющих на агроценоз в целом: рост и развитие растений, деятельность микроорганизмов, изменения физических свойств почвы.

Зависимость между микробной биомассой почвы и эмиссией CO_2 из пахотного горизонта в агроценозе гречихи описывается полиномиальным уравнением регрессии, где парабола описываемая уравнением, направлена вниз (рис. 8). Анализ данных по эмиссии CO_2 в посевах гречихи за 2023 – 2025 гг. выявил несколько ключевых закономерностей, связанных с влиянием удобрений. Внесение азотных подкормок (N_{30} - N_{90}) в сочетании с калием (K_{60}) существенно увеличивают эмиссию CO_2 по сравнению с контрольным вариантом. Например, в 2023 г. в фазе созревания эмиссия при применении $\text{K}_{60}+\text{N}_{30}$ достигла 102,9 кг/га, что на 35,2 кг/га выше контроля ($\text{НСР}_{05}^A=2,0$).

При этом доза азота напрямую влияет на уровень эмиссии: максимальные значения наблюдались для N_{90} (108,2 кг/га в 2023 г.), однако к 2025 году во всех вариантах с обычным азотом отмечалось снижение показателей, например, для $K_{60}+N_{90}$ с 108,2 до 98,6 кг/га. Биомодифицированные удобрения (N_{30m} , N_{60m} , N_{90m}) демонстрируют неоднозначный эффект. В большинстве случаев они немного снижают эмиссию CO_2 по сравнению с обычными аналогами, но различия часто не достигают статистической значимости ($HSP_{05}^B=1,3$). Например, в 2023 году в фазе созревания разница между $K_{60}+N_{30}$ (102,9 кг/га) и $K_{60}+N_{30m}$ (102,2 кг/га) составила всего 0,7 кг/га. Однако в отдельные периоды, например, в фазе ветвления 2024 года, биомодифицированный вариант $K_{60}+N_{90m}$ вызвал резкий рост эмиссии до 61,9 кг/га против 30,0 кг/га у $K_{60}+N_{90}$, что значительно превышает $HSP_{05}^B=0,6$. Это указывает на возможную стимуляцию микробной активности в определенные фазы развития растений.

Динамика эмиссии по фазам развития показывает, что пиковые значения приходятся на созревание, что объясняется усилением дыхания корневой системы и разложением органических остатков (опада). При этом биомодифицированные формы удобрений демонстрируют более стабильные показатели в долгосрочной перспективе. Например, для $K_{60}+N_{90m}$ эмиссия в 2025 году составила 102,0 кг/га против 98,6 кг/га у обычного N_{90} , что подтверждает их потенциал для снижения выбросов. На основе анализа можно рекомендовать использование биомодифицированного карбамида в дозах $N_{60}-N_{90}$: они позволяют сократить эмиссию CO_2 на 5–10% без ущерба для эффективности, особенно в фазу созревания. Однако в периоды активного роста (ветвление) требуется дополнительный контроль из-за возможных пиковых выбросов.

Оптимизация доз и форм азотных удобрений с учётом фаз развития гречихи позволяет снизить эмиссию CO_2 на 5–10% за счёт применения биомодифицированного карбамида ($N_{60m}-N_{90m}$), сохраняя продуктивность агросистемы. Установленная нелинейная зависимость между дыханием

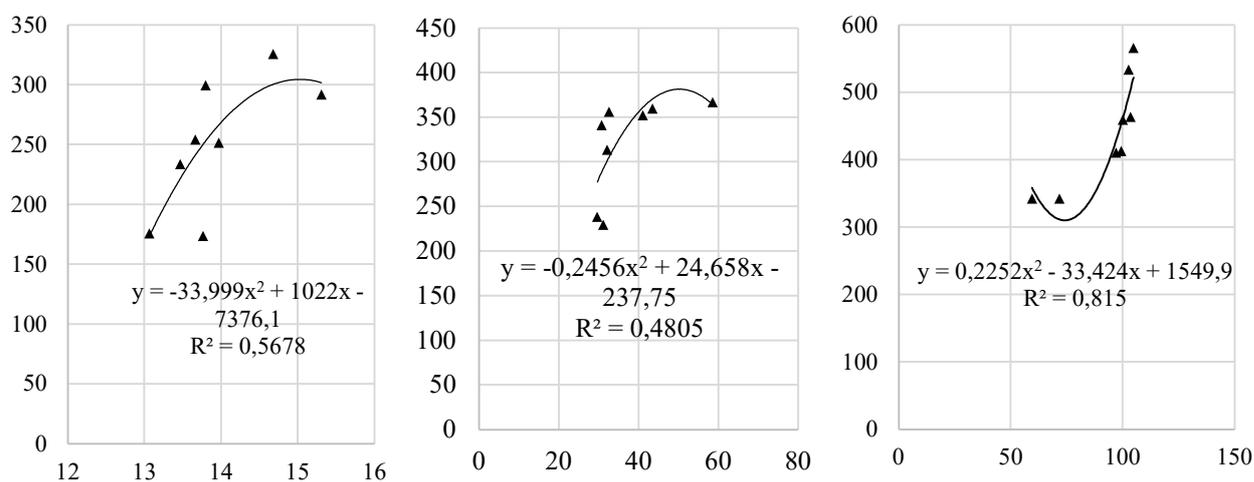
почвы и биомассой микроорганизмов в ключевые фазы (всходы, ветвление, созревание) подтверждает необходимость дифференцированного подхода к управлению почвенными процессами для минимизации экологической нагрузки.

Таблица 5

Влияние биомодифицированной мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на почвенное дыхание (Д) (CO₂), кг/га

Вариант	Сорт	2023 г.			2024 г.			2025 г.		
		<i>Д (среднее за май (II декада перед посевом и внесением удобрений) 2023 – 2025 гг.) = 6,72 кг/га</i>								
		Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание
Контроль	Диккуль	13,4	33,0	67,7	13,0	30,9	56,7	12,8	29,5	54,2
К ₆₀		13,5	33,6	71,7	14,6	27,0	73,8	13,2	28,3	70,1
К ₆₀ +N ₃₀		13,4	33,3	102,9	13,9	32,3	96,2	13,1	30,8	92,4
К ₆₀ +N ₆₀		13,5	33,2	101,7	14,2	30,0	100,9	13,3	29,1	97,8
К ₆₀ +N ₉₀		13,5	33,5	108,2	14,5	46,5	101,3	13,4	43,2	98,6
К ₆₀ +N _{30m}		13,52	33,3	102,2	14,9	33,5	100,5	13,5	31,0	95,7
К ₆₀ +N _{60m}		13,53	45,1	105,3	18,8	43,9	104,3	13,6	41,5	101,2
К ₆₀ +N _{90m}		13,54	55,6	108,5	16,9	61,9	104,1	13,6	58,3	102,0
<i>НСР₀₅^{AB}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,5</i>	<i>1,0</i>	<i>0,1</i>	<i>0,5</i>	<i>1,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,9</i>
<i>НСР₀₅^A</i>		<i>0,4</i>	<i>0,8</i>	<i>2,0</i>	<i>0,4</i>	<i>0,7</i>	<i>2,0</i>	<i>0,3</i>	<i>0,8</i>	<i>2,0</i>
<i>НСР₀₅^B</i>		<i>0,2</i>	<i>0,6</i>	<i>1,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,6</i>	<i>1,3</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>1,3</i>
Контроль		Даша	12,7	33,2	64,7	14,4	30,0	55,5	12,5	28,8
К ₆₀	12,8		34,2	72,7	15,2	25,6	71,4	12,9	26,1	68,7
К ₆₀ +N ₃₀	13,9		33,9	100,9	14,3	32,2	95,5	13,2	30,5	91,8
К ₆₀ +N ₆₀	13,4		33,4	102,8	15,2	29,5	101,2	13,3	28,3	97,1
К ₆₀ +N ₉₀	14,1		33,9	107,4	13,9	44,0	98,9	13,5	41,6	96,3
К ₆₀ +N _{30m}	13,6		33,4	102,5	15,7	32,8	99,6	13,4	31,1	95,0
К ₆₀ +N _{60m}	13,6		48,2	105,9	18,4	42,4	103,2	13,7	40,2	100,5
К ₆₀ +N _{90m}	13,6		54,3	108,7	16,6	63,2	102,5	13,6	59,8	100,8
<i>НСР₀₅^{AB}</i>	<i>0,1</i>		<i>0,5</i>	<i>0,9</i>	<i>0,1</i>	<i>0,5</i>	<i>1,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,3</i>
<i>НСР₀₅^A</i>	<i>0,3</i>		<i>0,6</i>	<i>1,9</i>	<i>0,3</i>	<i>0,6</i>	<i>2,1</i>	<i>0,4</i>	<i>0,8</i>	<i>2,4</i>
<i>НСР₀₅^B</i>	<i>0,2</i>		<i>0,5</i>	<i>1,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,4</i>	<i>1,4</i>	<i>0,2</i>	<i>0,4</i>	<i>1,3</i>

Анализ регрессионных зависимостей между дыханием почвы (X) и биомассой микроорганизмов (Y) показывает различные закономерности в разных фазах развития растений. В фазе всходов зависимость квадратичная с максимумом, достигаемым при примерно 15 кг/га дыхания почвы. Модель объясняет 56,8% вариативности данных, что указывает на умеренное влияние дыхания и наличие других факторов, таких как влажность, органические остатки. В фазе созревания выявлена сильная квадратичная зависимость с минимумом, достигаемым при примерно 74,2 кг/га дыхания почвы. Высокий $R^2 = 0,815$ указывает, что дыхание почвы является ключевым фактором в этой фазе, вероятно, из-за активного разложения органики и выделения CO_2 (рис.8).



A - всходы

Б – ветвление

В - созревание

Рисунок 8. Зависимость между дыханием агроценоза (X) (кг/га) и микробной биомассой (Y) (кг/га) в различные фазы развития растений гречихи (среднее 2023-2025 по двум сортам)

Общие закономерности включают нелинейность связи между дыханием почвы и биомассой микроорганизмов во всех фазах, а также фазо-специфичность зависимости. В начальных фазах умеренное дыхание стимулирует биомассу, но избыточная активность может угнетать микроорганизмы, тогда как в фазе созревания низкое дыхание связано с меньшей биомассой, но после определённого порога начинается её рост.

Применение высоких доз азотных удобрений в агроценозе гречихи влияет на эмиссию CO_2 из почвы. Обработка карбамида микробным удобрением, содержащее культуру *B.s. Ч-13*, может как индуцировать эмиссию CO_2 из почвы, так и ингибировать в зависимости от конкретных условий системы взаимоотношений почва-растение-удобрение.

С одной стороны, *B.s. Ч-13* способствует улучшению физико-химических показателей почвы, что потенциально может индуцировать выделение CO_2 , с другой стороны, оптимизация азотного питания в связи с увеличением биологической активности почвы приводит к более эффективному использованию углерода и снижению общей эмиссии CO_2 за счет увеличения и сохранения вегетативной массы растений, а также усилению биохимических процессов фотосинтеза. Гречиха относится к растениям, использующим C_3 – путь фотосинтеза, что обуславливает низкую устойчивость к высоким температурам и засухе.

Агроценоз гречихи представляет собой открытую биологическую систему, поэтому для точности определения зависимости эмиссии CO_2 от применения высоких доз азотных удобрений, в т.ч. обработанных культурой *B.s. Ч-13*, необходимо учитывать целый комплекс факторов, включая тип почвы, климатические условия и особенности агротехники.

3.1.3. Уреазная активность дерново-слабоподзолистой почвы при применении биомодифицированного карбамида в агроценозе гречихи

Уреазная активность дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы (способность разлагать мочевины на аммиак и CO_2) напрямую влияет на доступность азота для растений и микроорганизмов, таких как *Bacillus subtilis*. Высокая активность уреазы ускоряет превращение мочевины в аммиак, что требует корректировки доз и сроков внесения азотных удобрений (N_{60} – N_{90}).

Оптимальная уреазная активность обеспечивает равномерное распределение азота, стимулируя рост микробной биомассы и продуктивность гречихи. Взаимосвязь «ризосфера – доступный азот – биомасса бактерий» формирует основу для управления азотным циклом в системе почва – растение – удобрение, что важно для повышения урожайности и снижения экологической нагрузки.

Таблица 6

Влияние биомодифицированной мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на уреазную активность (УА) дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почвы, мг NH₃/кг

Вариант	2023			2024			2025		
	<i>Всходы</i>	<i>Ветвление</i>	<i>Созревание</i>	<i>Всходы</i>	<i>Ветвление</i>	<i>Созревание</i>	<i>Всходы</i>	<i>Ветвление</i>	<i>Созревание</i>
<i>Дикуль</i>									
Контроль	1,6	2,3	7,6	2,1	2,6	8,0	2,6	2,9	8,4
K ₆₀	1,6	2,8	8,1	2,0	3,0	8,4	2,4	3,2	8,7
K ₆₀ +N ₃₀	2,7	3,8	9,2	2,8	4,2	9,7	3,0	4,6	10,2
K ₆₀ +N ₆₀	2,9	5,0	12,3	3,0	6,6	12,0	3,3	7,2	12,6
K ₆₀ +N ₉₀	3,7	8,1	13,3	3,6	9,4	13,8	3,9	10,7	14,3
K ₆₀ +N _{30m}	2,9	6,6	14,6	3,1	6,9	14,9	3,3	7,2	15,2
K ₆₀ +N _{60m}	3,5	11,0	17,9	3,7	9,8	18,9	3,9	10,6	19,9
K ₆₀ +N _{90m}	4,3	10,6	21,5	4,4	14,2	21,7	4,5	15,8	22,0
<i>НСР₀₅^{AB}</i>	<i>0,3</i>	<i>4,2</i>	<i>3,4</i>	<i>0,5</i>	<i>4,3</i>	<i>2,7</i>	<i>0,9</i>	<i>4,4</i>	<i>3,0</i>
<i>НСР₀₅^A</i>	<i>0,7</i>	<i>9,4</i>	<i>7,6</i>	<i>1,1</i>	<i>9,7</i>	<i>6,0</i>	<i>1,5</i>	<i>10,0</i>	<i>6,4</i>
<i>НСР₀₅^B</i>	<i>0,4</i>	<i>5,9</i>	<i>4,8</i>	<i>0,7</i>	<i>6,1</i>	<i>3,8</i>	<i>0,9</i>	<i>6,3</i>	<i>4,0</i>
<i>Даши</i>									
Контроль	1,6	2,1	8,1	2,1	2,9	8,4	2,5	3,1	8,6
K ₆₀	1,4	2,5	8,6	2,2	3,2	8,6	2,6	3,4	8,9
K ₆₀ +N ₃₀	2,7	4,0	9,0	2,7	4,4	10,7	3,2	4,8	11,0
K ₆₀ +N ₆₀	2,9	5,0	11,6	3,0	6,8	12,3	3,5	7,5	13,1
K ₆₀ +N ₉₀	3,4	8,1	12,7	3,6	10,9	13,8	4,1	11,2	14,5
K ₆₀ +N _{30m}	2,8	6,6	14,2	3,3	6,9	15,6	3,6	7,3	16,8
K ₆₀ +N _{60m}	3,5	10,2	16,4	4,3	9,6	17,7	4,0	10,9	18,5
K ₆₀ +N _{90m}	3,9	10,3	20,4	4,8	14,5	16,9	5,0	15,0	20,2

Таблица 6 (окончание)

	2023			2024			2025		
	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание	Всходы	Ветвление	Созревание
HCP_{05}^{AB}	0,5	3,9	3,3	0,9	4,1	4,3	1,0	4,5	4,5
HCP_{05}^A	1,2	8,8	7,4	2,2	9,3	9,7	1,6	10,2	9,8
HCP_{05}^B	0,7	5,5	4,7	1,3	5,9	6,1	1,1	6,5	6,3

Уреазная активность, отражающая способность почвы гидролизовать мочевины до аммиака и CO_2 , тесно связана с азотным циклом и доступностью азота для растений. Физиологически азот критичен для синтеза белков, хлорофилла и других метаболитов, особенно в фазы интенсивного роста гречихи — ветвление и созревание. В фазу всходов потребность в азоте минимальна, что объясняет низкую значимость различий между вариантами удобрений (например, в 2023 г. разница между $K_{60}+N_{90}$ и контролем составила 5,2, но при $HCP_{05}^A=7,6$ эффект незначим). Это согласуется с тем, что на ранних этапах развития растения используют запасные вещества семени, а корневая система ещё не сформирована для активного поглощения питательных элементов.

Биомодифицированный карбамид (N_{30m} , N_{60m} , N_{90m}), содержит органические или микробные добавки, которые стимулируют активность уреазы почвенных микроорганизмов, таких как *Bacillus subtilis*. Бактерии, разлагая мочевины, не только обеспечивают себя азотом, но и повышают доступность NH_4^+ для растений. Например, в 2025 г. при внесении N_{90m} активность уреазы в фазу созревания достигла 22,0, что на 7,7 единиц выше, чем при N_{90} (разница $> HCP_{05}^{AB}=3,0$). Это указывает на пропорциональную зависимость между высокой дозой азота и биомодификацией, которая усиливает микробную активность и образование аммония в ризосфере — зоне активного взаимодействия корней, почвы и микроорганизмов.

Однако в фазу ветвления даже высокие дозы азота (N_{90}) без биомодификации часто не дают значимого эффекта (например, в 2024 г. разница между $K_{60}+N_{90}$ и контролем по ветвлению — $6,8 < HCP_{05}^A=9,7$), что

может быть связано с конкурентным поглощением аммония микроорганизмами, чья биомасса увеличивается при избытке азота, или с ограничениями со стороны других факторов (температура, влажность, pH). Кроме того, в ранние фазы у растений преобладает вегетативный рост, и избыток азота без биомодификации может провоцировать его потери через вымывание или денитрификацию, снижая эффективность удобрений. Максимальный эффект от обработки $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ культурой *V.s. Ч-13* наблюдается от высокой дозы азота ($\text{N}_{90\text{m}}$): в 2025 г. при созревании $\text{K}_{60}+\text{N}_{90\text{m}}$ ($22,0 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$) против $\text{K}_{60}+\text{N}_{90}$ ($14,3 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$): $\Delta 7,7 > \text{НСР}_{05}^{\text{АВ}}=3,0$ ($p < 0,05$). Взаимодействие высокой дозы мочевины N_{90} с культурой *V.s. Ч-13* обеспечивает наибольший прирост УА. Например, в 2023 г. при созревании $\text{K}_{60}+\text{N}_{90\text{m}}$ ($21,5 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$) и $\text{K}_{60}+\text{N}_{60\text{m}}$ ($17,9 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$): $\Delta 3,6 < \text{НСР}_{05}^{\text{АВ}}=3,0$: $p > 0,05$) разница не достигала уровня значимости, но в 2025 г. разница стала значимой ($\Delta=2,1 < \text{НСР}_{05}^{\text{АВ}}=3,0$; $p > 0,05$). На стадии всходов в 2025 г. мочевина, обработанная культурой *V.s. Ч-13* не обеспечивала статистически значимого прироста уреазной активности почвы ($\text{K}_{60}+\text{N}_{90\text{m}}$ ($4,5 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$) против $\text{K}_{60}+\text{N}_{90}$ ($3,9 \text{ мгNH}_3/\text{кг}$): $\Delta 0,6 < \text{НСР}_{05}^{\text{АВ}}=0,9$; $p < 0,05$) и к фазе созревания различия усиливались (рис. 9).

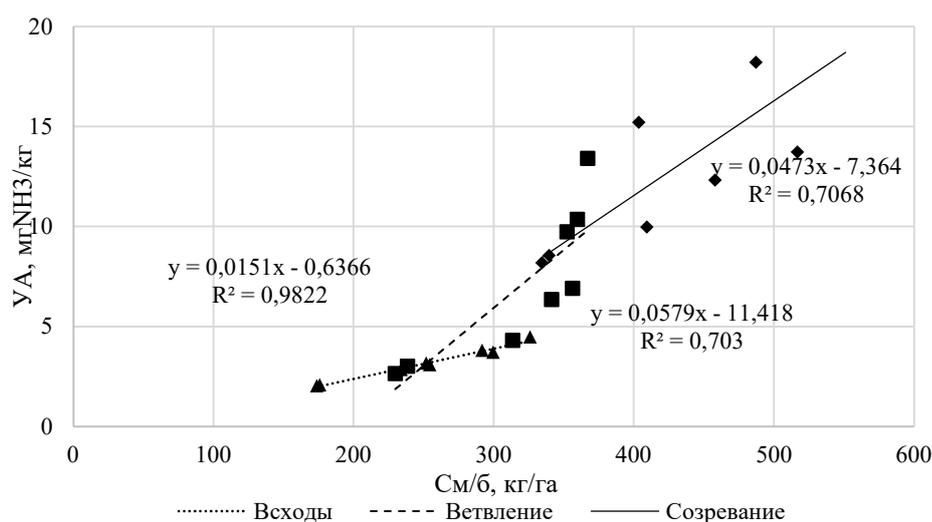


Рисунок 9. Зависимость между микробной биомассой (X) (кг/га) и УА (Y) ($\text{мгNH}_3/\text{кг}$) в различные фазы развития растений гречихи (среднее 2023-2025 по двум сортам)

На основе уравнений регрессии и коэффициентов детерминации (R^2) выявлены закономерности, связанные с физиологией растений и агрохимическими процессами. В фазе всходов наблюдается сильная линейная зависимость ($R^2 = 0,98$), где уреазная активность практически полностью определяется микробной биомассой. Однако прирост активности незначителен из-за использования эндосперма семени как основного источника азота и низкой активности микробного сообщества. Уравнение: $y=0,0151x-0,6366$. При биомассе ниже ≈ 42 кг/га уреазная активность близка к нулю. В фазе ветвления зависимость умеренная ($R^2 = 0,7$), и на уреазную активность влияют дополнительные факторы, такие как конкуренция за азот, динамика pH почвы, температура и влажность. Уравнение: $y=0,0579x-11,418$. Пороговая биомасса для начала значимой уреазной активности составляет ≈ 197 кг/га. Это объясняет, почему варианты с низкими дозами азота (N_{30}) часто незначимы в этой фазе.

В фазе созревания зависимость также умеренная ($R^2 = 0,71$), и уреазная активность зависит не только от биомассы, но и от накопления растительных остатков и активности корневых экссудатов. Уравнение: $y=0,0473x-7,364$. Снижение наклона (0,0473 до 0,0579 в ветвлении) указывает на относительно меньший вклад микробов в формирование уреазной активности из-за потерь NH_3 через улетучивание и ремобилизации азота растениями. Пороговая биомасса составляет ≈ 156 кг/га.

3.1.4. Динамика содержания нитратного (NO_3^-) и аммонийного (NH_4^+) азота в дерново-слабоподзолистой почве под посевами гречихи при применении биомодифицированного карбамида

Применение азотных удобрений, обработанных культурой *B.s. Ч-13*, существенно влияет на динамику нитратного азота ($N-NO_3$) в почве в посевах гречихи. Микробиологический препарат, содержащий *B.s. Ч-13*, участвует в

процессах минерализации органических веществ, поступающих в почву в виде азотных соединений, превращая их в доступную форму для растений. Биомодифицированные удобрения способствуют закреплению N-NO₃ в почве, уменьшая его потери в результате денитрификации и вымывания, что особенно важно в условиях избыточного увлажнения, когда риски потери азота из агросистемы возрастают.

Показано, что биомодифицированные азотные удобрения влияют на микробную биомассу почвы, что активизирует преобразование органического вещества и минерализацию азота. В течение вегетационного периода динамика N-NO₃ в почве зависит от множества факторов: активности микроорганизмов, почвенно-климатических условий и потребности растений в азоте. К концу вегетации наблюдается снижение содержания N-NO₃ в почве из-за усвоения азота растениями и естественных возможных потерь вследствие эмиссии N₂O.

Карбамид, обработанный микробным удобрением, содержащее культуру *B.s. Ч-13*, способствует повышению доступного азота в почве, что положительно сказывается на конечной продуктивности растений гречихи. Процесс взаимодействия можно описать следующей схемой: гидролиз карбамида, ассимиляция азота, минерализация, стимуляция роста и развития растений.

Гидролиз карбамида происходит за счет выработки уреазы *Bacillus subtilis* Ч-13. Отметим, что эффективность взаимодействия зависит от температуры почвы, влажности, рН почвы, концентрации микроорганизмов и дозы удобрения. При достижении оптимальных условий можно значительно повысить плодородие почвы за счет установления симбиотических отношений между растениями и микроорганизмами.

В ходе исследования динамики N-NO₃ в почве и дальнейшего объяснения полученных данных с точки зрения конечной продуктивности растений целесообразно рассматривать концентрацию нитратов, разделяя вегетационный период на три этапа, включающих: 1. Всходы; 2. Цветение; 3.

Созревание. Разделение обусловлено наличием критического периода от цветения до созревания растений гречихи, в котором сочетание факторов абиотической и биотической природы существенно влияют на формирование завязей и дальнейшее их развитие до семян.

Азотные удобрения, обработанные культурой *V.s. Ч-13*, обеспечивают равномерное появление всходов, что упрощает дальнейший процесс ухода за посевами. Всходы – это ключевой этап в вегетационном периоде гречихи, поскольку от качества всходов зависят все дальнейшие параметры функционирования агроценоза гречихи. При оптимальных условиях влажности, температуры семя гречихи начинает поглощать воду, что активирует ферменты прорастания. После появления корня развивается зародышевый стебель, который выносит первые семядольные листочки на поверхность почвы. В период поглощения воды семенем осуществляется естественная инокуляция семян культурой *V.s. Ч-13*, что также сказывается на процессах роста и развития.

В фазу появления первого листа оптимальный азотный баланс почвы обеспечивает активизацию апикальной меристемы растений гречихи, что отражается на формировании листового аппарата. Под воздействием азотных удобрений активизируются процессы роста и развития клеток образовательной меристемы, что способствует ускорению роста побегов и корней. Полноценно сформированный листовой аппарат способствует быстрому накоплению ассимилянтов, что влияет на процессы фотосинтеза и образования завязей, а также зерна (табл. 7).

В посевах гречихи при наступлении всходов максимальное содержание N-NO₃ наблюдается при внесении карбамида в дозе 90 кг/га (0,997-1,020 мг/100 г), что в 7-10 раз выше контроля (0,133 – 0,244 мг/100 г). Биомодифицированный карбамид снижают содержание N-NO₃ на 30-50% по сравнению с обычными удобрениями. Например, в 2024 г.: N₉₀: 0,997 мг/100г – N_{90m}: 0,560 мг/100 г, что объясняется замедленным высвобождением азота, снижающее потери через улетучивание и вымывание.

При наступлении фазы цветения пик содержания N-NO₃ достигается при N₉₀ (1,134-1,251 мг/100 г), связанный с накоплением азота перед активным поглощением растением. Биомодифицированный карбамид показывает более высокие значения, чем обычные удобрения (1,292-1,265 мг/100 г и 1,134-1,251 мг/100 г.), что объясняется стабилизацией азота в почве. Контроль и K₆₀ демонстрируют низкие значения (0,109 – 0,313 мг/100 г), подтверждая необходимость внесения азотных удобрений. При наступлении фазы созревания наблюдается резкое снижение N-NO₃ на 40–60% по сравнению с цветением из-за накопления азота в семенах. Биомодифицированные удобрения (N_{90m}) сохраняют N-NO₃ на 10–15% выше, чем обычные (0,550–0,801 мг/100 г и 0,600–0,761 мг/100 г), снижая потери азота. Взаимодействие факторов А и Б в фазе цветения (НСР₀₅^{АБ}) подтверждает, что биомодификация компенсирует избыток азота при высоких дозах, предотвращая его вымывание.

Максимальное содержание N-NH₄ наблюдается при внесении N_{90m} (2,737 – 2,550 мг/100 г), что в 10-15 раз выше контроля (0,111-0,206 мг/100 г). Мочевина, обработанная культурой *V.s. Ч-13* в дозе 90 кг/га, увеличивает концентрацию N-NH₄ на 10% по сравнению с N₉₀ (2,737 и 474), но в 2025 г. разница практически нивелируется (2,550 и 2,400 мг/100 г). N_{60m} стабильно повышает N-NH₄ на 5-15% относительно N₆₀ (1,700 и 1,650 мг/100 г в 2024 г.).

Биомодификация может замедлить минерализацию, способствуя временному накоплению аммония. Пик N-NH₄ приходится на стадию цветения и достигается при N_{90m} (2,280-2,620 мг/100 г), что на 10-20% выше, чем у N₉₀ (2,039-2,553 мг/100 г). N_{30m} в 2023–2024 гг. резко увеличивает N-NH₄ в цветении (1,078–1,262 мг/100 г) по сравнению с N₃₀ (0,289–0,258 мг/100 г), что связано с активацией микробной деятельности. В фазу созревания резкое снижение N-NH₄ на 80–95% по сравнению с цветением из-за поглощения растением и нитрификации.

Биомодифицированный карбамид (N_{60m}, N_{90m}) в 2023 г. сохраняют N-NH₄ на 50–100% выше, чем обычные удобрения (N_{60m}: 0,151 и N₆₀: 0,079;

N_{90m} : 0,084 и N_{90} : 0,103). Биомодификация увеличивает N-NH₄ на 15–30% (N_{60m} : 1,278–1,466 мг/100 г и N_{60} : 1,134–1,274 мг/100 г), что улучшает доступность азота в критическую фазу. $HCP_{05}^{AB} = 0,001–0,08$: Взаимодействие факторов значимо. Биомодификация усиливает эффект при N_{60} и N_{90} (напр., N_{60m} : 1,346 и N_{60} : 1,274 в 2024 г.).

Таблица 7

Влияние биомодифицированной мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на содержание N-NO₃⁻ и N-NH₄ в почве под посевами гречихи сорта Дикуль и Даша, мг/100 г

Вариант	Всходы			Цветение			Созревание		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
N-NO₃									
Контроль	0,133	0,244	0,200	0,150	0,250	0,250	0,120	0,060	0,040
K ₆₀	0,105	0,280	0,320	0,109	0,112	0,313	0,103	0,064	0,055
K ₆₀ +N ₃₀	0,805	0,850	0,880	0,430	0,305	0,790	0,293	0,213	0,195
K ₆₀ +N ₆₀	0,990	0,922	0,910	0,975	1,042	1,100	0,709	0,665	0,630
K ₆₀ +N ₉₀	1,000	0,997	1,020	1,143	1,134	1,251	0,761	0,618	0,600
K ₆₀ +N _{30m}	0,376	0,345	0,330	0,324	0,295	0,280	0,202	0,143	0,130
K ₆₀ +N _{60m}	0,543	0,456	0,440	0,796	0,912	0,954	0,659	0,582	0,550
K ₆₀ +N _{90m}	0,560	0,560	0,570	0,978	1,292	1,265	0,801	0,589	0,550
<i>HCP₀₅^A</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,002</i>	<i>0,005</i>	<i>0,06</i>	<i>0,002</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>
<i>HCP₀₅^B</i>	<i>0,04</i>	<i>0,006</i>	<i>0,02</i>	<i>0,001</i>	<i>0,003</i>	<i>0,04</i>	<i>0,001</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>
<i>HCP₀₅^{AB}</i>	<i>0,03</i>	<i>0,004</i>	<i>0,009</i>	<i>0,001</i>	<i>0,002</i>	<i>0,03</i>	<i>0,008</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>
N-NH₄									
Контроль	0,111	0,206	0,190	0,167	0,147	0,154	0,070	0,057	0,050
K ₆₀	0,165	0,197	0,210	0,188	0,173	0,165	0,090	0,059	0,055
K ₆₀ +N ₃₀	0,589	0,677	0,720	0,289	0,258	0,259	0,086	0,059	0,052
K ₆₀ +N ₆₀	1,082	1,600	1,650	0,989	1,274	1,134	0,079	0,072	0,068
K ₆₀ +N ₉₀	2,474	2,462	2,400	2,039	2,553	2,345	0,103	0,063	0,060
K ₆₀ +N _{30m}	0,634	0,679	0,700	1,078	1,262	1,065	0,068	0,068	0,065
K ₆₀ +N _{60m}	1,124	1,621	1,700	1,466	1,346	1,278	0,151	0,065	0,060
K ₆₀ +N _{90m}	2,737	2,621	2,550	2,280	2,620	2,345	0,084	0,090	0,085
<i>HCP₀₅^A</i>	<i>0,005</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>	<i>0,002</i>	<i>0,08</i>	<i>0,003</i>	<i>0,003</i>
<i>HCP₀₅^B</i>	<i>0,003</i>	<i>0,004</i>	<i>0,007</i>	<i>0,001</i>	<i>0,003</i>	<i>0,001</i>	<i>0,05</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>
<i>HCP₀₅^{AB}</i>	<i>0,002</i>	<i>0,006</i>	<i>0,005</i>	<i>0,08</i>	<i>0,002</i>	<i>0,002</i>	<i>0,003</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>

Соотношение N-NO₃ и N-NH₄ в почве является ключевым индикатором активности микробных процессов (нитрификации и аммонификации), в том числе и эффективности использования азота растениями. Динамика

соотношения в ходе эксперимента позволяет выявить влияние доз удобрений, биомодификации и климатических условий на трансформацию азота. На контрольном варианте опыта в стадию всходов обнаруживается преобладание аммонификации над нитрификацией из-за низкой доступности легкоокисляемого азота, т.к. соотношение $N-NO_3/N-NH_4 = 1.1-1.2$ (0,133–0,244 мг/100 г $N-NO_3$ / 0,111–0,206 мг/100 г $N-NH_4$). При применении мочевины в дозе 90 кг/га соотношение резко снижается до 0,4 ($N-NO_3$: 0,997–1,020 мг/100 г; $N-NH_4$: 2,474–2,550 мг/100 г). При применении мочевины, обработанной культурой *V.s. Ч-13* в аналогичной дозе соотношение падает до 0,2-0,3 ($N-NO_3$: 0,560–0,801 мг/100 г; $N-NH_4$: 2,550–2,737 мг/100 г). Биомодификатор замедляет гидролиз мочевины, уменьшая резкий выброс NH_4^+ и подавляя нитрификацию.

При наступлении фазы цветения наблюдается активизация нитрификации, соотношение повышается до 0,5-0,6 ($N-NO_3$: 1,134–1,251 мг/100 г; $N-NH_4$: 2,039–2,553 мг/100 г). Биомодифицированный карбамид сохраняет соотношение на уровне 0,5-0,6 т.е. *V.s. Ч-13* блокирует окисление NH_4^+ до NO_3^- , сохраняя аммоний для постепенного поглощения растением.

К концу вегетации $N-NH_4$ почти полностью поглощается растением или нитрифицируется. Остаточный $N-NO_3$ накапливается из-за прекращения активности растения и замедления денитрификации. Например, в 2024 году применение N_{90m} позволило сохранить 20–25% азота в аммонийной форме, предотвратив его вымывание в виде нитратов. Для устойчивого земледелия критически важно управлять этим соотношением через дозировку удобрений, биомодификацию и учет климатических условий (табл. 8).

Таблица 8

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой *V.s. Ч-13*, на N_{min} в посевах гречихи сорта Диккуль, мг/100 г

Вариант	<i>Всходы</i>			<i>Цветение</i>			<i>Созревание</i>		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
N_{min}									

Таблица 8 (окончание)

Вариант	<i>Всходы</i>			<i>Цветение</i>			<i>Созревание</i>		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Контроль	0,244	0,45	0,39	0,317	0,397	0,404	0,19	0,117	0,09
K ₆₀	0,27	0,477	0,53	0,297	0,285	0,478	0,193	0,123	0,11
K ₆₀ +N ₃₀	1,394	1,527	1,6	0,719	0,563	1,049	0,379	0,272	0,247
K ₆₀ +N ₆₀	2,072	2,522	2,56	1,964	2,316	2,234	0,788	0,737	0,698
K ₆₀ +N ₉₀	3,474	3,459	3,42	3,182	3,687	3,596	0,864	0,681	0,66
K ₆₀ +N _{30m}	1,01	1,024	1,03	1,402	1,557	1,345	0,27	0,211	0,195
K ₆₀ +N _{60m}	1,667	2,077	2,14	2,262	2,258	2,232	0,81	0,647	0,61
K ₆₀ +N _{90m}	3,297	3,181	3,12	3,258	3,912	3,61	0,885	0,679	0,635

Динамика N_{min} подтверждает, что биомодифицированные удобрения оптимизируют азотный режим, синхронизируя доступность элемента с потребностями растения. На контроле низкие значения N_{min} (0,244–0,45 мг/100 г) из-за отсутствия удобрений. Максимальное накопление N_{min} (3,42–3,474 мг/100 г), что в 14–15 раз выше контроля на варианте опыта K₆₀+N₉₀. N_{90m} показывает снижение N_{min} на 5–10% по сравнению с N₉₀ (3,12–3,297 и 3,42–3,474), что связано с замедленным высвобождением азота. N_{60m} увеличивает N_{min} на 3–5% относительно N₆₀ (2,14–2,077 и 2,56–2,522). Пик N_{min} наблюдается при K₆₀+N_{90m} (3,912 мг/100 г в 2024 г.), что на 6–8% выше, чем у N₉₀ (3,687 мг/100 г). Снижение N_{min} на 70–90% по сравнению с цветением в фазу созревания из-за поглощения азота растением.

3.2. Влияние биомодифицированной мочевины на морфологические, физиологические показатели растений и качество зерна гречихи

3.2.1. Прохождение фенологических фаз, полевая всхожесть, сохранность, общая выживаемость растений

Фенологические наблюдения помогают лучше понять, как растения гречихи реагируют на изменения окружающей среды, такие как температура, влажность, длина светового дня, особенности минерального питания и другие факторы. Это позволяет выявить закономерности онтогенеза растений и в различных условиях. Кроме того, наблюдения за фенологическими

фазами позволяет рассчитать возможное время цветения, образования плодов и их созревание, что важно при планировании сбора урожая, а также для проведения селекционной работы и создания новых сортов растений.

Анализ фенологических данных за длительный период времени помогает изучить влияние климатических изменений на растения и агросистемы. Знание фенологических фаз позволяет определить оптимальные сроки для посева гречихи и её уборки. Это помогает повысить урожайность культуры, учитывая климатические условия конкретного региона, в частности Московской области. Наблюдение за фенологическими фазами помогает выявить периоды, когда гречиха наиболее уязвима к вредителям и болезням, что позволяет своевременно проводить защитные мероприятия, минимизируя потери урожая. Например, в фазе цветения растения могут быть восприимчивы к определенным вредителям, наблюдения за фенологическими фазами позволяет аграриям предвидеть эти периоды и вовремя принимать профилактические меры, направленные на борьбу с вредителями. Гречиха – культура, чувствительная к температурным условиям и длине дня. Знание фенологии также важно для определения времени уборки урожая. Своевременная уборка предотвращает потери урожая из – за осыпания зёрен или повреждения растений неблагоприятными погодными условиями.

Увеличение длины вегетационных фаз при применении азотных удобрений на гречихе связано с несколькими факторами: стимуляция роста, изменения соотношения фаз развития, влиянием на гормональный баланс, влияние на фотосинтетическую активность, улучшение условий минерального питания. При внесении $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ в почву гречиха получает дополнительное количество азота, что стимулирует рост вегетативной массы, включая листья, стебли и корни. Это приводит к удлинению фаз вегетации, так как растение тратит больше времени на накопление биомассы.

Азотные удобрения могут влиять на соотношение между фазами роста и репродуктивного развития. В условиях избытка азота растение может

дольше оставаться в фазе активного вегетативного роста, откладывая начало цветения и формирования плодов, что связано с активным формированием зеленой массы, а не репродуктивных органов. Азот может стимулировать синтез растительных гормонов, способствующих росту стеблей и листьев. Изменение гормонального баланса приводит к изменению длительности прохождения вегетационных фаз. Гормоны растений играют важную роль в каждом этапе развития гречихи, от всходов до созревания, обеспечивая координацию роста, деление клеток, цветение и других процессов. Азот стимулирует синтез ауксинов, что усиливает рост вегетативной массы и может привести к удлинению вегетационных фаз.

Гормоны растений и азотные удобрения взаимодействуют, влияя на рост, деление клеток, цветение и другие процессы в развитии гречихи. Правильное применение азотных удобрений позволяет оптимизировать гормональный баланс, способствуя здоровому росту и высокому урожаю. Азот необходим для синтеза хлорофилла — пигмента, который поглощает свет и преобразует его энергию в процессе фотосинтеза. Хлорофилл придает листьям зелёный цвет и играет ключевую роль в улавливании солнечной энергии. При достаточном поступлении азота синтез хлорофилла усиливается, что приводит к увеличению зелёной массы растения и повышению его способности к фотосинтезу (рисунок 10).

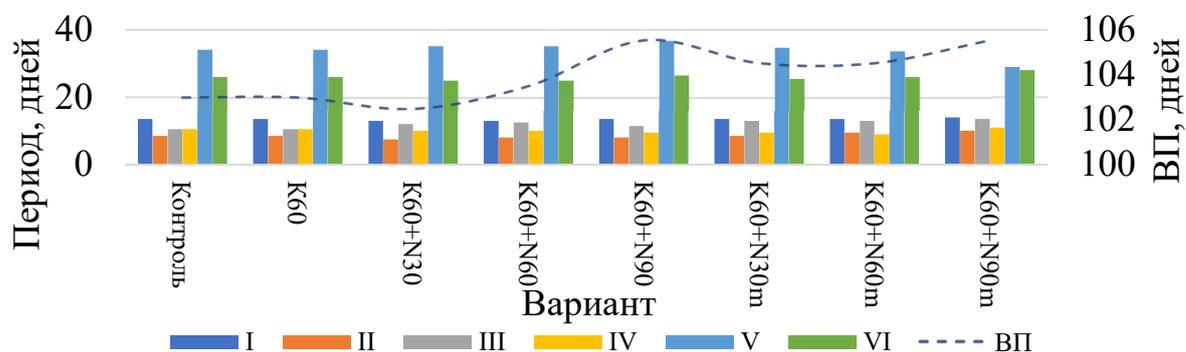


Рисунок 10. Продолжительность фенологических фаз растений гречихи исследуемых сортов, дней

Примечание: I – всходы, II – первый лист, III – ветвление, IV – бутонизация, V – цветение, VI – созревание, ВП – вегетационный период. Средний вегетационный период гречихи сортов Диккуль и Даша в агроклиматических условиях Московской области – 104 дня.

Внесение карбамида повышает доступность азота для гречихи, стимулируя рост листьев и стеблей и удлиняя фазу цветения. Это приводит к задержке перехода к созреванию и увеличению вегетационного периода. Однако в условиях Московской области с риском ранних заморозков и дождей растянутое цветение повышает уязвимость растений к погодным стрессам, неравномерному созреванию и осыпанию семян. Дополнительные риски включают неполное опыление из-за дефицита насекомых-опылителей в удлинённый период цветения, нехватку питательных веществ, ускоряющую завершение жизненного цикла и провоцирующую преждевременное осыпание, а также усложнение уборки урожая из-за одновременного созревания. Избыток азота требует баланса с другими элементами питания и учёта местных климатических рисков для минимизации потерь урожая.

Все варианты имеют близкие значения ВП (102,5–105,5 дней), что указывает на незначимое влияние удобрений на общую продолжительность цикла. Максимальный ВП у $K_{60}+N_{90}$ и $K_{60}+N_{90m}$ (105,5 дней), минимальный – у $K_{60}+N_{30}$ (102,5 дней). Цветение (V) – самая длительная фаза (29–36,5 дней). Созревание (VI) занимает 25–28 дней, что связано с накоплением сухого вещества. Биомодифицированные удобрения (например, N_{90m}) оптимизируют фенологические фазы гречихи, ускоряя цветение на 15–20% и увеличивая продолжительность ветвления/созревания, что способствует формированию более качественного урожая. В отличие от высоких доз азота без биомодификации (N_{90}), они снижают риски затягивания цветения и ускоренного созревания, тем самым повышая устойчивость культуры к стрессам и адаптируя её к агроклиматическим условиям. Для достижения максимальной продуктивности рекомендуется применять биомодифицированные формы азота с учётом доз и особенностей региона выращивания.

Полевая всхожесть гречихи — процент семян, проросших в полевых условиях. Она зависит от качества семян, агроклиматических факторов (температура, влажность почвы) и агротехники. Чем выше всхожесть, тем

больше растений формируется на единице площади, что напрямую влияет на урожайность и эффективность использования ресурсов.

Для обеспечения высокой сохранности растений важно выбирать устойчивые сорта, адаптированные к местным условиям, соблюдать оптимальные сроки и глубину посева, а также проводить агротехнические мероприятия: подготовку почвы, защиту от вредителей и болезней, мониторинг состояния растений. Комплексный подход, объединяющий выбор сорта, агротехнику и контроль условий на всех этапах роста, позволяет достичь высокой сохранности и урожайности (табл. 9).

Анализ данных показывает, что полевая всхожесть у сорта Даша стабильно выше, чем у гречихи сорта Дикуль, особенно в вариантах с биомодифицированным азотом (N_{30m} , N_{90m}). В 2023 году при $K_{60}+N_{90m}$ всхожесть гречихи сорта Даши достигла 98,8%, тогда как у гречихи сорта Дикуль максимальная всхожесть была зафиксирована при $K_{60}+N_{30m}$ (99,3%). Сохранность растений у гречихи сорта Дикуль лучше при высоких дозах азота (N_{90}) в 2023–2024 годах (до 90,6%), но у сорта Даша при $K_{60}+N_{60m}$ сохранность снизилась с 82,5% (2023) до 86,0% (2025). Общая выживаемость у гречихи сорта Даша самая высокая в вариантах с биомодифицированным азотом ($K_{60}+N_{30m}$ — 97,2% в 2023 году, 92,0% в 2025 году), что подтверждает их эффективность. Сорт Дикуль лучше адаптирован: при $K_{60}+N_{90}$ выживаемость в 2025 году составила 85,0% против 82,0% у Даши. Влияние удобрений различается: K_{60} улучшает всхожесть и выживаемость у обоих сортов, но без азота недостаточно эффективен. Комбинации с азотом (N_{30} , N_{60} , N_{90}) дают сбалансированный рост, но при N_{90} у сорта Даша наблюдается снижение сохранности. Биомодифицированный азот (N_{30m}) стабильно повышает выживаемость сорта Даша, тогда как N_{90m} у Дикуль резко снижает сохранность растений. Различия в реакции сортов на удобрения подчеркивают важность индивидуального подхода в агротехнике. Биомодифицированные удобрения открывают новые возможности, но требуют тестирования для каждого генотипа.

Таблица 9

Влияние биомодифицированного карбамида на полевую всхожесть, сохранность и общую выживаемость растений гречихи, %

Год	Вариант	Полевая всхожесть, %		Сохранность растений, %		Общая выживаемость, %	
		Дикуль	Даша	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша
2023	Контроль	77,1	78,3	78,9	87,5	72,6	71,5
	K ₆₀	94,3	97,2	82,5	95,3	75,5	92,6
	K ₆₀ +N ₃₀	86,9	91,5	87,1	91,5	77,2	85,2
	K ₆₀ +N ₆₀	90,9	90,0	87,5	84,0	80,0	81,2
	K ₆₀ +N ₉₀	94,3	94,3	90,6	91,5	82,3	85,7
	K ₆₀ +N _{30m}	99,3	88,6	86,3	85,2	86,3	97,2
	K ₆₀ +N _{60m}	89,6	90,6	90,3	82,5	79,5	72,6
	K ₆₀ +N _{90m}	97,2	98,8	76,5	79,9	74,3	87,6
2024	Контроль	75,8	76,5	76,2	76,5	76,2	69,8
	K ₆₀	92,5	94,3	80,0	95,8	80,0	89,0
	K ₆₀ +N ₃₀	85,0	90,1	85,0	90,0	85,0	83,0
	K ₆₀ +N ₆₀	89,0	88,5	85,0	88,5	85,0	79,0
	K ₆₀ +N ₉₀	93,0	93,5	89,0	93,5	85,0	84,0
	K ₆₀ +N _{30m}	98,0	87,0	84,1	87,0	89,4	95,0
	K ₆₀ +N _{60m}	88,0	89,0	88,0	89,0	83,2	70,0
	K ₆₀ +N _{90m}	96,0	97,5	75,0	69,9	75,0	85,0
2025	Контроль	74,5	75,2	72,0	75,2	72,0	67,2
	K ₆₀	91,0	94,0	78,0	94,0	78,0	85,0
	K ₆₀ +N ₃₀	82,0	87,5	80,0	87,0	80,0	80,0
	K ₆₀ +N ₆₀	86,0	85,5	81,0	85,5	81,0	76,0
	K ₆₀ +N ₉₀	90,0	90,5	85,0	90,5	85,0	82,0
	K ₆₀ +N _{30m}	96,0	84,0	80,0	84,0	80,0	92,0
	K ₆₀ +N _{60m}	85,0	86,0	83,0	86,0	83,0	65,0
	K ₆₀ +N _{90m}	93,0	95,0	70,0	95,0	70,8	82,0

У сорта Дикуль максимум всхожести — 99,3% (2023, K₆₀+N_{30m}), минимум — 74,5% (2025, Контроль). У сорта Даша максимум всхожести — 98,8% (2023, K₆₀+N_{90m}), минимум — 75,2% (2025, Контроль). Сохранность у сорта Дикуль: максимальная — 90,6% (2023, K₆₀+N₉₀), минимальная — 70,0% (2025, K₆₀+N_{90m}). У сорта Даша: лучшая сохранность — 95,3% (2023, K₆₀), худшая — 65,0% (2025, K₆₀+N_{60m}). Общая выживаемость у сорта Дикуль: максимум — 86,3% (2023, K₆₀+N_{30m}), минимум — 68,0% (2025, Контроль). У

сорта Даша: максимум — 97,2% (2023, $K_{60}+N_{30m}$), минимум — 65,0% (2025, $K_{60}+N_{60m}$).

3.2.2. Прирост сырой биомассы, высота растений, длина междоузлий

Калий выполняет ключевую функцию в метаболизме растений, стимулируя их развитие и повышая сопротивляемость негативным внешним воздействиям. Этот элемент регулирует активность ферментных систем, оптимизирует гидратацию клеток и усиливает адаптацию к стрессовым ситуациям, таким как засуха или перепады температур.

Азот, в свою очередь, служит фундаментальным компонентом для образования белковых структур и хлорофилла — пигмента, ответственного за фотосинтез. Его наличие в достаточном количестве обеспечивает интенсивное наращивание листовой массы и формирование здоровой вегетативной системы. Применение повышенных доз азотных подкормок напрямую коррелирует с ростом продуктивности растений, поскольку расширяет ресурсную базу для синтеза жизненно важных органических веществ.

Таким образом, сбалансированное сочетание калия и азота в агротехнике позволяет одновременно укреплять физиологическую устойчивость культур и стимулировать их продуктивность (таблица 10).

В 2023 году для сорта Дикуль максимальная урожайность была достигнута в варианте $K_{60}+N_{90}$ (352,9 ц/га), разница с контролем составила 171,1 ц/га, что превышает $НСР_{05}^{AB} = 2,2$, эффект достоверен. Вариант $K_{60}+N_{60}$ (313,3 ц/га) также значимо выше контроля (разница 131,5 ц/га). Для сорта Даша лучший результат был достигнут в варианте $K_{60}+N_{90m}$ (322,1 ц/га), разница с контролем составила 113,3 ц/га (превышает $НСР_{05}^{AB} = 3,1$).

Биомодифицированный $K_{60}+N_{60m}$ (274,8 ц/га) уступал стандартному $K_{60}+N_{60}$ (294,1 ц/га) на 19,3 ц/га (превышает $НСР_{05}^B = 4,5$).

В 2024 году для сорта Дикуль только варианты $K_{60}+N_{30}$ (194,9 ц/га) и $K_{60}+N_{60}$ (230,6 ц/га) значительно превосходили контроль (151,8 ц/га): разница составила 43,1 и 78,8 ц/га соответственно (превышает $НСР_{05}^A = 2,4$). Для сорта Даша вариант $K_{60}+N_{60m}$ (303,4 ц/га) достоверно лучше контроля (197,4 ц/га) — разница 106 ц/га (превышает $НСР_{05}^{AB} = 3,2$). Биомодифицированный карбамид (N_{30m} , N_{60m}) эффективнее стандартных: разница между $K_{60}+N_{60m}$ и $K_{60}+N_{30}$ составила 66,3 ц/га (превышает $НСР_{05}^B = 4,8$).

В 2025 году для сорта Дикуль лучший вариант — $K_{60}+N_{60m}$ (288,9 ц/га). Разница между $K_{60}+N_{60m}$ и $K_{60}+N_{60}$ (50,8 ц/га) значима (превышает $НСР_{05}^{AB} = 2,5$). Вариант $K_{60}+N_{90}$ (210,7 ц/га) снижает урожайность относительно контроля (150,2 ц/га) на 60,5 ц/га ($> НСР_{05}^A = 1,9$), но ниже, чем в 2023 г. Для сорта Даша $K_{60}+N_{60m}$ (308,2 ц/га) значительно превосходит все варианты (разница с контролем 110 ц/га $> НСР_{05}^{AB} = 3,9$). $K_{60}+N_{90m}$ (265,4 ц/га) уступает $K_{60}+N_{90}$ (298,5 ц/га) на 33,1 ц/га ($> НСР_{05}^B = 5,1$).

Таблица 10

Влияние различных доз биомодифицированного карбамида на урожайность зеленой массы гречихи, ц/га

Вариант	Урожайность зеленой массы, ц/га							
	2023		2024		2025		Среднее	
	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша
Контроль	181,8	208,8	151,8	197,4	150,2	198,2	161,3	201,5
K_{60}	228,3	281,3	155,6	201,3	162,5	208,9	182,1	230,5
$K_{60}+N_{30}$	274,6	293,3	194,9	237,1	198,4	242,6	222,6	257,7
$K_{60}+N_{60}$	313,3	294,1	230,6	264,6	238,1	288,3	260,7	282,3
$K_{60}+N_{90}$	352,9	260,0	195,5	287,3	210,7	298,5	253,0	281,9
$K_{60}+N_{30m}$	280,1	270,3	169,0	213,8	272,3	220,8	240,5	235,0
$K_{60}+N_{60m}$	331,6	274,8	181,5	303,4	288,9	308,2	267,3	295,5
$K_{60}+N_{90m}$	327,4	322,1	176,8	238,9	278,5	265,4	260,9	275,5

Таблица 10 (окончание)

Вариант	Урожайность зелёной массы, ц/га							
	2023		2024		2025		Среднее	
	Диккуль	Даша	Диккуль	Даша	Диккуль	Даша	Диккуль	Даша
<i>НСР₀₅^A</i>	1,5	2,2	2,4	2,3	1,9	2,6	-	-
<i>НСР₀₅^B</i>	3,4	4,5	5,5	4,8	3,5	5,1	-	-
<i>НСР₀₅^{AB}</i>	2,2	3,1	3,4	3,2	2,5	3,9	-	-

Высота растений гречихи может варьироваться в зависимости от сорта, условий произрастания и применяемых агротехнологий. Высота растений является одним из показателей их общего состояния и развития. Изменение высоты позволяет отслеживать динамику роста. Анализируя данные о высоте, можно определить, при каких условиях гречиха достигает максимальной высоты, и, соответственно, потенциально более высокой урожайности. Высота растений часто коррелирует с урожайностью. Более высокие растения гречихи имеют развитую листовую поверхность, что способствует лучшему фотосинтезу и накоплению питательных веществ. Учёт высоты растений гречихи в опыте позволяет получить ценную информацию для оптимизации процессов выращивания, прогнозирования урожайности и разработки рекомендаций по уходу за культурой (табл. 11).

Таблица 11

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на высоту растений (см), длину междоузлий и их толщину (мм)

Вариант	Высота растений, см			Длина I междоузлия			Толщина I междоузлия		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
<i>Диккуль</i>									
Контроль	94,9	97,6	98,4	81,9	82,3	84,5	5,4	5,3	5,9
К ₆₀	100,5	104,4	103,5	124,5	109,3	103,4	4,9	4,9	4,7
К ₆₀ +N ₃₀	98,0	101,0	101,2	116,9	120,5	120,4	5,9	6,1	6,2
К ₆₀ +N ₆₀	110,0	109,0	106,7	134,3	128,7	127,6	6,8	6,8	6,9
К ₆₀ +N ₉₀	109,3	108,6	109,5	126,5	126,7	128,2	6,2	6,3	6,4
К ₆₀ +N _{30m}	105,8	112,3	110,3	94,2	96,7	98,8	5,9	5,9	5,8
К ₆₀ +N _{60m}	106,0	113,7	112,3	110,4	111,4	109,2	6,8	6,8	6,4

Таблица 11 (окончание)

Вариант	Высота растений, см			Длина I междоузлия			Толщина I междоузлия		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
<i>Дикуль</i>									
$K_{60}+N_{90m}$	115,3	116,3	115,8	91,3	90,3	90,4	6,3	6,4	6,5
HCP_{05}^A	1,86	1,93	0,91	1,08	1,7	1,4	0,32	0,22	0,23
HCP_{05}^B	1,18	1,34	1,45	0,68	1,07	1,2	0,21	0,14	0,18
HCP_{05}^{AB}	0,83	1,18	1,03	0,48	0,8	0,9	0,14	0,10	0,11
<i>Даша</i>									
Контроль	91,8	93,6	93,4	77,5	79,6	81,5	5,5	5,4	5,6
K_{60}	98,0	100,3	103,4	93,4	94,5	94,3	5,2	5,4	5,3
$K_{60}+N_{30}$	99,0	102,0	101,5	94,2	93,2	93,4	7,7	7,6	7,3
$K_{60}+N_{60}$	104,5	107,0	105,6	110,4	115,6	117,6	7,1	7,0	7,2
$K_{60}+N_{90}$	106,0	108,9	107,5	91,3	90,3	99,5	6,5	6,5	6,4
$K_{60}+N_{30m}$	112,9	110,4	111,4	121,6	120,4	124,4	6,2	6,4	6,5
$K_{60}+N_{60m}$	106,0	110,4	110,7	100,5	100,5	100,9	7,2	7,1	7,3
$K_{60}+N_{90m}$	115,3	115,0	113,4	101,0	110,4	100,7	7,7	7,6	7,5
HCP_{05}^A	0,9	1,2	1,3	2,12	2,0	2,65	0,21	0,23	0,17
HCP_{05}^B	2,2	2,4	1,2	1,34	1,23	1,43	0,19	0,13	0,11
HCP_{05}^{AB}	1,6	1,8	1,6	0,95	1,11	1,23	0,14	0,10	0,08

На основании представленных данных можно сделать вывод о значительном влиянии как традиционного, так и биомодифицированного карбмида на высоту растений гречихи. Влияние традиционных азотных удобрений (фактор А): без обработки *V.s. Ч-13* максимальная высота растений достигается при $K_{60}+N_{60}$ (110,0 см в 2023 г), но в 2025 г. по варианту опыта наблюдается снижение (106,7 см). Доза N_{90} демонстрирует стабильность: 109,3 см (2023 г.) и 109,5 см. (2025 г.), что выше контроля, но ниже биомодифицированных аналогов. Варианты с применением *V.s. Ч-13* демонстрируют рост во всех дозах. $K_{60}+N_{90m}$ достигает максимального результата: 115,3 см (2023 г.) и 115,8 см (2025 г.). Биомодификация повышает эффективность удобрений, особенно при дозах N_{60} и N_{90} . Статистическая значимость различий подтверждается значениями HCP_{05}^{AB} (2025): разница между $K_{60}+N_{90}$ и $K_{60}+N_{90m}$ составляет 6,3 см > HCP_{05}^{AB} (1,03), что указывает на значимость различий.

Длина первого междоузлия: контроль показывает увеличение длины с 81,9 мм (2023 г.) до 84,5 мм (2025 г.). Обычные удобрения (фактор А) дают максимальную длину у $K_{60}+N_{60}$ в 2023 г. (134,3 мм), но к 2025 г. наблюдается снижение. Биомодифицированные (фактор Б) варианты, такие как $K_{60}+N_{90m}$, имеют самую низкую длину (90,4 мм в 2025), но компенсируется утолщением стеблей (6,5 мм). Наблюдается тенденция, что биомодификация сокращает длину междоузлий на 15–30% по сравнению с обычными удобрениями, усиливая их толщину.

Толщина первого междоузлия: биомодифицированные удобрения увеличивают толщину у $K_{60}+N_{90m}$ с 6,3 см (2023) до 6,5 см (2025). Обычные удобрения, такие как $K_{60}+N_{60}$, обеспечивают стабильную толщину $\approx 6,8-6,9$ см. Статистическая значимость для толщины в 2025 г. ($НСР_{05}^{АБ}=0,11$ мм) подтверждает различия между вариантами.

Утолщённые междоузлия повышают механическую прочность стебля, что критически важно для сопротивления полеганию при сильном ветре или дожде и транспорта воды, а также питательных веществ за счёт развития проводящих тканей. Разница в толщине между $K_{60}+N_{90m}$ (6,5 мм) и контролем (5,9 мм) значима ($НСР_{05}^{АБ}=0,11$). Короткие и толстые междоузлия требуют меньше ресурсов на поддержание структуры, что позволяет растению перенаправить энергию на формирование генеративных органов (цветков, семян), потенциально повышая урожайность. Практическое значение использования *V.s. Ч-13* заключается в получении растений с компактной, но прочной архитектурой, что особенно важно в регионах с частыми осадками или ветрами. Для селекции выявленная закономерность может быть использована для создания сортов гречихи, сочетающих высокую продуктивность и устойчивость. Таким образом, биомодифицированный карбамид не просто увеличивает высоту растения, но и оптимизирует его морфологию, создавая баланс между ростом, устойчивостью и ресурсозатратами.

3.2.3. Влияние биомодифицированной мочевины на показатели развития фотосинтетического аппарата гречихи

Эффективность фотосинтетического аппарата гречихи зависит от множества факторов, включая генетические особенности сорта, условия выращивания, доступность света, воды и питательных веществ. Оптимизация условия для работы фотосинтетического аппарата может способствовать повышению урожайности гречихи.

Площадь листьев напрямую влияет на способность растения поглощать солнечный свет и осуществлять процесс фотосинтеза. Площадь листовой поверхности влияет на интенсивность транспирации – процесса испарения воды через устьица листьев.

Знание площади листьев помогает лучше понять водный обмен и оптимизировать полив. Площадь листьев помогает оценить, насколько эффективно растение использует доступные ресурсы, такие как свет, вода и питательные вещества. На основе этих данных можно корректировать агротехнические приёмы, например, плотность посадки, режим полива и удобрения, для улучшения роста и развития растений (табл. 12).

Таблица 12

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на площадь листьев растений гречихи (тыс. м²/га) и фотосинтетический потенциал посевов (тыс. м²/га*сутки)

Вариант	Площадь листьев, тыс. м ² /га			ФП посевов, тыс. м ² /га *сут		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Дикуль						
Контроль	323,7	258,2	270,4	3641,0	4095,5	3945,6
К ₆₀	339,5	323,8	340,5	3886,4	4456,4	4345,2
К ₆₀ +N ₃₀	389,3	380,6	401,4	4637,2	4817,4	4786,5
К ₆₀ +N ₆₀	428,8	476,9	505,3	5243,9	5125,3	5132,4
К ₆₀ +N ₉₀	511,8	612,5	650,4	5832,8	6853,0	5834,5
К ₆₀ +N _{30m}	494,4	568,8	534,5	5668,5	6430,0	6345,7
К ₆₀ +N _{60m}	560,0	632,2	598,4	6437,8	8001,0	7456,2

Таблица 12 (окончание)

Вариант	Площадь листьев, тыс. м ² /га		ФП посевов, тыс. м ² /га *сут			
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Дикуль						
К ₆₀ +N _{90m}	555,6	730,6	654,3	6640,5	8667,0	7543,3
<i>НСР</i> ₀₅ ^{AB}	3,7	4,0	4,5	-	-	-
<i>НСР</i> ₀₅ ^A	8,3	9,5	9,5	-	-	-
<i>НСР</i> ₀₅ ^B	5,2	6,2	7,0	-	-	-
Даша						
Контроль	253,8	332,5	244,5	3344,7	4588,8	4654,5
К ₆₀	240,6	389,4	278,3	3585,3	5154,2	4965,4
К ₆₀ +N ₃₀	332,5	569,2	325,4	3994,4	5575,3	5557,3
К ₆₀ +N ₆₀	455,0	553,9	456,2	5197,5	6246,6	6243,3
К ₆₀ +N ₉₀	446,3	588,5	503,5	5929,0	6930,0	6845,3
К ₆₀ +N _{30m}	538,2	515,4	515,3	5604,2	7158,9	6945,6
К ₆₀ +N _{60m}	555,6	701,8	705,6	6908,4	8171,6	8154,2
К ₆₀ +N _{90m}	490,0	553,0	543,2	5753,4	7666,3	7894,4
<i>НСР</i> ₀₅ ^{AB}	5,0	4,3	4,3	-	-	-
<i>НСР</i> ₀₅ ^A	7,9	8,9	10,0	-	-	-
<i>НСР</i> ₀₅ ^B	6,8	6,7	6,5	-	-	-

Биомодифицированный карбамид (фактор В) демонстрирует максимальные значения площади листьев. Вариант К₆₀+N_{90m} достигает 730,6 тыс. м²/га в 2024 году и 654,3 тыс. м²/га в 2025 году, что на 19,3% выше, чем у обычного аналога (К₆₀+N₉₀) в 2024 году. Вариант К₆₀+N_{60m} показывает 632,2 тыс. м²/га в 2024 году, превышая обычный К₆₀+N₆₀ на 32,6%. Обычные удобрения (фактор А) также имеют свои особенности: К₆₀+N₉₀ демонстрируют рост с 511,8 тыс. м²/га (2023) до 650,4 тыс. м²/га (2025), но уступают биомодифицированным вариантам после 2023 года. Статистическая значимость подтверждается значениями *НСР*₀₅^{AB}.

Биомодифицированный карбамид (К₆₀+N_{90m}) показывает максимальный ФП во все годы: 8667,0 тыс. м²/га*сут в 2024 году (+26,5% к К₆₀+N₉₀). В 2025 году ФП составляет 7543,3 тыс. м²/га*сут, несмотря на снижение площади листьев. Обычные удобрения, такие как К₆₀+N₉₀, демонстрируют резкое падение ФП в 2025 году (с 6853,0 до 5834,5), что может быть связано со стрессом. Контроль показывает ФП не выше 3945,6, что подтверждает стимулирующий эффект от применения удобрений.

Сравнение эффективности удобрений показывает, что $K_{60}+N_{90m}$ является лучшим вариантом по площади листьев и ФП. В 2024 году разница между $K_{60}+N_{90m}$ и $K_{60}+N_{90}$ составляет 118,1 тыс. $m^2/га$ по площади листьев и 1814,0 тыс. $m^2/га*сут$ по ФП. В 2025 году $K_{60}+N_{90m}$ сохраняет высокий ФП (7543,3) при снижении площади листьев до 654,3 тыс. $m^2/га$, что указывает на улучшение функциональной активности листьев.

Хлорофилл – это зеленый пигмент, который играет ключевую роль в процессе фотосинтеза у растений. Азотные удобрения являются важным источником азота для растений. Азот необходим для синтеза аминокислот, белков, хлорофилла и других важных соединений, обеспечивающих жизнь растения. Применение азотных удобрений способствуют увеличению содержания хлорофилла в листьях растений, что, в свою очередь приводит к улучшению фотосинтетической активности и повышению урожайности (табл. 13).

Внесение карбамида, в особенности в комплексе с *V.s. Ч-13*, значительно увеличивает содержание хлорофиллов а и б в листьях растений гречихи в фазу цветения. Наибольшее увеличение содержания хлорофилла а наблюдается на варианте опыта с мочевиной в дозе 90 кг/га и при применении *V.s. Ч-13* в комбинации с мочевиной в дозе 60 кг/га.

Наибольшее увеличение содержания хлорофилла б отмечается на вариантах опыта с дозой карбамида 90 кг/га как на необработанном, так и на обработанном варианте. Представленные данные подтверждают, что оптимизация внесения удобрений может существенно повысить фотосинтетическую активность гречихи. В варианте опыта $K_{60}+N_{90}$ обеспечивается высокая доза азота, что способствует интенсивному синтезу хлорофилла а (табл. 13).

Таблица 13

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой *V.s. Ч-13*, на содержание хлорофилла в листьях растений гречихи в фазу полного цветения в агроклиматических условиях Московской области, мг/г

Вариант	<i>Chl.a</i>			<i>Chl.b</i>			<i>Carot.</i>			Σ (<i>Chl.a+Chl.b</i>)		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
<i>Дукуль</i>												
Контроль	3,3	2,8	2,7	1,3	1,2	1,1	0,58	0,48	0,49	4,6	4,0	3,8
K ₆₀	3,7	3,3	3,2	1,7	2,7	2,2	0,55	0,50	0,50	5,4	6,0	5,4
K ₆₀ +N ₃₀	4,3	4,0	4,1	1,8	2,1	2,2	0,57	0,55	0,58	6,1	6,1	6,3
K ₆₀ +N ₆₀	5,0	4,9	5,2	1,7	1,8	1,9	0,63	0,55	0,60	6,7	6,7	7,1
K ₆₀ +N ₉₀	6,7	6,2	6,0	3,2	2,8	2,7	0,71	0,69	0,72	9,9	9,0	8,7
K ₆₀ +N _{30m}	5,0	4,3	4,7	2,4	2,3	2,4	0,62	0,59	0,62	7,4	6,6	7,1
K ₆₀ +N _{60m}	7,3	6,8	7,3	2,6	2,8	3,1	0,78	0,71	0,75	9,9	9,6	10,4
K ₆₀ +N _{90m}	7,0	7,8	7,8	3,5	3,8	3,9	0,79	0,73	0,78	10,5	11,6	11,7
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}	0,1	0,1	0,1	0,09	0,2	0,1	0,01	0,01	0,01	-	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^A	0,3	0,4	0,3	0,2	0,5	0,3	0,03	0,03	0,03	-	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^B	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,02	0,02	0,02	-	-	-
<i>Даша</i>												
Контроль	3,0	2,6	2,4	1,0	0,9	0,8	0,53	0,50	0,50	4,0	3,5	3,2
K ₆₀	3,2	3,3	3,5	1,4	1,4	1,3	0,50	0,52	0,53	4,6	4,7	4,8
K ₆₀ +N ₃₀	4,0	4,0	4,3	1,6	1,9	1,8	0,53	0,53	0,56	5,6	5,9	6,1
K ₆₀ +N ₆₀	5,5	5,0	5,5	1,7	1,7	1,8	0,66	0,69	0,70	7,2	6,7	7,3
K ₆₀ +N ₉₀	6,6	5,5	6,3	2,7	2,7	2,8	0,73	0,60	0,68	9,3	8,2	9,1
K ₆₀ +N _{30m}	4,6	4,5	4,8	1,9	1,7	1,8	0,62	0,63	0,65	6,5	6,2	6,6
K ₆₀ +N _{60m}	6,7	6,5	7,0	1,7	1,7	1,8	0,75	0,77	0,80	8,4	8,2	8,8
K ₆₀ +N _{90m}	7,4	7,0	7,8	3,2	2,9	3,0	0,77	0,77	0,80	10,6	9,9	10,8
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}	0,1	0,2	0,1	0,08	0,1	0,1	0,01	0,02	0,01	-	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^A	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,02	0,05	0,02	-	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^B	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,01	0,03	0,01	-	-	-

Большая концентрация азота стимулирует процессы фотосинтеза и рост зелёной массы растений. Вариант K₆₀+N_{60m} включает применение *B.s. Ч-13*, который может действовать как биостимулятор, усиливая содержание N-НН4 в почве. Сумма хлорофилла а и b на контроле – 4,6 мг/г, K₆₀ – 5,4 мг/г, K₆₀+N₃₀ – 6,1 мг/г, K₆₀+N₆₀ – 6,7 мг/г, K₆₀+N₉₀ – 9,9 мг/г, K₆₀+N_{30m} – 7,4 мг/г, K₆₀+N_{60m} – 9,9 мг/г, K₆₀+N_{90m} – 10,5 мг/г. в 2023 г. по сорту гречихи Дукуль. Аналогичная динамика наблюдается и по сорту Даша в годы проведения опытов.

С увеличением вносимой дозы азота от 30 кг/га до 90 кг/га наблюдается тенденция к увеличению содержания каротиноидов в листьях растений

гречихи. На вариантах опыта, включающие применение *B.s. Ч-13* наблюдается более высокое содержание каротиноидов, по сравнению с вариантами без его использования. С увеличением содержания хлорофиллов в листьях гречихи закономерно увеличивается и содержание каротиноидов.

Применение мочевины, обработанной штаммом *Bacillus subtilis Ч-13*, доказало свою эффективность в условиях Московской области для поддержания фотосинтетического потенциала гречихи. Несмотря на снижение общего содержания хлорофиллов ($\Sigma\text{Chl.}$) на 5–15% в 2024 году у сортов Дикуль и Даша, наблюдалось увеличение уровня каротиноидов, выполняющих защитную функцию. Например, у сорта Дикуль на варианте $\text{K}_{60}+\text{N}_{90\text{m}}$ содержание каротиноидов сохранилось на высоком уровне: 0,79 мг/г (2023) \rightarrow 0,73 мг/г (2024), что свидетельствует о перераспределении ресурсов растения в пользу синтеза фотосинтетических пигментов, нейтрализующих окислительный стресс от высоких доз азота.

Ключевые преимущества биомодифицированной мочевины включают снижение потерь хлорофиллов: на варианте $\text{K}_{60}+\text{N}_{90\text{m}}$ у сорта Дикуль зафиксировано $\Sigma\text{Chl.} = 11,6$ мг/г против 9,0 мг/г при использовании обычной мочевины (+28,9%), а у сорта Даша разница составила 9,9 мг/г (с *B.s. Ч-13*) и 8,2 мг/г (без обработки), что на 17% выше. Применение *B.s. Ч-13* повысило сумму хлорофиллов на 25–35% относительно контроля ($p < 0,05$), достигнув максимума у Дикуль (11,7 мг/г) и Даша (10,8 мг/г). Сочетание стабильного уровня каротиноидов и меньшего снижения хлорофиллов обеспечивает защиту фотосистем от повреждений, что критически важно при стрессовых условиях (высокие дозы азота, климатические колебания).

3.2.4. Формирование элементов продуктивности растений гречихи, урожайность и вынос элементов питания с урожаем

Азотные удобрения оказывают значительное влияние на формирование элементов продуктивности растений гречихи, способствуют увеличению

вегетативной массы растений, что приводит к повышению количества листьев, их массы и размеров листовой пластины. Это в свою очередь улучшает фотосинтетическую активность растений, способствует накоплению питательных веществ.

Под воздействием азотных удобрений корневая система гречихи способна развиваться более активно, улучшая способность растений поглощать воду и растворенные в ней питательные вещества. Достаточное количество азота в почве способствует более обильному образованию соцветий и, как следствие, увеличению количества плодов, связано с тем, что азот участвует в синтезе аминокислот, белков и других соединений, необходимых для формирования репродуктивных органов растений.

Однако избыточное цветение гречихи в агроклиматических условиях Московской области приводит к снижению урожайности. Азотные удобрения могут влиять на сроки созревания гречихи. В зависимости от дозировки и времени внесения, они могут как ускорить, так и замедлить процесс созревания..

Поэтому для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать специфику конкретного региона и условий выращивания. Увеличение дозы азота в сочетании с калийным удобрением способствует росту числа плодов на главном побеге у гречихи сорта Диккуль. Аналогичная тенденция наблюдается и у гречихи сорта Даша (табл. 14).

Таблица 14

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на число плодов у гречихи на главном и боковых побегах, шт. /раст.

Вариант	Сорт	Число плодов на главном побеге, шт./раст			Число плодов на боковых побегах, шт./раст			Количество боковых побегов, шт./раст		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025

Таблица 14 (окончание)

Вариант	Сорт	Число плодов на главном побеге, шт./раст			Число плодов на боковых побегах, шт./раст			Количество боковых побегов, шт./раст		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Контроль	Дикуль	11,3	11,8	12,0	14,5	14,3	14,5	1,8	2,0	2,1
K ₆₀		12,0	12,5	13,2	15,3	15,7	15,9	2,5	2,4	2,5
K ₆₀ +N ₃₀		14,8	15,2	15,0	20,5	20,6	20,4	3,5	3,5	3,4
K ₆₀ +N ₆₀		15,0	15,5	16,3	17,8	19,4	20,3	3,3	3,3	3,4
K ₆₀ +N ₉₀		16,5	17,0	17,3	19,5	20,2	20,1	3,0	3,0	3,5
K ₆₀ +N _{30m}		14,3	15,0	14,9	22,0	22,5	23,0	4,5	4,3	4,4
K ₆₀ +N _{60m}		16,3	17,5	17,3	25,0	25,3	26,1	4,0	4,1	4,1
K ₆₀ +N _{90m}		18,8	19,5	19,3	22,0	22,1	22,7	3,8	3,9	3,8
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}		0,11	0,12	0,19	0,27	0,35	0,31	0,08	0,13	0,09
<i>HCP</i> ₀₅ ^A		0,35	0,23	0,43	0,62	0,79	0,70	0,2	0,29	0,21
<i>HCP</i> ₀₅ ^B		0,26	0,17	0,28	0,39	0,50	0,44	0,1	0,18	0,13
Контроль	Даша	12,3	12,4	12,5	13,5	13,3	13,2	2,3	2,4	2,4
K ₆₀		12,3	12,5	12,8	15,8	15,9	15,8	2,5	2,6	2,6
K ₆₀ +N ₃₀		15,0	14,6	14,7	16,8	16,8	17,0	3,5	3,3	3,2
K ₆₀ +N ₆₀		16,0	15,7	15,9	17,8	17,9	17,7	2,5	3,4	2,9
K ₆₀ +N ₉₀		13,0	13,6	13,4	16,5	17,0	17,4	3,5	3,5	3,3
K ₆₀ +N _{30m}		16,3	16,4	16,7	22,0	25,2	21,8	4,3	4,0	4,2
K ₆₀ +N _{60m}		16,8	16,9	16,5	23,0	25,6	21,5	4,0	4,2	4,2
K ₆₀ +N _{90m}		16,8	17,9	17,9	23,3	25,3	23,1	4,8	4,6	4,7
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}		0,13	0,15	0,18	0,24	0,53	0,20	0,08	0,12	0,09
<i>HCP</i> ₀₅ ^A		0,29	0,32	0,41	1,76	1,19	0,45	0,18	0,21	0,19
<i>HCP</i> ₀₅ ^B		0,18	0,16	0,26	0,45	0,75	0,29	0,12	0,11	0,14

Калийные удобрения (K₆₀) увеличивают количество плодов на главном побеге гречихи на 6,2% по сравнению с контролем и стимулируют рост плодов на боковых побегах (+5%). Азотные удобрения (мочевина) повышают число плодов на главном побеге на 31–46% (N₃₀–N₉₀). Биомодифицированная мочевина (*B.s. Ч-13*) показывает максимальный эффект при K₆₀+N_{90m} (+66,4% плодов на главном побеге) и увеличивает продуктивность боковых побегов на 20–30% выше контроля.

Сортовая специфика проявляется в том, что для сорта Даша K₆₀+N_{30m} даёт +94,4% урожайности зерна, а для сорта Дикуль максимум прироста

(+52,4%) наблюдается на $K_{60}+N_{60}$. Нелинейный эффект доз проявляется в том, что для сорта Дикуль N_{60} повышает урожай на 52,4%, а N_{90} — только на 33%, что указывает на стресс при избытке азота. Оптимальная комбинация K_{60} с биомодифицированной мочевиной (N_{60m}/N_{90m}) и учёт сортовых особенностей обеспечивают максимальную урожайность (табл. 15).

Таблица 15

Урожайность зерна и соломы сортов гречихи в 2023-2025 гг., ц/га

Вариант	Дикуль			Даша			Дикуль	Даша
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	Среднее 2023-2025	
<i>Зерно</i>								
Контроль	10,3	9,0	9,3	9,3	8,6	8,2	9,5	8,7
K_{60}	10,5	10,5	10,4	9,0	8,7	8,5	10,5	8,7
$K_{60}+N_{30}$	12,7	13,0	12,8	11,8	11,9	11,7	12,8	11,8
$K_{60}+N_{60}$	15,7	15,9	15,5	12,0	11,7	11,5	15,7	11,7
$K_{60}+N_{90}$	13,7	10,7	10,5	12,5	10,0	9,8	11,6	10,8
$K_{60}+N_{30m}$	13,1	17,5	17,0	11,0	11,4	11,2	15,9	11,2
$K_{60}+N_{60m}$	15,9	17,1	16,8	13,7	13,7	13,5	16,6	13,6
$K_{60}+N_{90m}$	10,7	9,7	9,5	12,9	9,5	9,3	10,0	10,6
<i>НСР₀₅^{AB}</i>	1,6	1,7	1,8	1,0	0,9	0,9	-	-
<i>НСР₀₅^A</i>	3,2	3,3	3,4	2,0	2,0	2,1	-	-
<i>НСР₀₅^B</i>	2,7	2,9	3,0	5,0	5,0	5,0	-	-
<i>Солома</i>								
Контроль	50,0	35,0	28,5	48,9	37,6	32,0	37,8	39,5
K_{60}	57,6	54,0	57,5	57,6	48,3	45,0	56,4	50,3
$K_{60}+N_{30}$	68,0	56,5	60,2	68,0	57,0	62,5	61,6	62,5
$K_{60}+N_{60}$	81,0	73,2	69,8	81,0	62,5	58,3	74,7	67,3
$K_{60}+N_{90}$	61,0	59,3	61,5	61,0	62,5	63,8	60,6	62,4
$K_{60}+N_{30m}$	65,0	60,2	58,0	50,0	58,4	55,0	61,1	54,5
$K_{60}+N_{60m}$	80,4	80,5	81,0	61,5	78,6	80,2	80,6	73,4
$K_{60}+N_{90m}$	68,0	84,0	82,5	68,0	85,1	83,3	78,2	78,8
<i>НСР₀₅^{AB}</i>	0,8	3,0	4,5	1,8	7,3	8,1	-	-
<i>НСР₀₅^A</i>	4,1	5,9	6,8	9,0	4,5	5,2	-	-
<i>НСР₀₅^B</i>	1,6	4,7	5,5	3,6	6,3	7,0	-	-

Анализ урожайности гречихи сортов Дикуль и Даша показывает, что фактор дозы удобрений (А) и биомодификации (В) оказывает значительное влияние на продуктивность культуры. Для сорта Дикуль оптимальные дозы — N_{30} и N_{60} , где урожайность стабильно растёт, превышая $НСР_{05}^A$. Высокие дозы (N_{90}) вызывают стресс, снижая урожайность.

Биомодификация эффективна для N_{30m} и N_{60m} , особенно при средних дозах, повышая урожайность на 10–25%. Для сорта Даша максимальные показатели достигаются при N_{60m} , разница с контролем составляет 4,4–5,5 ц/га, что превышает HCP_{05}^A . Сорт чувствителен к избытку азота, рекомендованы умеренные дозы (N_{30} – N_{60}). Биомодифицированные удобрения (N_{30m} , N_{60m}) повышают урожайность на 10–25%, особенно выражен эффект у Дикуль. N_{90m} не компенсирует негативное влияние высокой дозы азота, но смягчает стресс.

Таблица 16

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на формирование репродуктивных органов растений гречихи

Вариант	Сорт	Количество цветов, млн.шт/га			Количество соцветий, шт./раст			Содержание сахара, % цветок		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Контроль	Дикуль	265,7	236,8	235,9	13,8	14,7	13,7	0,930	0,905	0,880
K_{60}		258,2	191,6	220,3	15,1	14,0	14,2	0,828	0,815	0,802
$K_{60}+N_{30}$		300,6	262,8	285,4	14,3	15,8	15,9	0,922	0,897	0,872
$K_{60}+N_{60}$		319,5	251,4	305,2	15,8	15,1	14,9	0,866	0,843	0,820
$K_{60}+N_{90}$		333,1	364,7	370,8	14,8	16,9	16,5	0,933	0,908	0,883
$K_{60}+N_{30m}$		303,6	265,3	290,6	13,4	17,0	17,2	0,861	0,889	0,917
$K_{60}+N_{60m}$		308,6	307,5	315,9	19,3	18,3	18,2	0,929	0,904	0,879
$K_{60}+N_{90m}$		301,9	415,9	440,3	15,5	16,3	15,6	0,932	0,926	0,920
HCP_{05}^{AB}		-	-	-	0,08	0,06	0,05	0,08	0,08	0,07
HCP_{05}^A		-	-	-	0,18	0,21	0,23	0,2	0,2	0,21
HCP_{05}^B		-	-	-	0,12	0,16	0,14	0,1	0,1	0,12
Контроль	Даша	257,4	220,3	195,0	12,0	13,8	12,6	0,902	0,893	0,884
K_{60}		265,7	221,2	200,0	13,0	14,0	13,6	0,803	0,854	0,905
$K_{60}+N_{30}$		284,7	257,9	240,0	14,8	15,5	15,2	0,897	0,878	0,859
$K_{60}+N_{60}$		331,4	267,7	245,4	14,9	18,0	17,6	0,838	0,761	0,684
$K_{60}+N_{90}$		379,5	346,4	330,5	15,7	20,7	16,5	0,939	0,944	0,949
$K_{60}+N_{30m}$		318,6	245,6	220,0	14,0	16,1	15,9	0,871	0,827	0,783
$K_{60}+N_{60m}$		355,2	273,3	250,2	19,0	20,5	18,4	0,879	0,951	1,023
$K_{60}+N_{90m}$		376,4	252,5	230,5	15,0	18,0	17,5	0,849	0,899	0,950
HCP_{05}^{AB}		-	-	-	0,07	0,05	0,08	0,1	0,1	0,1
HCP_{05}^A		-	-	-	0,22	0,21	0,23	0,3	0,3	0,2

Таблица 16 (окончание)

Вариант	Сорт	Количество цветов, млн.шт/га			Количество соцветий, шт./раст			Содержание сахара, % цветков		
		2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
<i>НСР₀₅^B</i>	Даша	-	-	-	0,12	0,15	0,14	0,2	0,2	0,2

Азот может влиять на сроки и интенсивность цветения, а также на развитие репродуктивных органов растения. Оптимальное азотное питание способствует более обильному и продолжительному цветению, что напрямую связано с увеличением нектаропродуктивности. При применении *V.s. Ч-13* в сочетании с $K_{60}+N_{30}$ ($K_{60}+N_{30m}$) наблюдается некоторое снижение содержания сахара по сравнению с $K_{60}+N_{30}$ без *V.s. Ч-13* (0,861% против 0,922%).

В случае $K_{60}+N_{60m}$ содержание сахара составляет 0,929%, что близко к уровню контроля. При использовании $K_{60}+N_{90m}$ содержание сахара незначительно отличается от контроля и составляет 0,932%.

Из всех протестированных комбинаций наиболее эффективным является использование высоких доз азота в сочетании с *V.s. Ч-13* ($K_{60}+N_{90m}$), которое обеспечивает максимальную продукцию нектара (0,594 мг/цветок). Умеренные дозы азота в сочетании с *V.s. Ч-13* также показывают положительный эффект ($K_{60}+N_{60m}$ — 0,492 мг/цветок), что делает их перспективными для использования в условиях, где высокие дозы азота нежелательны или неэффективны. Для максимизации продукции нектара цветками гречихи рекомендуется использовать высокие дозы азота в сочетании с *V.s. Ч-13*, что позволит достичь максимального уровня нектаропродуктивности.

В годы проведения опытов применение удобрений также приводит к увеличению содержания азота в соломе, хотя различия между вариантами менее выражены по сравнению с зерном.

Варианты с применением биомодифицированной мочевины показывают более высокое содержание азота в соломе. Общая тенденция

увеличения содержания азота в соломе при применении удобрений сохраняется, но конкретные значения могут варьироваться.

В ходе проведения опытов установлено, что применение K_{60} в сочетании с мочевиной, повышает содержание P_2O_5 в зерне по сравнению с контролем. Наибольшее увеличение содержания фосфора наблюдается при высоких дозах азота 90 кг/га. В 2023 г. наибольшее увеличение содержания фосфора в соломе наблюдается при применении $K_{60}+N_{90}$.

Соответственно, применение K_{60} в сочетании с мочевиной увеличивает содержание фосфора как в зерне, так и в соломе гречихи. Наибольшее увеличение содержания фосфора наблюдается при применении высоких доз мочевины.

Существует положительная взаимосвязь между применением азотных удобрений и содержанием азота и фосфора как в зерне, так и в соломе гречихи. Увеличение дозы азота способствует повышению содержания этих элементов в обоих компонентах растения (табл. 17).

Таблица 17

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой V.s. Ч-13, на содержание азота, фосфора и калия в продукции гречихи сорта Дикуль, %

Вариант	Продукция	Содержание NPK, %								
		2023			2024			2025		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Контроль	Зерно	1,62	0,71	0,74	1,51	0,71	0,74	1,59	0,72	0,75
	Солома	0,83	0,41	0,93	0,81	0,41	0,91	0,89	0,42	0,93
K_{60}	Зерно	1,63	0,73	0,75	1,61	0,73	0,75	1,64	0,73	0,75
	Солома	0,84	0,43	1,89	0,89	0,44	1,85	0,85	0,43	1,85
$K_{60}+N_{30}$	Зерно	1,71	0,75	0,73	1,73	0,75	0,74	1,73	0,74	0,74
	Солома	0,82	0,45	1,65	0,84	0,45	1,74	0,83	0,45	1,69
$K_{60}+N_{60}$	Зерно	1,71	0,76	0,74	1,75	0,77	0,76	1,74	0,75	0,75
	Солома	0,82	0,46	1,98	0,83	0,44	1,96	0,83	0,46	1,95
$K_{60}+N_{90}$	Зерно	1,72	0,77	0,76	1,82	0,77	0,76	1,83	0,76	0,74
	Солома	0,83	0,54	1,88	0,83	0,52	1,91	0,84	0,54	1,89

Таблица 17 (окончание)

Вариант	Продукция	Содержание NPK, %								
		2023			2023			2023		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
K ₆₀ +N _{30m}	Зерно	1,81	0,75	0,74	1,66	0,75	0,77	1,78	0,74	0,75
	Солома	0,84	0,44	1,64	0,85	0,43	1,67	0,85	0,43	1,65
K ₆₀ +N _{60m}	Зерно	1,85	0,74	0,74	1,83	0,75	0,75	1,85	0,74	0,75
	Солома	0,85	0,44	1,77	0,85	0,44	1,90	0,86	0,43	1,86
K ₆₀ +N _{90m}	Зерно	1,65	0,74	0,73	1,75	0,77	0,75	1,74	0,75	0,74
	Солома	0,89	0,43	1,80	0,91	0,47	1,88	0,89	0,43	1,82
<i>HCP</i> ₀₅	<i>Зерно</i>	<i>0,1</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,04</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,05</i>	<i>0,04</i>	<i>0,1</i>	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	<i>0,1</i>	<i>0,02</i>	<i>0,06</i>	<i>0,01</i>
<i>HCP</i> _{05^A}	<i>Зерно</i>	<i>0,2</i>	<i>0,08</i>	<i>0,07</i>	<i>0,2</i>	<i>0,09</i>	<i>0,08</i>	<i>0,02</i>	<i>0,09</i>	<i>0,03</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,1</i>	<i>0,07</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,08</i>	<i>0,2</i>	<i>0,03</i>	<i>0,08</i>	<i>0,02</i>
<i>HCP</i> _{05^B}	<i>Зерно</i>	<i>0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>	<i>0,05</i>	<i>0,02</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>	<i>0,1</i>	<i>0,01</i>	<i>0,06</i>	<i>0,04</i>

В годы проведения опытов наблюдается, что внесение K₆₀ приводит к небольшому увеличению содержания калия в зерне гречихи по сравнению с контролем. Добавление мочевины к калию (K₆₀+N₃₀, K₆₀+N₆₀, K₆₀+N₉₀) в некоторых случаях поддерживает либо слегка изменяет уровень содержания калия, но значительных отклонений от фона не наблюдается. Несмотря на некоторые колебания в содержании калия как в зерне, так и в соломе, общая тенденция увеличения содержания K₂O при применении K₆₀ в комплексе с мочевиной остаётся стабильной.

Увеличение дозы азота с N₃₀ до N₉₀ приводит к увеличению выноса азота, фосфора и калия как в зерне, так и в соломе. Это подчёркивает важность подбора оптимальных доз и комбинаций удобрений для достижения максимальной эффективности. На контроле в 2023 году вынос азота в зерне составил 16,7 кг/га, а при внесении K₆₀ — 17,2 кг/га. В соломе вынос азота на контроле был 41,5 кг/га, а при внесении K₆₀ увеличился до 48,4 кг/га. Соответственно, внесение K₆₀ способствует увеличению выноса азота как с зерном, так и с соломой. При внесении K₆₀ + N₃₀ вынос азота с зерном в 2023 году составил 21,7 кг/га, что значительно выше, чем при внесении только K₆₀

(17,2 кг/га). С соломой вынос азота также увеличился до 55,7 кг/га. внесение $K_{60} + N_{30m}$ в 2024 году привело к выносу азота в зерне 18,3 кг/га и в соломе 51,2 кг/га. При внесении $K_{60} + N_{60m}$ вынос азота с зерном составил 25,0 кг/га, а с соломой — 68,5 кг/га.

Биомодифицированный карбамид показывает схожие результаты, но с некоторыми отличиями, что может указывать на специфические характеристики этих удобрений, способствующие более эффективному усвоению питательных веществ растениями гречихи сорта Дикуль.

Для достижения наибольшей продуктивности необходимо учитывать специфику почвы, климатические условия и особенности сорта гречихи, чтобы подобрать наиболее подходящие дозы и сочетания удобрений. Правильное соотношение азота, фосфора и калия в почве обеспечивает сбалансированное питание растений, что способствует более эффективному усвоению всех элементов. Например, внесение калия в сочетании с мочевиной может улучшить поглощение и использование азота растениями, что приводит к увеличению его выноса.

Удобрения влияют на физиологические процессы в растениях, такие как фотосинтез, дыхание, транспорт веществ и формирование урожая. Улучшение этих процессов способствует увеличению биомассы растений и, соответственно, выноса питательных веществ.

Оптимизация внесения удобрений, содержащих азот и калий, способствует увеличению выноса питательных веществ гречихой, что может положительно сказаться на урожайности и качестве конечной продукции. Учёт специфики почвы, климатических условий и особенностей сорта позволяет подобрать наиболее подходящие дозы и сочетания удобрений, что способствует полноценной реализации биологического потенциала культуры.

Влияние доз мочевины и биомодификации на содержание NPK в гречихе сорта Даша: повышение дозы мочевины ($N_{30} \rightarrow N_{90}$) увеличивает содержание азота в зерне и соломе, но при высоких дозах (N_{90m}) уровень азота стабилизируется или снижается. Фосфор (P) и калий (K) остаются

стабильными независимо от дозы азота, а незначительные колебания связаны с внешними факторами.

Соотношение N:P:K для зерна стабильно 2:1:1, для соломы — 2:1:2 (в варианте $K_{60}+N_{90m}$ — 2:1:4). Биомодификация (*B.s. Ч-13*) незначительно повышает усвоение азота, особенно в соломе, но не меняет соотношение NPK. Увеличение доз азота повышает его содержание, но не влияет на P и K. Стабильное соотношение NPK позволяет прогнозировать качество урожая, а биомодификация улучшает доступность азота, но не заменяет сбалансированное питание.

Применение мочевины в посевах гречихи увеличивает вынос азота, фосфора и калия, причём эффект более выражен в соломе, чем в зерне. Колебания выноса между годами указывают на влияние внешних факторов на эффективность усвоения питательных веществ растениями. С увеличением дозы азота (N_{30} , N_{60} , N_{90}) наблюдается тенденция к повышению выноса азота с зерном и соломой.

С соломой вынос всех элементов (N, P_2O_5 , K_2O) значительно выше, чем с зерном. Солома является более активным аккумулятором питательных веществ. Варианты с применением *B.s. Ч-13* ($K_{60}+N_{30m}$, $K_{60}+N_{60m}$, $K_{60}+N_{90m}$) также демонстрируют повышенный вынос, особенно в случае с азотом (табл. 18).

Таблица 18

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой *B.s. Ч-13*, на содержание азота, фосфора и калия в продукции гречихи сорта Даша, %

Вариант	Продукция	Содержание NPK, %								
		2023			2024			2025		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
<i>Даша</i>										
Контроль	Зерно	1,51	0,75	0,74	1,50	0,73	0,74	1,49	0,74	0,75

Таблица 18 (окончание)

Вариант	Продукция	Содержание NPK, %								
		2023			2023			2023		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Контроль	Солома	0,83	0,42	0,94	0,82	0,43	0,94	0,83	0,44	0,95
K ₆₀	Зерно	1,58	0,72	0,75	1,58	0,74	0,74	1,57	0,72	0,75
	Солома	0,85	0,45	1,86	0,82	0,45	1,83	0,85	0,45	1,87
K ₆₀ +N ₃₀	Зерно	1,67	0,73	0,74	1,68	0,74	0,75	1,69	0,74	0,74
	Солома	0,85	0,45	1,69	0,83	0,45	1,70	0,84	0,46	1,71
K ₆₀ +N ₆₀	Зерно	1,76	0,77	0,74	1,80	0,78	0,75	1,79	0,79	0,76
	Солома	0,85	0,46	1,89	0,85	0,46	1,87	0,87	0,47	1,88
K ₆₀ +N ₉₀	Зерно	1,76	0,77	0,76	1,75	0,77	0,76	1,76	0,78	0,76
	Солома	0,87	0,5	1,83	0,87	0,49	1,83	0,88	0,53	1,87
K ₆₀ +N _{30m}	Зерно	1,74	0,75	0,76	1,77	0,75	0,76	1,76	0,75	0,77
	Солома	0,88	0,44	1,73	0,89	0,44	1,74	0,87	0,45	1,74
K ₆₀ +N _{60m}	Зерно	1,81	0,74	0,75	1,81	0,71	0,75	1,80	0,73	0,76
	Солома	0,87	0,44	1,79	0,88	0,45	1,80	0,89	0,45	1,81
K ₆₀ +N _{90m}	Зерно	1,57	0,74	0,74	1,63	0,73	0,75	1,62	0,75	0,76
	Солома	0,89	0,45	1,81	0,9	0,45	1,82	0,91	0,45	1,83
<i>HCP₀₅</i>	<i>Зерно</i>	<i>0,1</i>	<i>0,07</i>	<i>0,01</i>	<i>0,2</i>	<i>0,04</i>	<i>0,01</i>	<i>0,2</i>	<i>0,04</i>	<i>0,01</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>0,1</i>	<i>0,04</i>	<i>0,02</i>	<i>0,1</i>	<i>0,05</i>	<i>0,02</i>	<i>0,1</i>
<i>HCP₀₅^A</i>	<i>Зерно</i>	<i>0,4</i>	<i>0,1</i>	<i>0,04</i>	<i>0,4</i>	<i>0,09</i>	<i>0,04</i>	<i>0,4</i>	<i>0,08</i>	<i>0,04</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,08</i>	<i>0,06</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,06</i>	<i>0,2</i>	<i>0,12</i>	<i>0,06</i>	<i>0,2</i>
<i>HCP₀₅^B</i>	<i>Зерно</i>	<i>0,2</i>	<i>0,1</i>	<i>0,02</i>	<i>0,2</i>	<i>0,06</i>	<i>0,02</i>	<i>0,2</i>	<i>0,05</i>	<i>0,02</i>
	<i>Солома</i>	<i>0,05</i>	<i>0,04</i>	<i>0,1</i>	<i>0,07</i>	<i>0,04</i>	<i>0,1</i>	<i>0,08</i>	<i>0,04</i>	<i>0,1</i>

Соотношение N:P:K в основном остаётся в пределах 2:1:1 для зерна и может изменяться для соломы в зависимости от варианта удобрения. В некоторых случаях, как в примере с соломой для варианта K₆₀+N_{90m}, соотношение может быть ближе к 2:1:4.

В зерне соотношение чаще всего приближается к 2:1:1, что указывает на более высокое содержание азота по сравнению с фосфором и калием (табл. 19).

Таблица 19

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на вынос элементов питания урожаем гречихи, кг/га

Вариант	Продукция	Вынос NPK, кг/га								
		2023			2024			2025		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
<i>Дикунь</i>										
Контроль	Зерно	16,7	7,3	7,6	14,0	6,6	6,8	14,8	6,7	7,0
	Солома	41,5	20,5	46,5	28,3	14,4	31,8	25,4	12,0	26,5
K ₆₀	Зерно	17,2	7,6	7,8	14,5	6,5	6,8	17,1	7,6	7,8
	Солома	48,4	24,8	109,5	48,0	23,7	99,9	48,9	24,7	106,4
K ₆₀ +N ₃₀	Зерно	21,7	9,5	24,0	20,4	8,8	8,7	22,1	9,5	9,5
	Солома	55,7	30,6	111,6	47,5	25,4	98,3	49,9	27,1	101,7
K ₆₀ +N ₆₀	Зерно	26,9	11,9	25,9	21,0	9,2	9,1	27,0	11,6	11,6
	Солома	66,4	37,3	160,4	60,8	32,2	143,7	57,9	32,1	136,1
K ₆₀ +N ₉₀	Зерно	23,6	10,6	27,2	22,8	9,6	9,5	19,2	8,0	7,8
	Солома	50,6	33,2	114,7	49,3	30,8	113,3	51,6	33,2	116,2
K ₆₀ +N _{30m}	Зерно	23,7	9,8	24,6	18,3	8,2	8,5	30,3	12,6	12,8
	Солома	54,6	28,6	106,6	51,2	25,8	99,8	49,3	24,9	95,7
K ₆₀ +N _{60m}	Зерно	29,3	11,8	11,7	25,0	10,3	10,3	31,1	12,4	12,6
	Солома	68,3	35,4	142,3	68,5	35,4	152,9	69,7	34,8	150,7
K ₆₀ +N _{90m}	Зерно	17,7	7,9	7,8	22,6	9,9	9,7	16,5	7,1	7,0
	Солома	60,5	29,2	122,4	76,4	39,5	157,9	73,4	35,5	150,2
<i>Даши</i>										
Контроль	Зерно	13,6	6,8	6,7	12,9	6,3	6,4	12,2	6,0	6,15
	Солома	40,6	20,5	46,0	30,8	16,2	35,3	26,5	14,0	30,4
K ₆₀	Зерно	16,6	7,6	7,9	13,7	6,4	6,4	13,3	6,1	6,38
	Солома	49,0	25,9	107,1	39,6	21,7	88,4	38,3	20,2	84,1
K ₆₀ +N ₃₀	Зерно	21,7	9,5	9,6	20,0	8,8	8,9	19,7	8,6	8,66
	Солома	57,8	30,6	114,9	47,3	25,7	96,9	52,5	28,8	106,9
K ₆₀ +N ₆₀	Зерно	28,0	12,2	11,8	21,1	9,1	8,8	20,6	9,0	8,74
	Солома	68,9	37,3	153,1	53,1	28,8	116,9	50,7	27,4	109,6
K ₆₀ +N ₉₀	Зерно	18,8	8,2	8,1	17,5	7,7	7,6	17,2	7,6	7,45
	Солома	53,1	30,5	111,6	54,4	30,6	114,4	56,1	33,8	119,3
K ₆₀ +N _{30m}	Зерно	30,5	13,1	13,3	20,2	8,6	8,7	19,7	8,4	8,62
	Солома	44,0	22,0	86,5	52,0	25,7	101,6	47,9	24,7	95,7
K ₆₀ +N _{60m}	Зерно	31,0	12,7	12,8	24,8	9,7	10,3	24,3	9,9	10,3
	Солома	53,5	27,1	110,1	69,2	35,4	141,5	71,4	26,0	145,1
K ₆₀ +N _{90m}	Зерно	15,2	7,1	7,1	15,5	6,9	7,1	15,0	7,0	7,0
	Солома	60,5	30,6	123,1	76,6	38,3	154,9	75,7	37,5	153,4

Максимальный суммарный вынос NPK продукцией гречихи наблюдается на варианте опыта K₆₀+N_{60m}: по сорту гречихи Дикунь 97,3 кг/га – N, 46,7 кг/га – P₂O₅, 160,2 кг/га – K₂O; по сорту гречихи Даши: 91,4 кг/га –

N, 40,3 кг/га – P₂O₅, 143,4 кг/га – K₂O. Относительно K₆₀+N₆₀ увеличение по азоту составляет: по сорту гречихи Дикуль +12,2%, по сорту гречихи Даша +13,1% (табл.20)

Таблица 20

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на суммарный вынос NPK, кг/га

Вынос	Год	Контроль	K ₆₀	K ₆₀ +N ₃₀	K ₆₀ +N ₆₀	K ₆₀ +N ₉₀	K ₆₀ +N _{30m}	K ₆₀ +N _{60m}	K ₆₀ +N _{90m}
Дикуль									
N	2023	58,2	65,6	77,4	93,3	74,2	78,3	97,6	78,2
P		27,8	32,4	40,1	49,2	43,8	38,4	47,2	37,1
K		54,1	117,3	135,6	186,3	141,9	131,2	154,0	130,2
N	2024	42,3	62,5	67,9	81,8	72,1	69,5	93,5	99,0
P		21,0	30,2	34,2	41,4	40,4	34,0	45,7	49,4
K		38,6	106,7	107,0	152,8	122,8	108,3	163,2	167,7
N	2025	40,2	66,0	72,0	84,9	70,8	79,6	100,8	89,9
P		18,7	32,3	36,6	43,7	41,2	37,5	47,2	42,6
K		33,5	114,2	111,2	147,7	124,0	108,5	163,3	157,2
2023-2025									
N		46,9	64,7	72,4	86,7	72,4	75,8	97,3	89,0
P		22,5	31,6	36,9	44,8	41,8	36,6	46,7	43,0
K		42,0	112,7	117,9	162,3	129,5	116	160,2	151,6
Даша									
N	2023	54,2	65,6	79,5	96,9	71,9	74,5	84,5	75,7
P		27,3	33,5	40,1	49,5	38,7	35,1	39,8	37,7
K		52,7	115,0	124,5	164,9	119,7	99,8	122,9	130,2
N	2024	43,7	53,3	67,3	74,2	71,9	72,2	94,0	92,1
P		22,5	28,1	34,5	37,9	38,3	34,3	45,1	45,2
K		41,7	94,8	105,8	125,7	122,0	110,3	151,8	162,0
N	2025	38,7	51,6	72,2	71,3	73,3	67,6	95,7	90,7
P		20,0	26,3	37,4	36,4	41,4	33,1	35,9	44,5
K		36,6	90,5	115,6	118,3	126,8	104,3	155,4	160,4
2023-2025									
N		45,5	56,8	73,0	80,8	72,4	71,4	91,4	86,2
P		23,3	29,3	37,4	41,3	39,5	34,2	40,3	42,5
K		43,6	100,1	115,3	136,3	122,8	104,8	143,4	150,9

У растений сорта Дикуль: при дозе N_{30m} удельный вынос N снижается на 13%, что указывает на эффективное использование удобрений. При N_{90m}

вынос возрастает на 42,7% из-за высокого расхода NPK. Оптимальная доза азота — N_{30m}. Калий (K₆₀) повышает урожайность на 10%, а комбинация K₆₀+N_{30m} даёт прибавку +67,3% к контролю. Сорт Даша: при N_{30m} удельный вынос незначительно повышается на 0,72 %, при N_{60m} падает на 2,5%. Оптимальная доза — N_{60m}. При N_{90m} удельный вынос N повышается на 24% (табл. 21).

Таблица 21

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, удельный вынос NPK, кг/т

Вынос	Год	Контроль	K ₆₀	K ₆₀ +N ₃₀	K ₆₀ +N ₆₀	K ₆₀ +N ₉₀	K ₆₀ +N _{30m}	K ₆₀ +N _{60m}	K ₆₀ +N _{90m}
Дикюль									
N	2023	56,5	62,5	60,9	59,5	54,2	59,8	61,4	73,1
P		26,9	30,8	31,6	31,3	31,9	29,3	29,7	34,7
K		52,5	111,7	106,8	118,7	103,6	100,2	96,9	121,6
N	2024	47,0	59,6	52,3	51,5	67,4	39,8	54,7	102,1
P		23,3	28,8	26,3	26,1	37,8	19,5	26,8	50,9
K		42,9	101,7	82,3	96,1	114,8	61,9	95,4	172,8
N	2025	43,3	63,5	56,3	54,8	67,5	46,8	60,0	94,6
P		20,1	31,1	28,6	28,2	39,3	22,1	28,1	44,8
K		36,0	109,8	86,9	95,3	118,1	63,8	97,2	165,5
2023-2025									
N		48,9	61,8	56,5	55,3	63,0	48,8	58,7	89,9
P		23,7	30,3	28,8	28,5	36,3	23,6	28,2	43,5
K		43,8	107,7	91,9	103,4	112,2	75,3	96,5	153,3
Даша									
N	2023	58,3	72,9	67,4	80,8	57,5	67,7	61,6	58,7
P		29,4	37,2	33,9	41,3	31,0	31,9	29,0	29,3
K		56,7	127,9	105,5	137,5	95,7	90,7	89,7	100,9
N	2024	50,8	61,3	56,6	63,4	71,9	63,3	68,6	96,9
P		26,2	32,3	28,9	32,4	38,3	30,0	32,9	47,6
K		48,5	108,9	88,9	107,5	122,0	96,8	110,8	170,5
N	2025	47,2	60,7	61,7	62,0	74,8	56,3	70,8	97,6
P		24,4	30,9	31,9	31,6	42,3	27,5	26,6	47,9
K		44,6	106,4	98,8	102,9	129,3	86,9	115,1	172,8
2023-2025									

Таблица 21 (окончание)

Вынос	Контроль	K ₆₀	K ₆₀ +N ₃₀	K ₆₀ +N ₆₀	K ₆₀ +N ₉₀	K ₆₀ +N _{30m}	K ₆₀ +N _{60m}	K ₆₀ +N _{90m}
2023-2025								
N	52,1	64,9	61,9	68,8	68,1	62,5	67,1	84,4
P	26,7	33,5	31,6	35,1	37,2	29,9	29,5	41,5
K	49,9	114,4	97,8	115,9	115,7	91,5	105,2	148,0

Результаты исследования показывают, что гречиха сорта Дикуль демонстрирует высокую эффективность усвоения азота при средних дозах (N₆₀), *КИУ_N* - 36,7%. Биомодификация при той же дозе азота повышает *КИУ_N* до 54,3%. Даша лучше реагирует на умеренные дозы (N₃₀), достигая максимального *КИУ_N* 54,0%. Высокие дозы (N₉₀) снижают *КИУ_N* до 13% (в среднем по двум сортам 2023-2025 гг.). Биомодификация *V.s. Ч-13* увеличивает КИУ для Дикуля на 11,3% для N₃₀ и на 17,3% для N₆₀. Для Даши она эффективна только при N_{60m} (*КИУ_N* 57,7%), тогда как при N_{30m} наблюдается низкий КИУ (48,7%) (табл. 22). Биомодификация N_{30m} снижает *КИУ_N* на 5,3% по сравнению с обычным N₃₀ (54,0% и 48,7%).

Таблица 22.

Коэффициент использования питательных веществ из удобрений (*КИУ_N*), %

Вариант	<i>КИУ_N</i> , %			<i>Среднее 2023-2025</i>
	2023	2024	2025	
Дикуль				
Контроль	-	-	-	-
K ₆₀	-	-	-	-
K ₆₀ +N ₃₀	39,3	18,0	20,0	25,7
K ₆₀ +N ₆₀	46,2	32,2	31,5	36,7
K ₆₀ +N ₉₀	9,6	10,7	5,3	8,6
K ₆₀ +N _{30m}	42,3	23,3	45,3	37,0
K ₆₀ +N _{60m}	53,3	51,7	58,0	54,3
K ₆₀ +N _{90m}	14,0	40,6	26,6	27,0
Даша				
Контроль	-	-	-	-

Таблица 22 (окончание)

Вариант	КИУ _N , %			Среднее 2023-2025
	2023	2024	2025	
K ₆₀	-	-	-	-
K ₆₀ +N ₃₀	46,3	46,7	68,7	54,0
K ₆₀ +N ₆₀	52,2	34,8	32,8	40,0
K ₆₀ +N ₉₀	7,0	20,7	24,1	17,3
K ₆₀ +N _{30m}	29,7	63,0	53,3	48,7
K ₆₀ +N _{60m}	31,5	67,8	73,5	57,7
K ₆₀ +N _{90m}	11,2	43,1	43,4	32,7

Различия в КИУ_N между сортами обусловлены комплексом генетических, физиологических и микробиологических факторов. Растения сорта Дикуль эффективно использует симбиоз с бактериями и адаптированы к умеренным дозам азота, тогда как растения сорта Даша требует более консервативного подхода. При применении удобрений необходимо учитывать сортовую специфику, чтобы минимизировать экологические риски и повышать продуктивность.

3.2.5. Анализ фенольного профиля растений и технологические качества зерна гречихи

Изучение вторичных метаболитов гречихи важно для оптимизации агротехнологий и понимания физиологии растений. Накопление рутина в растениях зависит от системы удобрений: микроэлементы могут стимулировать синтез, влияя на фотосинтез, стрессоустойчивость и защитные механизмы. Высокое содержание этих соединений делает гречиху ценным сырьём для функциональных продуктов питания. Определение оптимальных доз удобрений позволяет максимизировать их концентрацию, что важно для повышения пищевой ценности культуры и устойчивости растений к стрессам (табл. 20).

Влияние доз азота (фактор А) на синтез рутина проявляется следующим образом: при низких и умеренных дозах (N₃₀, N₆₀) растения сорта Дикуль показывает стабильные результаты с N₃₀ (65,8 → 63,8 → 65,5 мг/г), тогда как N₆₀ вызывает падение в 2024 г. (66,8 → 66,2 → 64,7 мг/г). Даша при

N_{30} демонстрирует снижение с 69,4 до 66,2 мг/г, а N_{60} приводит к падению до 55,5 мг/г. Высокие дозы (N_{90}) без биомодификации снижают рутин у Дикуля до 53,2 мг/г, но с биомодификацией (N_{90m}) рост достигает 63,8 мг/г. У Даши без биомодификации 64,1 мг/г, а с ней — максимум 68,5 мг/г.

Эффект биомодификации (фактор В) положительный для Дикуля: N_{30m} даёт прирост на 4,9 мг/г (70,4 и 65,5), N_{90m} — на 10,6 мг/г (63,8 и 53,2). Для Даши N_{90m} увеличивает рутин на 4,4 мг/г (68,5 и 64,1). Отрицательное влияние наблюдается у сорта растений Даша тоже самое, что выше + N_{30m} (падение на 7,4 мг/г) и растений сорта Дикуля + N_{60m} (незначительный эффект).

Сравнение сортов показывает, что у сорта растений Дикуль оптимально накопление рутина при N_{30m} (70,4 мг/г), а растения сорта Даша — при N_{90m} (68,5 мг/г). Растения сорта Дикуль неустойчивы к N_{90} без модификации, тогда как растения сорта Даша адаптируется. Динамика контроля: у Дикуля снижение на 18,3% (67,5 → 55,2 мг/г), у Даши стабильность ($\pm 2,5\%$). $K_{60}+N_{30m}$ для Дикуля восстанавливается до 70,4 мг/г в 2025 г., для Даши остаётся неэффективным (58,8 мг/г). $K_{60}+N_{90m}$ у Даши снижается до 68,5 мг/г, но остаётся выше контроля. Статистическая значимость: для Дикуля $K_{60}+N_{30m}$ и контроль (15,2 мг/г > $НСР_{05}^A=3,2$), $K_{60}+N_{90}$ и $K_{60}+N_{90m}$ (10,6 мг/г > $НСР_{05}^B=2,0$). Для Даши $K_{60}+N_{60}$ и $K_{60}+N_{60m}$ (8,5 мг/г > $НСР_{05}^{AB}=1,6$).

Применение мочевины в дозе 30 кг/га, 60 кг/га, 90 кг/га в комплексе с калием в дозе 60 кг/га в большинстве случаев приводит к увеличению содержания рутина по сравнению с контролем. Однако есть исключения, например, при дозе мочевины в 90 кг/га в 2023 г. содержание рутина снижается по сравнению с контролем, что может указывать на влияние карбамида на накопление рутина в растениях гречихи. Содержание рутина в соломе варьируется в зависимости от сорта растений гречихи. Например, на варианте опыта $K_{60}+N_{30m}$ у сорта Дикуль содержание рутина выше, чем у сорта Даша в 2023 г., но в 2024 г. данная разница уменьшается. Соответственно, генетические особенности сортов могут влиять на их

способность накапливать рутин при одинаковых условиях удобрения. Наблюдаются различия в содержании рутина между 2023 и 2024 годами при одинаковых вариантах удобрения и сортах. Это может быть связано с изменениями погодных условий, почвенных характеристик или других внешних факторов, влияющих на рост и развитие растений. Варианты опыта при применении *V.s. Ч-13* также показывают увеличение содержания рутина по сравнению с контролем, что указывает на имеющийся потенциал оптимизации доз удобрений для повышения накопления рутина в соломе. Для максимального накопления рутина необходимо подбирать оптимальные дозы и соотношения калия и азота, учитывая внешние условия и особенности сорта гречихи.

Лузга гречихи — оболочка зерна, отделяемая при переработке. Содержит рутин и хлорогеновую кислоту. Применяется в сельском хозяйстве как органическое удобрение, улучшающее аэрацию почвы, и в медицине/фармацевтике для производства антиоксидантных и противовоспалительных препаратов и БАДов. Изучение содержания активных веществ важно для расширения сфер применения лузги (табл. 23).

Таблица 23

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой *V.s. Ч-13*, на содержание рутина в лузге и соломе гречихи, мг/г

Вариант	2023		2024		2025		Среднее	
	<i>Дикуль</i>	<i>Даша</i>	<i>Дикуль</i>	<i>Даша</i>	<i>Дикуль</i>	<i>Даша</i>	<i>Дикуль</i>	<i>Даша</i>
Солома								
Контроль	67,5	67,5	58,0	66,8	55,2	65,0	60,2	66,4
K ₆₀	59,3	64,6	50,5	61,8	52,1	60,3	54,0	62,2
K ₆₀ +N ₃₀	65,8	69,4	63,8	67,9	65,5	66,2	65,0	67,8
K ₆₀ +N ₆₀	66,8	55,8	66,2	58,0	64,7	55,5	65,9	56,4
K ₆₀ +N ₉₀	44,3	61,4	56,8	66,8	53,2	64,1	51,4	64,1
K ₆₀ +N _{30m}	77,8	57,3	68,1	60,5	70,4	58,8	72,1	58,9
K ₆₀ +N _{60m}	61,5	66,5	63,8	65,6	62,0	64,0	62,4	65,4
K ₆₀ +N _{90m}	59,3	72,8	67,2	70,7	63,8	68,5	63,4	70,7
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}	1,4	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^A	3,0	3,0	2,8	3,3	3,2	3,4	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^B	1,9	1,9	1,8	2,1	2,0	2,1	-	-

Таблица 23 (окончание)

Вариант	2023		2024		2025		Среднее	
	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша	Дикуль	Даша
Лузга								
Контроль	6,8	8,4	7,7	7,1	7,2	6,9	7,6	7,1
K ₆₀	7,5	13,7	5,9	12,4	6,3	11,8	9,0	10,2
K ₆₀ +N ₃₀	11,5	13,7	13,4	12,6	14,1	13,1	12,9	13,3
K ₆₀ +N ₆₀	6,8	16,2	11,1	14,3	12,9	12,7	11,4	13,3
K ₆₀ +N ₉₀	7,0	5,9	8,2	9,7	8,8	8,4	7,0	9,0
K ₆₀ +N _{30m}	13,8	6,0	8,4	7,6	8,7	8,2	9,4	8,2
K ₆₀ +N _{60m}	16,4	6,1	15,8	9,5	16,2	10,1	12,8	11,9
K ₆₀ +N _{90m}	6,1	14,4	7,8	13,4	8,1	12,9	9,4	11,5
<i>HCP</i> ₀₅ ^{AB}	1,5	0,4	0,6	0,4	1,7	0,3	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^A	3,4	0,9	1,5	0,9	4,0	1,0	-	-
<i>HCP</i> ₀₅ ^B	2,1	0,5	0,9	0,6	1,9	0,9	-	-

Анализ показывает, что растения сорта Дикуль в лузге демонстрируют максимальное содержание рутина при использовании K₆₀+N_{60m} (16,4 → 15,8 → 16,2 мг/г), где биомодификация N₆₀ повышает синтез рутина на 50–70% по сравнению с контролем. Сорт Даша достигает пиковых значений при K₆₀+N₆₀ (16,2 → 14,3 → 12,7 мг/г), но с ежегодным снижением, при этом биомодификация (N_{60m}) для Даши неэффективна (6,1 → 9,5 → 10,1 мг/г). Оптимальные дозы азота для Дикуля — N_{60m}, а для Даши — N₆₀ без модификации, однако у растений сорта Даша наблюдается риск снижения содержания рутина на 3,5 мг/г за 3 года. Токсичность высоких доз (N₉₀) у Даши приводит к падению до 8,4 мг/г (2025), что на 4,5 мг/г ниже контроля, тогда как у Дикуля N_{90m} даёт стабильные 8,1–8,8 мг/г, но ниже оптимальных значений. Биомодификация оказывает положительный эффект на Дикуль (рост рутина на 9,3 мг/г к контролю) и умеренный эффект на Дашу (рост до 12,9 мг/г при N_{90m}), но отрицательна для Даши при N_{30m} (снижение до 8,2 мг/г) и для Дикуля при N_{30m} (падение с 13,8 до 8,7 мг/г). Динамика по годам показывает стабильность K₆₀+N_{60m} у Дикуля и снижение K₆₀+N₆₀ у Даши, а также рост K₆₀+N_{90m} у Даши с 14,4 до 12,9 мг/г. Статистическая значимость подтверждена для Дикуля (K₆₀+N_{60m} и контроль: 16,2 и 7,2, разница 9,0 мг/г >

НСП₀₅^A=4,0) и Даши (K₆₀+N_{90m} и контроль: 12,9 и 6,9, разница 6,0 мг/г > НСП₀₅^A=1,0).

Увеличение дозы азота (N) до 30 кг/га повышает сбор белка (с 74,55 до 114,6 кг/га), но избыток (90 кг/га) снижает его из-за чрезмерного роста зелёной массы. Биомодифицированные удобрения дают неоднозначный эффект: для Дикюля максимум белка наблюдается при K₆₀+N₆₀ (136,8 кг/га в 2023 г.), N₃₀ — 114,6 кг/га, а биомодификация (N_{30m}, N_{60m}) даёт 103–106 кг/га. Для Даши лучший результат при K₆₀+N₆₀ (134,7 кг/га), но биомодифицированные варианты (N_{60m}) дают ещё выше — до 149,8 кг/га. В 2024 году у Дикюля максимум при N₆₀ (127,9 кг/га), у Даши — максимум на биомодифицированном N₆₀. Общая тенденция: рост урожайности зерна коррелирует с увеличением сбора белка, но зависимость нелинейна (например, урожайность 15,7 ц/га даёт 136,7 кг/га белка) (табл. 24).

Таблица 24

Влияние традиционной мочевины и мочевины, обработанной культурой В.с. Ч-13, на содержание сырого белка и сырого жира в зерне гречихи, %

Вариант	Содержание сырого белка, %						Содержание сырого жира, %					
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
	Дикюль			Даша			Дикюль			Даша		
Контроль	7,93	8,59	8,62	8,17	8,18	8,23	3,50	3,58	3,61	3,61	3,62	3,64
K ₆₀	7,10	8,27	8,35	7,09	7,12	7,20	3,49	3,49	3,50	3,45	3,52	3,53
K ₆₀ +N ₃₀	9,04	9,05	9,11	8,56	8,59	8,65	3,52	3,59	3,60	3,52	3,53	3,55
K ₆₀ +N ₆₀	8,69	8,96	9,00	8,46	8,49	8,54	3,48	3,55	3,57	3,54	3,58	3,60
K ₆₀ +N ₉₀	7,30	8,58	8,64	9,85	9,87	9,92	3,36	3,48	3,49	3,53	3,53	3,54
K ₆₀ +N _{30m}	7,87	8,34	8,40	8,56	8,57	8,61	3,60	3,72	3,75	3,56	3,58	3,60
K ₆₀ +N _{60m}	6,66	9,35	9,41	8,65	8,62	8,70	3,54	3,63	3,63	3,55	3,57	3,59
K ₆₀ +N _{90m}	7,24	9,12	9,18	9,64	9,25	9,32	3,70	3,76	3,76	3,55	3,59	3,62
<i>НСП₀₅^{AB}</i>	<i>0,15</i>	<i>0,34</i>	<i>0,38</i>	<i>0,17</i>	<i>0,26</i>	<i>0,28</i>	<i>0,04</i>	<i>0,14</i>	<i>0,15</i>	<i>0,04</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>
<i>НСП₀₅^A</i>	<i>0,34</i>	<i>0,76</i>	<i>0,82</i>	<i>0,38</i>	<i>0,60</i>	<i>0,63</i>	<i>0,23</i>	<i>0,32</i>	<i>0,33</i>	<i>0,22</i>	<i>0,13</i>	<i>0,15</i>
<i>НСП₀₅^B</i>	<i>0,22</i>	<i>0,48</i>	<i>0,5</i>	<i>0,24</i>	<i>0,39</i>	<i>0,41</i>	<i>0,9</i>	<i>0,20</i>	<i>0,21</i>	<i>0,08</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>

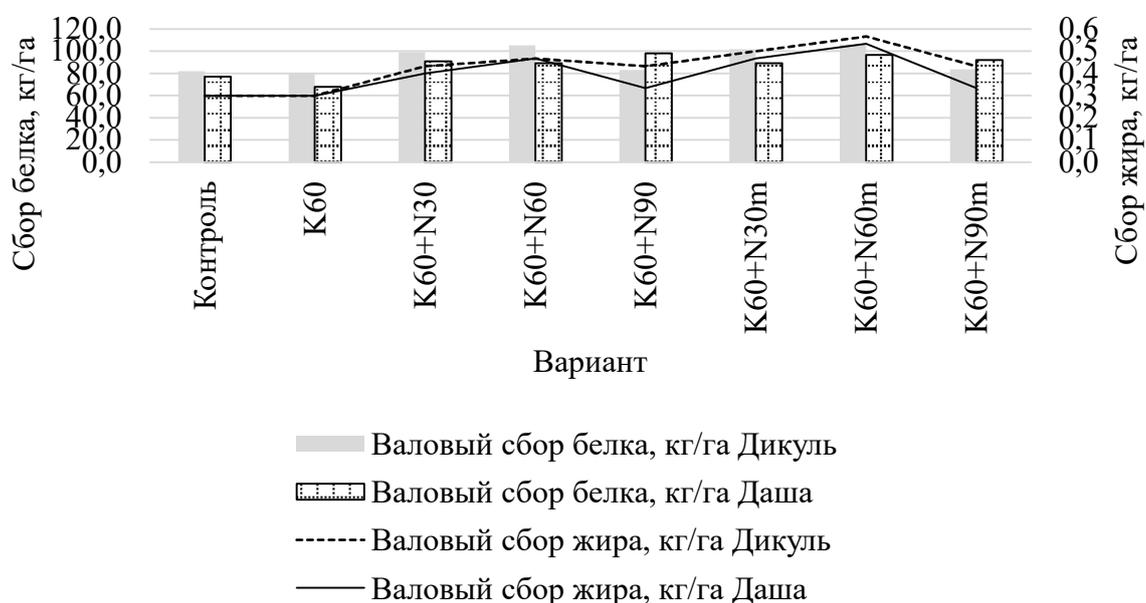
Увеличение дозы азота (N) до 60 кг/га (K₆₀+N₆₀) повышает содержание белка у сорта Дикюль (9,41 % в 2025 г.), но разница с контролем (8,62 %)

статистически незначима ($HCP_{05^A}=0,82$). Биомодификация N_{60m} даёт прирост белка на 4,1 мг/г по сравнению с обычным N_{60} , однако это также не превышает порог значимости ($HCP_{05^{AB}}=0,38$). Для Даши максимальное содержание белка наблюдается при $K_{60}+N_{90}$ (9,92 %), что на 1,69 % выше контроля и значимо ($HCP_{05^A}=0,63$).

Биомодификация N_{90m} снижает белок до 9,32 %, причём разница с обычным N_{90} (-6,0 мг/г) значима ($HCP_{05^{AB}}=0,28$). Содержание жира у Дикуля достигает максимума при $K_{60}+N_{90m}$ (3,76 %), что на 2,7 мг/г выше, чем при $K_{60}+N_{90}$, и значимо ($HCP_{05^{AB}}=0,15$). Для Даши содержание жира остаётся стабильным (3,55–3,62 %), а биомодификация не оказывает значимого влияния (разницы $\leq 0,7$ мг/г при $HCP_{05^{AB}}=0,07$).

У гречихи сорта Дикуль биомодификация N_{90m} значимо повышает жир, но не влияет на белок. У Даши биомодификация N_{90m} снижает белок, сохраняя жир на уровне контроля (рис.11).

Рисунок 11.



Валовый сбор белка и жира, кг/га (среднее 2023-2025 гг.)

У сорта Дикуль максимальный валовый сбор белка достигается при использовании биомодифицированных удобрений $K_{60}+N_{60m}$ (106,1 кг/га), что на 0,8 кг/га больше по сравнению с обычными удобрениями N_{60} (105,3 кг/га).

Минимальное значение наблюдается при применении $K_{60}+N_{90}$ (83,2 кг/га), где избыток азота без модификации снижает сбор на 22,9 кг/га относительно максимума. Биомодификация N_{30m} повышает сбор белка на 2,4 кг/га по сравнению с обычным N_{30} (99,2 → 101,6 кг/га). Для Даши максимальный сбор белка фиксируется при $K_{60}+N_{90}$ (98,1 кг/га), что на 21,1 кг/га выше контроля (77,0 кг/га). Минимум наблюдается при K_{60} (67,8 кг/га), где дефицит азота снижает сбор на 30,3 кг/га. Биомодификация N_{60m} увеличивает сбор белка на 7,5 кг/га по сравнению с обычным N_{60} (89,2 → 96,7 кг/га), тогда как N_{90m} снижает его до 91,9 кг/га (на 6,2 кг/га меньше, чем у N_{90}).

Анализ содержания жира у растений сорта Дикуль достигает максимума при $K_{60}+N_{60m}$ (0,6 кг/га), где биомодификация N_{60} увеличивает сбор на 0,1 кг/га по сравнению с обычным N_{60} . Минимум зафиксирован при контроле и K_{60} (0,3 кг/га). У Даши максимум жира наблюдается при $K_{60}+N_{30m}$ и $K_{60}+N_{60m}$ (0,5 кг/га), а минимум — при контроле, K_{60} , $K_{60}+N_{90}$ и $K_{60}+N_{90m}$ (0,3 кг/га). Биомодификация N_{30m}/N_{60m} даёт небольшой прирост жира (0,1–0,2 кг/га).

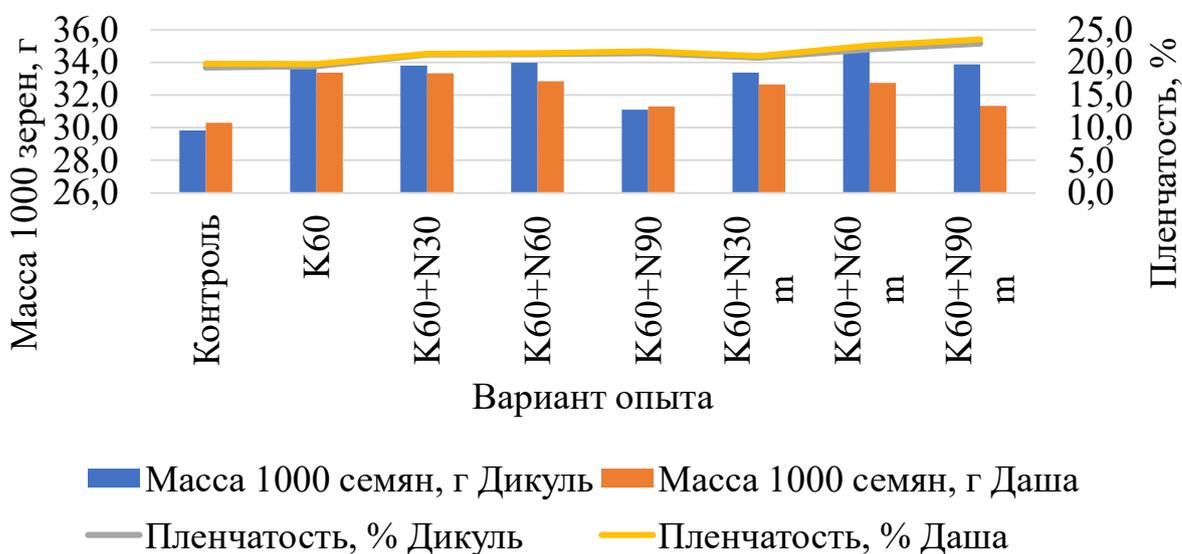


Рисунок 12. Технологические качества зерна гречихи

Анализ содержания белка и жира показывает, что у растений сорта Дикуль максимум белка (106,1 кг/га) и жира (0,6 кг/га) достигается при $K_{60}+N_{60m}$. У гречихи сорта Даша максимум белка (98,1 кг/га) фиксируется при $K_{60}+N_{90}$, а жира (0,5 кг/га) — при $K_{60}+N_{30m}/N_{60m}$. У сорта Дикуль

максимальная масса 1000 семян достигается при использовании удобрений $K_{60}+N_{60m}$ (35,4 г в 2025 г.), что на 1,1 г выше, чем у обычного N_{60} (34,3 г). Минимум массы зафиксирован в контроле (30,0 г). Биомодификация N_{60m} повышает массу на 1,1 г, но разница незначима ($HCP_{05}^{AB}=1,6$). Пленчатость у Дикуля максимальна при $K_{60}+N_{90m}$ (23,4% в 2025 г.), что на 3,6% выше, чем у обычного N_{90} (21,6%), и разница значима ($HCP_{05}^{AB}=1,4$) (рис. 12). У сорта Даша максимальная масса семян сохраняется при $K_{60}+N_{30}$ (33 г в 2025 г.), а минимум зафиксирован при $K_{60}+N_{90m}$ (26,5 г в 2025 г.). Биомодификация N_{90m} снижает массу на 5,4 г по сравнению с обычным N_{90} (31,9 → 26,5 г), что значимо (разница > $HCP_{05}^{AB}=1,5$). Пленчатость у Даши максимальна при $K_{60}+N_{90m}$ (23,7% в 2023 г.), но разница с обычным N_{90} незначительна ($HCP_{05}^{AB}=1,5$). Взаимодействие факторов А и Б показывает, что у сорта Дикуль разница между $K_{60}+N_{60}$ и $K_{60}+N_{60m}$ незначительна (1,1 г < $HCP_{05}^{AB}=1,2$), а у сорта Даша $K_{60}+N_{90m}$ к $K_{60}+N_{90}$ демонстрирует значимое снижение массы (-5,4 г > $HCP_{05}^{AB}=1,5$). Для пленчатости у Дикуля $K_{60}+N_{90m}$ и $K_{60}+N_{90}$ показывает значимый рост (+1,8% > $HCP_{05}^{AB}=1,4$), тогда как у Даши разница незначительна (+1,4% < $HCP_{05}^{AB}=1,5$). Биомодификация значительно не влияет на массу 1000 семян. Сравнение сортов гречихи Дикуль и Даша показывает, что растения сорта Дикуль демонстрирует более высокую окупаемость удобрений почти во всех вариантах, особенно при использовании модифицированных форм азота (N_{30m} , N_{60m}) (табл. 25).

Таблица 25

Окупаемость зерна, кг зерна / кг/Н

Вариант	Дикуль			Даша			Дикуль	Даша
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	Среднее 2023-2025	
<i>Зерно</i>								
Контроль	-	-	-	-	-	-	-	-
K_{60}	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{60}+N_{30}$	8,0	13,3	11,7	8,3	11,0	11,7	11,0	10,3
$K_{60}+N_{60}$	9,0	11,5	10,3	4,5	5,2	5,5	10,3	5,0
$K_{60}+N_{90}$	3,8	1,9	1,3	3,6	1,6	1,8	2,3	2,3
$K_{60}+N_{30m}$	9,4	28,4	25,7	5,6	9,4	10,0	21,3	8,3

Таблица 25 (окончание)

Вариант	Дикуль			Даша			Дикуль	Даша
	2023	2024	2023	2024	2023	2024	Среднее 2023-2025	
K ₆₀ +N _{60m}	9,4	13,5	12,5	7,3	8,5	8,8	11,9	8,2
K ₆₀ +N _{90m}	0,4	0,8	0,2	4	1	1,2	0,6	2,1

Сорт Даша показывает более низкие результаты, особенно при высоких дозах азота (N₉₀). Оптимальная доза азота составляет N₃₀–N₆₀. У сорта Дикуль максимальные результаты наблюдаются при использовании K₆₀+N₃₀ (среднее за 2023–2025 — 11,0) и K₆₀+N₆₀ (10,3), тогда как у гречихи сорта Даша лучшие показатели — K₆₀+N₃₀ (10,3) и K₆₀+N₆₀ (5,0). Высокие дозы азота (N₉₀) резко снижают окупаемость: у сорта Дикуль K₆₀+N₉₀ — 2,3, у сорта Даша — 2,3. Модифицированные формы азота (N_{30m}, N_{60m}) у сорта Дикуль дают максимальные результаты (K₆₀+N_{30m} — 21,3, K₆₀+N_{60m} — 11,9), тогда как у сорта Даша они менее эффективны (K₆₀+N_{30m} — 8,3, K₆₀+N_{60m} — 8,2). N_{90m} неэффективен для обоих: у сорта Дикуль — 0,6, у сорта Даша — 2,1. Динамика по годам показывает пик окупаемости у гречихи сорта Дикуль в 2024 году для N_{30m} (28,4 кг/кг/N) и стабильный рост у сорта Даша по годам в варианте K₆₀+N_{30m} (с 5,6 в 2023 до 10,0 в 2025).

3.3. Экономическая эффективность применения биокарбамида при возделывании гречихи посевной на дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой почве

Экономическая эффективность применения карбамида под гречиху зависит от множества факторов. В их число входят как антропогенные и абиотические, так и биотические. К ведущему биотическому фактору живой природы, направленный на формирование полноценного урожая гречихи в условиях Центрального Нечерноземного региона России, целесообразно считать количество насекомых — опылителей, которых в условиях Московской области недостаточно.

Применение микробиологических препаратов на основе штаммов микроорганизмов (например, *B.s. Ч-13*), способных улучшать плодородие почвы, повышать устойчивость к абиотическим факторам (засоление, засуха и др.), снижать риск возникновения заболеваний растений, улучшать усвоение удобрений, а также оказывать косвенное влияние на опыление выступает перспективной технологией возделывания гречихи в зоне рискованного земледелия. Безусловно, ведущим фактором повышения урожайности гречихи выступает создание новых сортов. Внедрение новых сортов в практику растениеводства способствует повышению урожайности культуры, а проведение исследований на новых сортах способствует проникновению культуры в другие регионы России. Из данных статистического анализа производства гречихи видно, что культуру практически не выращивают на территории Московской области, разве только в небольших крестьянских и фермерских хозяйствах. Расчет экономической эффективности производства гречихи на зерно осуществлялся исходя из базовой стоимости продукции: стоимость зерна – 3000 руб./ц, стоимость карбамида – 1874 руб./ц (18740 руб./т), стоимость сульфата калия – 3780 руб./ц, стоимость микробиологического препарата «Экстрасол» - 100 руб./л. (цены взяты из открытых источников) (табл.26).

Таблица 26

Экономическая эффективность производства гречихи на зерно и солому в Центральном Нечерноземном регионе России

Показатель	K ₆₀	K ₆₀ +N ₃₀	K ₆₀ +N ₆₀	K ₆₀ +N ₉₀	K ₆₀ +N _{30m}	K ₆₀ +N _{60m}	K ₆₀ +N _{90m}
Урожайность, ц/га	10,5	12,8	15,7	11,6	15,9	16,6	10
Прибавка, ц/га	1,0	3,3	6,2	2,1	6,4	7,1	0,5
Стоимость прибавки, руб/га	3000	9900	18600	6300	19200	21300	1500

Таблица 26 (продолжение)

Показатель	K₆₀	K₆₀+N₃₀	K₆₀+N₆₀	K₆₀+N₉₀	K₆₀+N_{30m}	K₆₀+N_{60m}	K₆₀+N_{90m}
Затраты на применение удобрений, всего, руб/га. (с учетом инокуляции карбамида), в т.ч.:	5125	6506	7887,8	9268,	7158,9	9192,1	11225
стоимость мин. удобр.	4536	5758	6980	8202	6410,3	8284,7	10159
на внесение мин. уд.	589,7	748,6	907,4	1066	748,6	907,4	1066,3
Затраты на уборку, доработку и реал-ю допол.продукции, руб/га	900	2970	5580	1890	5760	6390	450
Всего затрат,руб/га	6025	9476	13467	11158	12918	15582,1	11675
Чист. доход, руб/га	-3026	423	5132	-4859	6281	5718	-10175
Окупаемость	0,50	1,04	1,38	0,56	1,49	1,37	0,13
Рентабельность,%	-50,2	4,5	38,1	-43,5	48,6	36,7	-87,2
Даша							
Урожайность, ц/га	8,7	11,8	11,7	10,8	11,2	13,6	10,6
Прибавка, ц/га	0	3,1	3	2,1	2,5	4,9	1,9
Стоимость прибавки, руб/га	0	9300	9000	6300	7500	14700	5700
Затраты на применение удобрений, всего, руб/га. (с учетом инокуляции карбамида), в т.ч.:	5125	6506	7887	9268	7158	9192	11225
стоимость мин. удобр.	4536	5758	6980	8202	6410	8284	10159
на внесение мин. уд.	589,7	748,6	907,4	1066,3	748,6	907,4	1066,3
Затраты на уборку, доработку и реал-ю допол.продукции, руб/га	0	2790	2700	1890	2250	4410	1710
Всего затрат,руб/га	5125	9296,7	10587	11158	9408,9	13602,1	12935
Чист. доход, руб/га	-5125	3,3	-1587	-4858	-1908	1097	-7235

Таблица 26 (окончание)

Показатель	K_{60}	$K_{60}+N_{30}$	$K_{60}+N_{60}$	$K_{60}+N_{90}$	$K_{60}+N_{30m}$	$K_{60}+N_{60m}$	$K_{60}+N_{90m}$
Окупаемость	0	1,00	0,85	0,56	0,80	1,08	0,44
Рентабельность, %	-100	0,0	-15,0	-43,5	-20,3	8,1	-55,9

На сорте Диккуль рентабельность на уровне 37 - 49% достигалась при внесении карбамида в дозе N_{60} и биокарбамида при применении 30-60 кг/га азота на калийном фоне. Это говорит о том, что данный сорт можно отнести к интенсивным, он хорошо отзывается на минеральные удобрения. Максимальная рентабельность наблюдается на варианте опыта $K_{60}+N_{60}$ и достигает 38,1%. Применение биомодифицированного карбамида в дозе 30 кг/га незначительно повышает рентабельность производства гречихи на зерно. Максимальная рентабельность наблюдается на варианте опыта $K_{60}+N_{30m}$. Но диапазон оптимальных доз по обоим формам карбамида лежит в очень узкой области - 30-60 кг/га. Дальнейшее увеличение влечет к полеганию гречихи, снижению урожайности, и, как следствие, падению рентабельности. Сорт гречихи Даша можно отнести к экстенсивным для условий Московской области. Он имеет не только более низкую урожайность, но и меньшие величины прибавки урожайности зерна от эквивалентных доз азота. Только внесение биокарбамида в дозе N_{60} на калийном фоне позволило выйти на минимальный уровень рентабельности – 8,1 % с прогнозируемым уровнем чистого дохода на уровне 1 тыс. руб./га. Внесение небактериализованного карбамида под данный сорт гречихи было не рентабельным. При применении традиционного карбамида в дозе 30 кг/га по сорту гречихи Даша не наблюдается рентабельного производства.

Таким образом, применение карбамида в целом положительно сказывается на урожайности культуры, но эффективность зависит от конкретной схемы применения. Схемы $K_{60}+N_{30m}$ и $K_{60}+N_{60m}$ показывают высокую рентабельность и окупаемость, что говорит об их экономической целесообразности. На дерново-слабоподзолистой глееватой легкосуглинистой

почве в условиях Центрального Нечерноземного района России экономически выгодно возделывание интенсивного сорта Диккуль, отзывчивого на азотные удобрения в диапазоне 30-60 кг N/га, при чистом доходе в 6 тыс.руб./га.

Заключение

В современных агротехнологиях активно применяются микробные препараты, содержащие полезные микроорганизмы. К числу таких микроорганизмов относится культура *B.s. Ч-13*, обладающая ценными сельскохозяйственными свойствами. Микробные удобрения способствуют улучшению почвенной микрофлоры за счет выстраивания симбиотических взаимоотношений с другими бактериями в корнеобитаемом слое почвы, активизации минерализации органического вещества и повышению доступности минеральных элементов для растений. В результате применения микробных удобрений улучшается рост и развитие растений, повышается их урожайность и качество конечной продукции. Результаты показали, что применение *B.s. Ч-13* способствует интенсификации биологической активности почвы, улучшению питания растений гречихи и повышению их устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды. Было отмечено, что на вариантах опыта с применением *B.s. Ч-13* растения гречихи демонстрировали более интенсивный рост, лучшую развитость надземной массы по сравнению с контрольными образцами. Кроме того, применение препаратов способствовало увеличению количества зёрен в соцветиях, что в итоге привело к росту урожайности. На основании проведённых исследований можно сделать **выводы** о положительном влиянии новых микробных удобрений на гречиху, а именно:

1. Установлено, что увеличение доз азота положительно влияет на увеличение углерода микробной биомассы почвенных микроорганизмов, микробо-опосредованное почвенное дыхание и уреазную активность.

Биомодификация карбамида культурой V.s. Ч-13 замедляет высвобождение NH_4^+ , поддерживая баланс N-форм ($\text{N-NO}_3/\text{N-NH}_4$), снижая потери нитратов.

2. С увеличением доз азота увеличивается содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений гречихи с 4 мг/г сырой массы на контроле до 10,2...11,0 мг/г ($\Sigma\text{Chl.a}+\text{Chl.b}$) при внесении азота под сорта Дикуль и Даша. Соотношение хлорофилла а/хлорофиллу b на вариантах остается относительно стабильным и находится в диапазоне 2 – 2,5/1. Содержание каротиноидов (*Carot.*) возрастает с увеличением доз азота, что обеспечивает защиту фотосистем от окислительного стресса.

3. С увеличением дозы вносимого азота увеличиваются основные морфологические показатели растений (площадь листьев, ФП посевов, высота растений, количество цветов и др.), биомодификация усиливает эффект. Содержание рутина в соломе выше – 60-70 мг/г, чем в лузге (9-12 мг/г) у обоих сортов. С увеличением доз вносимого карбамида увеличивается содержание рутина в соломе и лузге гречихи. Биомодификация оказывает положительное влияние на содержание рутина и в лузге, и соломе гречихи.

4. Наиболее отзывчивым на внесение карбамида был сорт Дикуль. Максимальный прирост урожайности наблюдался при внесении карбамида, модифицированного штаммом V.s. Ч-13 в дозе 60 кг/га – 16,6 ц/га. Сорт гречихи Даша обеспечивала несколько меньшую урожайность – 13,6 ц/га при внесении эквивалентных доз азота. Биомодификация позволяет получить дополнительную прибавку урожайности: по сорту Дикуль: $\text{N}_{30\text{m}}$ – 3,1 ц/га, $\text{N}_{60\text{m}}$ – 0,9 ц/га, по сорту Даша $\text{N}_{60\text{m}}$ – 1,9 ц/га, обеспечивая окупаемость 1 кг азота 21,3-11,9 кг и 8,2 кг зерна соответственно.

5. Биомодификация карбамида существенно не влияет на содержание сырого белка в зерне гречихи, которое в среднем за 3 года составляет: у сорта Дикуль 8,20-9,07% и 8,19-9,88% у сорта Даша (при максимальной дозе N_{90}). Содержание сырого жира в семенах гречихи колеблется по вариантам опыта и сортам, также, несущественно, и составляет в среднем 3,6-3,7% сухого вещества.

6. Применение карбамида, модифицированного *шт. В.с. Ч-13*, увеличивает содержание и хозяйственный вынос NPK с основной и побочной продукцией гречихи, а также удельный вынос на 1 т зерна с учётом побочной продукции, который составляет для сорта Дикуль – $N_{60}P_{30}K_{100}$ и сорта Даша – $N_{70}P_{30}K_{110}$. С увеличением доз азота вынос азота, фосфора и калия растёт за счёт увеличения их содержания и урожайности вегетативной массы. Биомодификация повышает КИУ_N до 54,3...57,7% на варианте опыта с дозой мочевины в 60 кгN/га. Высокие дозы $(NH_2)_2CO$ снижают КИУ_N до 27,0...32,7%.

7. Применение карбамида, обработанного *шт. В.с. Ч-13* обеспечивает рентабельность производства культуры в условиях дерново-слабоподзолистых почв Московской области на уровне 48,6% по сорту Дикуль ($K_{60}+N_{30m}$) и 8,1% по сорту гречихи Даша ($K_{60}+N_{60m}$). Установлено, что применение микробиологического препарата «Экстрасол» для обработки карбамида значительно повышает экономическую эффективность производства гречихи.

В целом установлено, что применение микробиологического препарата «Экстрасол» для обработки карбамида значительно повышает экономическую эффективность производства гречихи. Таким образом, в Центральном Нечернозёмном районе на дерново-слабоподзолистых глееватых легкосуглинистых почвах перспективно возделывать сорт Дикуль. Благодаря своей отзывчивости на азотные удобрения (эффективная доза — 30–60 кг N/га) этот интенсивный сорт позволяет получать чистый доход порядка 6 тыс. руб./га при применении биологизированного карбамида. Сорт гречихи Дикуль – интенсивный для земледелия Центрального Нечерноземного региона, сорт гречихи Даша – экстенсивный.

Направления для дальнейших исследований в области выращивания гречихи в Нечерноземье: изучение штаммов-симбионтов *В.с. Ч-13* для повышения эффективности азотных удобрений, включая влияние разных титров на усвоение карбамида сортами Дикуль и Даша, а

также тестирование комбинаций с другими штаммами (например, фосфатмобилизующими бактериями) для комплексной биоактивации удобрений. Оценка устойчивости сортов Дикуль и Даша к экстремальным погодным условиям (засухи, переувлажнение) при использовании $K_{60}+N_{60m}$ и исследование влияния биомодификации на водопотребление гречихи в условиях Нечерноземья. Анализ долгосрочного воздействия *B.s. Ч-13* на почвенную микробиоту и биоразнообразие, оценка эмиссии парниковых газов (N_2O) при разных схемах внесения удобрений и утилизации соломы, а также изучение возможности использования соломы для производства биоугля (пиролиз) как метода секвестрации углерода. Разработка технологий глубокой переработки соломы (получение целлюлозы для биоэтанола, синтез кормовых добавок с повышенной питательной ценностью) и исследование антиоксидантных свойств гречишной соломы для фармацевтики.

Предложения производству

В условия Нечерноземного региона России при выращивании гречихи сортов Дикуль и Даша на зерно рекомендуется применять карбамид $(NH_2)_2CO$, обработанный культурой *B.s. Ч-13* с предпосевным внесением в почву в дозе 30-60 кг/га в сочетании с калийным удобрением (K_2SO_4) в дозе 60 кг/га. Схема $K_{60}+N_{30m}-N_{60m}$ является оптимальной для дерново-слабоподзолистых глееватых почв Центрального Нечерноземья с повышенной обеспеченностью подвижным фосфором (по Кирсанову). В Центральном Нечернозёмном районе на определённых почвах (дерново-слабоподзолистых глееватых легкосуглинистых) выгодно выращивать сорт Дикуль — доход может достигать 6 тыс. руб./га при внесении азотных удобрений (30–60 кг N/га) и использовании биомодифицированного карбамида.

Список литературы

1. Алешин М. А. Реакция гороха на азотное удобрение и инокуляцию семян риторфином на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности / М. А. Алешин, А. А. Завалин // *Агрохимия*. – 2023. – № 6. – С. 22-38.
2. Алтухов А. И., Полутина Т. Н. Производство продовольственного зерна как основа обеспечения продовольственной безопасности // *Экономика сельского хозяйства России*. – 2014. – №. 6. – С. 26-36.
3. Алтухов А. И., Сычев В. Г., Винничек Л. Б. Развитие производства и рынка минеральных удобрений // *Плодородие*. – 2019. – №. 3 (108). – С. 6-9.
4. Анисимова М. М. и др. Анатомо-морфологическое исследование травы гречихи посевной (*Fagopyrum sagittatum Gilib.*) // *Медицинский альманах*. – 2010. – №. 3. – С. 204-206.
5. Анохина Т. А. и др. Перспективы повышения производства гречихи путем оптимизации минерального питания с учетом морфотипа растений // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2020. – №. 3. – С. 135-138.
6. Ансофф И. Стратегическое управление. Сокр. Пер. с англ. / Науч. рел. и авт. Предисловия Л.И. Евенко. – М.: Экономика, 2011 – 58 с.
7. Бобков С.В., Зотиков В.И., Михайлова И.М., Уварова О.В. Биохимическая характеристика белков семян современных сортов гречихи // *Земледелие*. 2015. №5. С. 42-43.
8. Бутенко Л. И., Лигай Л. В. Исследования химического состава пророщенных семян гречихи, овса, ячменя и пшеницы // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №. 4-5. – С. 1128-1133.
9. Водяницкий, Ю. Н. Деградация нитратов при участии Fe(II) и Fe(0) в почвенно-грунтовых водах (Обзор литературы) / Ю. Н. Водяницкий, В. Г. Минеев // *Почвоведение*. – 2015. – № 2. – С. 156.

10. Волкова А. В. Рынок минеральных удобрений // Высшая школа экономики. Центр развития. – 2017.
11. Воробейков Г. А. и др. Исследование эффективности штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах различных видов растений // Известия Российского государственного педагогического университета им. АИ Герцена. – 2011. – №. 141.
12. Воронин А. А., Протасова Н. А., Беспалова Н. С. Динамика ферментативной активности чернозема обыкновенного в условиях полевого стационарного опыта федерального полигона "Каменная степь" // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2006. – №. 2. – С. 122-127.
13. Вяль Ю. А., Шиленков А. В. Ферментативная активность и агрохимические свойства почв Пензенского ботанического сада // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. ВГ Белинского. – 2008. – №. 14. – С. 26-32.
14. Гаевая Э.А. Урожайность ярового ячменя в зависимости от погодных условий Ростовской области // Известия ОГАУ. 2017. №4 (66). С. 71-75.
15. Галстян А. Ш. Унификация методов исследования активности ферментов почв // Почвоведение. – 1978. – №. 2. – С. 107-114.
16. Гамзаева Р. С. Влияние биопрепаратов и минеральных удобрений на общую биологическую активность почвы и урожайность ярового ячменя // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – №. 42. – С. 86-90.
17. Гордеева И. В. Влияние низких концентраций хлорида натрия на всхожесть семян и развитие проростков гликофитных растений (на примере *Fagopyrum esculentum*). – 2017.
18. Горькова И. В., Павловская Н. Е., Даниленко А. Н. Экстракты гречихи посевной и софоры японской как сырьевые источники биологически активных веществ // Пищевая промышленность. – 2016. – №. 2. – С. 30-32.

19. Горькова, И. В. Биогенетический комплекс флавоноидов гречихи / И. В. Горькова // Биологизация и продовольственная безопасность - векторы развития современного АПК : Материалы Международной научно-практической конференции, Орел, 18 июня 2019 года. – Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2019. – С. 37-42. – EDN SBLJTP.
20. Груздев Г.В., Генералов И.Г. Исторические особенности Российской внешней торговли на мировом зерновом рынке // Вестник НГИЭ. 2017. №8 (75). С. 118-126.
21. Гуляева Т. И., Сидоренко О. В. К вопросу о землепользовании в Орловской области // Вестник аграрной науки. – 2017. – №. 6 (69). – С. 93-100.
22. Дюжева Н. В., Тинькова А. А. Анализ конъюнктуры мирового рынка минеральных удобрений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2020. – №. 1. – С. 91-100.
23. Егоршина А. А. и др. Участие фитогормонов в формировании взаимоотношений проростков пшеницы с эндофитным штаммом *Bacillus subtilis* 11ВМ // Физиология растений. – 2012. – Т. 59. – №. 1. – С. 148-148.
24. Ефремов, Е. Н. Прогноз использования минеральных удобрений на перспективу (2025-2030 г.) / Е. Н. Ефремов // Плодородие почв России: состояние и возможности : Сборник статей (к 100-летию со дня рождения Тамары Никандровны Кулаковской) / Под редакцией В.Г. Сычева. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2019. – С. 22-31. – EDN FRMERQ.
25. Завалин А. А. и др. Современное состояние проблемы азота в мировом земледелии // Агрохимия. – 2015. – №. 5. – С. 83-95.
26. Загоскина Н. В. и др. Накопление фенольных соединений на начальных этапах онтогенеза растений с различным уровнем ploидности (на примере *Fagopyrum esculentum*) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2018. – №. 2. – С. 191-199.

27. Загоскина Н. В. и др. Темновое развитие проростков гречихи и накопление в них фенольных соединений в присутствии ионов кадмия // Организация и регуляция физиолого-биохимических процессов. – 2016. – С. 52-57.
28. Запраметов М.Н. Биофлавоноиды и проницаемость капилляров // М., 1957. С. 23-24.
29. Захаренко В. А. Динамика производства и использования минеральных удобрений в Российской Федерации в контексте показателей мировой экономики // Агрохимия. – 2022. – №. 9. – С. 31-37.
30. Зверев С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки / С.В. Зверев, Н.С. Зверева. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 176 с.
31. Зинченко М. К. и др. Ферментативная активность аграрных почв Верхневолжья // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – №. 3. – С. 143-143.
32. Зотиков В. И., Наумкина Т. С., Сидоренко В. С. Современное состояние и перспективы развития производства гречихи в России // Вестник аграрной науки. – 2010. – Т. 25. – №. 4. – С. 18-22.
33. Зюкин Д.А., Малышева Е.В., Ишков А.О. и др. Урожайность основных сельскохозяйственных культур России в период становления продовольственной независимости // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. №2. С. 205-211.
34. Ибиев Г. З., Савоськина О. А., Чебаненко С. И. Мировой рынок минеральных удобрений и его влияние на зерновую отрасль // Экономика сельского хозяйства России. – 2021. – №. 12. – С. 97-102.
35. Иванов, Р. Г. Активация фотосинтетического аппарата у растений гречихи разных лет селекции под воздействием мочевины, инокулированной *Bacillus subtilis* ч-13 / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, С. Л. Белопухов // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2025. – № 7(409). – С. 944-948.
36. Иванов, Р. Г. Влияние традиционной мочевины и мочевины, модифицированной культурой *Bacillus Subtilis* Ч-13, на формирование

- генеративных органов гречихи (*Fagopyrum Esculentum Moench*) у сортов различных лет селекции / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, С. Л. Белопухов // Вестник Брянской ГСХА. – 2026. – № 1(113). – С. 3-9. – EDN SBDYJL.
37. Иванов, Р. Г. Влияние мочевины, обработанной культурой *V.S. Ч-13*, на накопление рутина в различных сортообразцах гречихи, выращенной в агроклиматических условиях Московской области / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, С. Л. Белопухов // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2025. – № 6(58).
38. Иванов, Р. Г. Влияние биомодифицированных азотных удобрений на урожайность и динамику доступного азота в почве под посевами гречихи / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2025. – № 3(153). – DOI 10.60797/IRJ.2025.153.25. – EDN EHJSNF.
39. Иванов, Р. Г. Влияние биомодифицированных азотных удобрений на урожай и вынос питательных элементов гречихи разных лет селекции / Р.Г. Иванов, А.Н. Налиухин, С.Л. Белопухов и др. // *Агрехимический вестник*. – 2024. - № 6. – С. 14-21.
40. Иванов, Р.Г. Динамика урожайности гречихи в Российской Федерации: статистический анализ / Р.Г. Иванов, А.Н. Налиухин // *Приоритетные векторы развития промышленности и сельского хозяйства: материалы VII Международной научно-практической конференции, 18 апреля 2024 г. Макеевка: в 7 т. / ФГБОУ ВО «Донбасская аграрная академия». – Макеевка: ДОНАГРА, 2024. – Т.III. – С. 76-83.*
41. Иванов, Р. Г. Перспективы производства функциональных продуктов питания из гречихи на территории Российской Федерации / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, А. В. Сергеев // *Экология и природопользование: тенденции, модели, прогнозы, прикладные аспекты: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Рязань, 27 марта 2024 года. – Рязань: РГАТУ, 2024. – С. 52-56.*

42. Иванов, Р. Г. Гречиха: перспективы возделывания культуры в центральном нечерноземном регионе России / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, Д. Д. Кузнецова // Инновационное развитие агропромышленного комплекса: новые подходы и актуальные исследования : Материалы Международной научно-практической конференции в рамках мероприятий «Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации», 300-летия Российской академии наук, Краснодар, 24–25 апреля 2024 года. – Краснодар: ИП Копыльцова П.И, 2024. – С. 102-110.
43. Иванов Р.Г. Продуктивность растений гречихи при применении биомодифицированных азотных удобрений / Р.Г. Иванов // «Современные методы агрохимических и агроэкологических исследований, их применение в сельскохозяйственном производстве». Материалы 58-ой Всероссийской конференции с международным участием молодых ученых, специалистов-агрохимиков и агроэкологов / Под редакцией С.И. Шкуркина. - М.: ВНИИ агрохимии, 2024. – С. 53-57.
44. Иванов, Р. Г. Проблема урожайности гречихи на территории Российской Федерации: статистический взгляд / Р. Г. Иванов, А. Н. Налиухин, Д. Д. Кузнецова // Научное обеспечение инновационного развития сельского хозяйства : к 110-летию со дня рождения первого директора Дагестанского НИИСХ Кисриева Фрида Гасанович : Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Махачкала, 25–26 апреля 2024 года. – Махачкала: ООО "Издательство АЛЕФ", 2024. – С. 206-211. – DOI 10.25691/9093.2024.99.76.061.
45. Иванов, Р. Г. Динамика обменной кислотности почвы при применении биомодифицированных азотных удобрений культурой В.с. Ч-13 в посевах гречихи / Р. Г. Иванов // Актуальные проблемы и перспективы развития современного земледелия : Сборник научных трудов по материалам Национальной научно-практической конференции с международным участием, Ярославль, 03 апреля 2025 года. – Ярославль: Ярославский государственный аграрный университет, 2025. – С. 85-89.

- 46.Иванов, Р. Г. Влияние азотных удобрений и штамма V.S. Ч-13 на морфобиологические особенности растений гречихи / Р. Г. Иванов // Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий : Сборник IX Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 20 декабря 2024 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2024. – С. 68-73.
- 47.Иванов Р.Г., Налиухин А.Н. Динамика гидролитической кислотности почвы в посевах гречихи при разном уровне азотного питания //Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы XV Международной научно-практической конференции, 26 июня 2025 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации [и др.]; редкол.: Богданов И.И. [и др.] – Ульяновск: ГАУ, 2025. - – ISBN 978-5-6053388-7-1, 2025. - С. 52 – 57.
- 48.Измайлов С. Ф., Никитин А. В., Родионов В. А. Нитратный сигналинг в растениях. Введение в проблему //Физиология растений. – 2018. – Т. 65. – №. 4. – С. 256-269.
- 49.Илюшко М. В., Литвиненко В. Н. Применение препарата Экстрасол при выращивании риса в условиях Приморского края //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2013. – №. 7. – С. 78-82.
- 50.Казанцева В. В. и др. Особенности образования фенольных соединений в проростках гречихи (*Fagopyrum esculentum* Moench) различных сортов //Сельскохозяйственная биология. – 2015. – №. 5. – С. 611-619.
- 51.Казанцева В. В., Загоскина Н. В. Гречиха (*Fagopyrum esculentum*)-важный продуцент биофлавоноидов //Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. – 2018. – №. 13. – С. 54-57.
- 52.Карманова Е. Е., Соломатина А. С. Рутин как радиозащитное и генопротекторное средство //Техногенные системы и экологический риск: Тезисы докладов I Международной (XIV Региональной) научной конференции/Под общ. ред. АА Удаловой.–Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2017.–332 с. – 2017. – С. 197.

53. Карпенко Г.Г., Антонцев А.А. Основные тенденции развития производства и рынка зерновых культур в России и мировом пространстве // Государственное управление. Электронных вестник. 2018. №69. С. 56-79.
54. Кожемяков А. П. и др. Оценка взаимодействия сортов ячменя и пшеницы с ризосферными ростстимулирующими бактериями на различном азотном фоне // Агрохимия. – 2004. – №. 3. – С. 33-40.
55. Корнель А. Н., Емельянова В. Н. К вопросу о необходимости изучения сортовой реакции гречихи на удобрения. – 2011.
56. Коротков А. В. и др. Влияние регуляторов роста Люрастима и Моддуса на содержание рутина в семенах гречихи // Агрохимия. – 2010. – №. 12. – С. 18-23.
57. Крикова А.В. Биологическая активность растительных источников флавоноидов / А.В. Крикова, Р.С. Давыдов, Ю.Н. Мокин и др. // Фармация. 2006. Т. 54. №3. С. 17-18.
58. Кузьмина Л. Ю., Архипова Т. Н. Колонизация ризосферы пшеницы штаммами *Bacillus subtilis* с различным уровнем продукции цитокининов // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19. – №. 3. – С. 848-852.
59. Кумейко Ю. В., Паращенко В. Н., Кремзин Н. М. Применение ингибитора нитрификации для снижения потерь азота и повышения эффективности азотного удобрения в рисоводстве // Сельскохозяйственный журнал. – 2013. – Т. 3. – №. 6. – С. 144-147.
60. Курамшина З. М., Хайруллин Р. М., Сатарова Л. З. Влияние эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* на микоризацию корней злаков при имитации почвенной засухи // Агрохимия. – 2015. – №. 5. – С. 69-73.
61. Курсакова В. С., Хижникова Т. Г., Новикова Л. А. Влияние азотфиксирующих бактерий и минеральных удобрений на фотосинтетическую деятельность и продуктивность яровой пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – №. 2 (112). – С. 023-028.

62. Лапа В. В. и др. Эффективность бактериальных удобрений азобактерин и калиплант при возделывании зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах //Агрохимия. – 2020. – №. 2. – С. 28-36.
63. Левкевич Р. Е., Сенотрусова С. В. Производство минеральных удобрений в России: тенденции развития отрасли //Инновации и инвестиции. – 2023. – №. 8. – С. 361-365.
64. Левкевич Р. Е., Сенотрусова С. В., Христианов К. Н. Ретроспективный анализ производства минеральных удобрений в советский период //Инновации и инвестиции. – 2023. – №. 4. – С. 397-401.
65. Магда Е. В., Мазиров М. А., Зинченко М. К. Активность каталазы и инвертазы при различной интенсивности механической обработки почвы //Владимирский земледелец. – 2022. – №. 2 (100). – С. 24-30.
66. Мажара В. М., Денисенко В. В., Кувшинова Е. К. Урожайность озимой пшеницы при комплексном применении биопрепарата Экстрасол и минеральных удобрений //Вестник аграрной науки Дона. – 2014. – Т. 3. – №. 27. – С. 45-51.
67. Минеев, В. Г. Плодородие и биологическая активность дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений и их последствии / В. Г. Минеев, Н. Ф. Гомонова, М. Ф. Овчинникова // Агрохимия. – 2004. – № 7. – С. 5-10. – EDN ONQDRV.
68. Михайловская Н. А. и др. Эффективность трехкомпонентной микробной композиции в посевах озимых зерновых культур на эродированных дерново-подзолистых суглинистых почвах //Агрохимия. – 2021. – №. 9. – С. 30-38.
69. Мягчилов А. В., Соколова Л. И. Выделение флавоноидов из шелухи гречихи посевной *Fagopyrum sagittatum* Gilib.(Polygonaceae) //Химия растительного сырья. – 2011. – №. 2. – С. 123-126.
70. Налиухин А. Н. и др. Последствие биомодифицированных органо-минеральных удобрений на урожайность и качество овса на разных фонах

- кислотности дерново-подзолистой почвы //Молочнохозяйственный вестник. – 2023. – №. 1 (49). – С. 63-80.
- 71.Налиухин А. Н. Влияние биомодифицированных органоминеральных удобрений на урожайность и качество зерна ячменя / А. Н. Налиухин, О. А. Власова, А. В. Ерегин // Плодородие. – 2022. – № 6(129). – С. 104-108. – DOI 10.25680/S19948603.2022.129.27. – EDN GYVAUC.
- 72.Наполова Г. В., Наполов В. В. Отношение растений видов и сортов гречихи к основным абиотическим факторам //Вестник аграрной науки. – 2007. – Т. 6. – №. 3. – С. 32-36.
- 73.Нарушева Е. А. Изменение биологической активности чернозема выщелоченного при возделывании гречихи в среднем Поволжье //Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 88. – №. 2. – С. 12-16.
74. Насибуллин Р. С. и др. О молекулярном механизме биоактивности рутина //Химическая физика и мезоскопия. – 2008. – Т. 10. – №. 2. – С. 228-231.
- 75.Наумкин В. П., Лысенко Н. Н. Энтомоценоз гречихи посевной в условиях Орловской области //Земледелие. – 2014. – №. 6. – С. 41-44.
- 76.Нефедьева Е. Э., Лысак В. И., Белопухов С. Л. Давление как внешний и внутренний фактор, влияющий на растения (обзор) //Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2014. – №. 6 (11). – С. 38-53.
- 77.Новиков, Н. Н. Формирование урожая и биохимических показателей качества зерна овса в зависимости от уровня азотного питания / Н. Н. Новиков, А. Н. Налиухин, А. А. Соколов // Плодородие. – 2023. – № 5(134). – С. 28-32. – DOI 10.25680/S19948603.2023.134.07. – EDN BYIFJR.
- 78.Павловская Н. Е. и др. Экономические расчеты получения рутина из гречихи //Биотехнология: состояние и перспективы развития. – 2015. – С. 325-326.
- 79.Павловская Н.Е., Лазарева Т.Н., Горькова И.В. Влияние сроков хранения на содержание запасных белков в семенах гречихи // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. - №3. – С. 12 – 15.

- 80.Панков Д. М. Интенсивность накопления химических элементов гречихой в зависимости от пчелоопыления //Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – №. 4. – С. 85-89.
- 81.Пармакли Д.М. Урожайность сельскохозяйственных культур: алгоритм оценки и градации // МСХ. 2019. №5. С. 8-11.
- 82.Перминова Е. М. и др. Каталазная активность подзолистых почв и ее изменение при естественном лесовосстановлении на вырубках среднетаежных еловых лесов //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – №. 1-1. – С. 27-33.
- 83.Пилецкая О. А., Прокопчук В. Ф. Фосфатный режим и фосфатазная активность черноземовидной почвы //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – №. 8. – С. 47-50.
- 84.Поспелова И. Н. Мониторинг мирового рынка гречихи //Роль аграрной науки в устойчивом развитии сельских территорий. – 2021. – С. 1035-1038.
- 85.Поспелова И. Н. Статистическое исследование мирового рынка гречихи //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – №. 5-2. – С. 255-258.
- 86.Пронько В. В. Урожайность гречихи и биологическая активность чернозема выщелоченного Среднего Поволжья при применении минеральных удобрений и препаратов ассоциативных diaзотрофов / В. В. Пронько, Е. А. Нарушева, Е. С. Юрченко // Агрохимия. – 2009. – № 12. – С. 18-26.
- 87.Пронько, В. В. Эффективность биопрепаратов при возделывании гречихи в Саратовском Правобережье / В. В. Пронько, Е. А. Нарушева, Е. С. Юрченко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2006. – № 5. – С. 30-31.
- 88.Прудникова Е.Г., Прудников П.С. Использование биологически активных веществ в АПК // Рациональное использование сырья и создание новых продуктов биотехнологического назначения: материалы Международной

- научно-практической конференции по актуальным проблемам в области биотехнологии. 2018. С. 119-122.
89. Прусакова, Л. Д. Циркон и карвитол - биорегуляторы, влияющие на химический состав и качество зерна гречихи / Л. Д. Прусакова, О. С. Мишина, С. Л. Белопухов // *Агрохимия*. – 2013. – № 5. – С. 45-50.
90. Пуртова Л. Н. и др. Изменение содержания гумуса и биологической активности агротемногумусовых подбелов при различных агротехнических приемах обработки почв // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2022. – №. 3 (215). – С. 139-150.
91. Ригер А. Н., Пицыков И. С. Эффективность экстразола на посевах кукурузы // *Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии*. – 2014. – Т. 3. – №. 3. – С. 200-204.
92. Романова О. И. и др. Внутривидовая изменчивость по фотопериодической чувствительности как фактор расширения ареала *Fagopyrum esculentum* Moench // *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2019. – №. 4 (32). – С. 13-19.
93. Рыжкова С. М., Кручинина В. М. Государственное регулирование рынка удобрений в России // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2021. – Т. 83. – №. 1 (87). – С. 410-420.
94. Сатлыгулыева Г. Причины засоления почвы и меры по сдерживанию процесса // *Вестник науки*. – 2023. – Т. 1. – №. 4 (61). – С. 337-340.
95. Семькин В. А. и др. Приемы возделывания гречихи на темно-серых лесных почвах Центрального Черноземья // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2008. – Т. 5. – №. 5. – С. 52-58.
96. Ситало Г. М. и др. Влияние биопрепаратов и регуляторов роста на продуктивность гороха сорта Ангела // *Вестник аграрной науки Дона*. – 2015. – Т. 4. – №. 32. – С. 45-52.

97. Скурихин И.М. Таблицы химического состава и калорийность российских продуктов питания / И.М. Скурихин, В.А. Тутельян. – М.: ДеЛи, 2008, - 276 с.
98. Смирнова Ю. В., Курамшина З. М., Гомоненко О. В. Влияние эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* на содержание фотосинтетических пигментов в растениях пшеницы при воздействии никеля // *Universum: химия и биология*. – 2018. – №. 12 (54). – С. 26-28.
99. Солохина, И. Ю. Биологическая активность фракционного состава биофлавоноидов гречихи / И. Ю. Солохина // Современное состояние, перспективы развития АПК и производства специализированных продуктов питания : Материалы Международной научно-практической конференции посвящённой юбилею Заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, доктора технических наук, профессора Гавриловой Натальи Борисовны, Омск, 24 апреля 2020 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 167-170.
100. Стекольников К. Е., Комова А. В. Фосфатазная активность чернозёма выщелоченного и режим фосфатов в стационарном опыте // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. – 2017. – №. 3 (65). – С. 183-188.
101. Суша О. А. Особенности накопления фенольных соединений в гречихе диплоидной под влиянием низкоинтенсивного электромагнитного излучения // *Природа, человек и экология*. – 2016. – С. 109-109.
102. Сырмолот О. В. Экстрасол и продуктивность сои в Приморском крае // *Земледелие*. – 2013. – №. 3. – С. 39-40.
103. Сычев В. Г., Милащенко Н. З., Шафран С. А. Агрехимические аспекты получения высококачественного зерна в России // *Плодородие*. – 2018. – №. 1 (100). – С. 18-19.
104. Сычев В. Г., Шафран С. А., Виноградова С. Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрехимия*. – 2020. – №. 6. – С. 3-13.

105. Тимошенко Э.В. Продуктивность гречихи при разных сроках посева в условиях Южной зоны Амурской области // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. №2. С. 13-17.
106. Титова В. И., Судакова Т. Е. Влияние азота и микробиопрепарата Экстрасол на продуктивность люпина узколистного //Плодородие. – 2021. – №. 5 (122). – С. 76-80.
107. Фесенко А. Н., Фесенко И. Н. Результаты селекции, динамика производства и рынок зерна гречихи (анализ многолетних данных) //Земледелие. – 2017. – №. 3. – С. 24-26.
108. Фесенко Н.В. Селекция и семеноводство гречихи. М.: Колос, 1983. 191 с.
109. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. – Наука, 1990.
110. Хамова О. Ф., Шулико Н. Н., Тукмачева Е. В. Эффективность применения биопрепаратов ассоциативной азотфиксации в ресурсосберегающих технологиях //Агрохимия. – 2022. – №. 9. – С. 47-52.
111. Цыпурская Е. В. и др. Рост проростков гречихи обыкновенной (*Fagopyrum esculentum moench*) и накопление первичных и вторичных метаболитов при различных условиях минерального питания //Сельскохозяйственная биология. – 2019. – Т. 54. – №. 5. – С. 946-957.
112. Чеботарь В. К., Завалин А. А., Ариткин А. Г. Применение биомодифицированных минеральных удобрений.- М.: ВНИИА;Ульяновск: УлГУ – 2014. - 142 с.
113. Чевердин А. Ю., Чевердин Ю. И., Турусов В. И. Влияние биопрепаратов на основе ассоциативных бактерий на микробиологическую активность чернозема сегрегационного //Агрохимия. – 2019. – №. 12. – С. 22-31.
114. Чистяков Ю.Ф. Долговременные тенденции развития зернового экспорта России // АВУ. 2014. №12 (130). С. 102-108.
115. Шафран С. А. и др. Влияние агрохимических свойств почв на окупаемость азотных удобрений //Агрохимия. – 2010. – №. 8. – С. 15-23.

116. Шафран С. А. и др. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование //Агрохимия. – 2021. – №. 5. – С. 14-20.
117. Шафронов О. Д., Темников В. Н. Динамика изменения содержания подвижных фосфатов в дерново-подзолистых почвах //Агрохимический вестник. – 2008. – №. 6. – С. 21-23.
118. Шулико Н. Н. и др. Влияние комплексного применения удобрений и биопрепаратов на эффективное плодородие чернозема выщелоченного и продуктивность ячменя //Агрохимия. – 2019. – №. 2. – С. 13-20.
119. Щур А. В., Виноградов Д. В., Валько В. П. Влияние различных уровней агроэкологических нагрузок на биохимические характеристики почвы //Юг России: экология, развитие. – 2016. – №. 4. – С. 139-148.
120. Юдин А. С., Никифоров М. И. Влияние различных норм минеральных удобрений на урожайность и качество зерна гречихи //Биологизация земледелия в Нечерноземной зоне России. – 2010. – С. 91-96.
121. Юдин А.С., Никифоров М.И. Влияние различных норм минеральных удобрений на урожайность и качество зерна гречихи // Биологизация земледелия в Нечерноземной зоне России: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию Брянской ГСХА и 70-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, доктора с.-х.н., профессора В.Ф. Мальцева. 2010. С. 91-96.
122. Яковец Ю.В. Социальная динамика в период становления постиндустриального общества. – М.: Наука, 1998. – 85 с.
123. A.V. Amelin, A. N. Fesenko, V. V. Zaikin [et al.]. The water use efficiency by plants in different breeding periods buckwheat varieties IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Vol. 677. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 42053. – DOI 10.1088/1755-1315/677/4/042053. – EDN NVFEAP.

124. Adeyemo T. et al. Salinity and sodicity can cause hysteresis in soil hydraulic conductivity //Geoderma. – 2022. – T. 413. – C. 115765.
125. Ahad B., Reshi Z. A. Climate change and plants //Crop production and global environmental issues. – 2015. – C. 553-574.
126. Ahmed A. et al. Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: a review //The Journal of Agricultural Science. – 2014. – T. 152. – №. 3. – C. 349-369.
127. Aksu G., Altay H. The effects of potassium applications on drought stress in sugar beet: part ii. Plant nutrition content //Journal of Scientific Perspectives. – 2020. – T. 4. – №. 3. – C. 203-216.
128. Allard-Massicotte R. et al. Bacillus subtilis early colonization of Arabidopsis thaliana roots involves multiple chemotaxis receptors //MBio. – 2016. – T. 7. – №. 6. – C. 10.1128/mbio. 01664-16.
129. Allwood J. W. et al. Assessing the impact of nitrogen supplementation in oats across multiple growth locations and years with targeted phenotyping and high-resolution metabolite profiling approaches //Food chemistry. – 2021. – T. 355. – C. 129585.
130. Aloo B. N. et al. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future //Frontiers in Plant Science. – 2022. – T. 13. – C. 1002448.
131. Altieri M. A., Nicholls C. I. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems //Soil and Tillage Research. – 2003. – T. 72. – №. 2. – C. 203-211.
132. Alwan A. Effect of sodium chloride on response of two wheat cultivars (Triticum aestivum L.) at germination and early seedling stages / A. Alwan, Kh. Hussein, Kh. Jaddoa // International journal of Applied Agricultural Sciences. – 2015. – Vol. 1(3). – P.60–65.
133. Alzahrani H. A. et al. Evaluation of the antioxidant activity of three varieties of honey from different botanical and geographical origins //Global journal of health science. – 2012. – T. 4. – №. 6. – C. 191.

134. Amador J. A. et al. Spatial distribution of soil phosphatase activity within a riparian forest // *Soil Science*. – 1997. – Т. 162. – №. 11. – С. 808-825.
135. Amann C., Amberger A. Phosphorus efficiency of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) // *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. – 1989. – Т. 152. – №. 2. – С. 181-189.
136. Amelin A. V. et al. Plant leaves structural and functional parameters in different breeding periods buckwheat varieties // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2022. – Т. 981. – №. 4. – С. 042066.
137. Arora N. K. (ed.). *Plant microbe symbiosis: fundamentals and advances*. – Springer India, 2013. – С. 411-449.
138. Arrington L. B., Shive J. W. Rates of absorption of ammonium and nitrate nitrogen from culture solutions by ten-day-old tomato seedlings at two pH levels // *Soil Science*. – 1935. – Т. 39. – №. 6. – С. 431-436.
139. Assaha D. V. M. et al. The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes // *Frontiers in physiology*. – 2017. – Т. 8. – С. 509.
140. Asseng S. et al. Повышение температуры снижает мировое производство пшеницы // *Природа изменения климата*. – 2015. – Т. 5. – No 2. – С. 143-147.
141. Atrouse O. M., Oran S. A., Al-Abbadi S. Y. Chemical analysis and identification of pollen grains from different Jordanian honey samples // *International journal of food science & technology*. – 2004. – Т. 39. – №. 4. – С. 413-417.
142. Aubert L. et al. Сравнение устойчивости к высоким температурам у двух видов гречихи *Fagopyrum esculentum* и *Fagopyrum tataricum* // *Journal of Plant Physiology*. – 2020. – Т. 251. – С. 153222.
143. Badreldin N., Lobb D. A. The costs of soil erosion to crop production in Canada between 1971 and 2015 // *Sustainability*. – 2023. – Т. 15. – №. 5. – С. 4489.

144. Bai L. et al. Fungal communities are more sensitive to nitrogen fertilization than bacteria in different spatial structures of silage maize under short-term nitrogen fertilization // *Applied Soil Ecology*. – 2022. – Т. 170. – С. 104275.
145. Bashir M. T. et al. Impact of excessive nitrogen fertilizers on the environment and associated mitigation strategies // *Asian J. Microbiol. Biotechnol. Environ. Sci.* – 2013. – Т. 15. – №. 2. – С. 213-221.
146. Basso B., Liu L. Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies // *advances in agronomy*. – 2019. – Т. 154. – С. 201-255.
147. Basu S., Rabara R., Negi S. Towards a better greener future-an alternative strategy using biofertilizers. I: Plant growth promoting bacteria // *Plant Gene*. – 2017. – Т. 12. – С. 43-49.
148. Bayramoglu B., Chakir R. The impact of high crop prices on the use of agrochemical inputs in France: A structural econometric analysis // *Land Use Policy*. – 2016. – Т. 55. – С. 204-211.
149. Beauregard P. B. et al. Индукция биопленки *Bacillus subtilis* растительными полисахаридами // *Труды Национальной академии наук*. – 2013. – Т. 110. – № 17. – С. E1621-E1630.
150. Bernier G. et al. Physiological signals that induce flowering // *The Plant Cell*. – 1993. – Т. 5. – №. 10. – С. 1147.
151. Bogdanov S. et al. Honey for nutrition and health: a review // *Journal of the American college of Nutrition*. – 2008. – Т. 27. – №. 6. – С. 677-689.
152. Bouraoui F., Malagó A. Trend analysis of nitrate concentration in rivers in southern france // *Water*. – 2020. – Т. 12. – №. 12. – С. 3374.
153. Bouwman L. et al. Drawing down N₂O to protect climate and the ozone layer. A UNEP Synthesis Report. – United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
154. Bradshaw B., Dolan H., Smit B. Farm-level adaptation to climatic variability and change: crop diversification in the Canadian prairies // *Climatic change*. – 2004. – Т. 67. – №. 1. – С. 119-141.

155. Brunori A., Vegvari G., Kadyrov R. Rutin content of the grain of seven buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) varieties from Belarus grown in Central and Southern Italy //Proc. 10th Intl. Symp. Buckwheat at Yangling. – 2007. – C. 414-416.
156. Burgess, A. J., Masclaux-Daubresse, C., Strittmatter, G., Weber, A. P. M., Taylor, S. H., Harbinson, J., Yin, X., Long, S., Paul, M. J., Westhoff, P., Loreto, F., Ceriotti, A., Saltenis, V. L. R., Pribil, M., Nacry, P., Scharff, L. B., Jensen, P. E., Muller, B., Cohan, J.-P. ... Baekelandt, A. (2023). Improving crop yield potential: Underlying biological processes and future prospects. *Food and Energy Security*, 12, e435. <https://doi.org/10.1002/fes3.435>
157. Caldwell B. A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review //Pedobiologia. – 2005. – T. 49. – №. 6. – C. 637-644.
158. Campbell C. G. Buckwheat: *Fagopyrum esculentum* Moench. – Bioersivity International, 1997. – T. 19.
159. Campbell J. W. et al. Insect visitors to flowering buckwheat, *Fagopyrum esculentum* (Polygonales: Polygonaceae), in north-central Florida //Florida Entomologist. – 2016. – T. 99. – №. 2. – C. 264-268.
160. Castellano-Hinojosa A. et al. Changes in the diversity and predicted functional composition of the bulk and rhizosphere soil bacterial microbiomes of tomato and common bean after inorganic N-fertilization //Rhizosphere. – 2021. – T. 18. – C. 100362.
161. Cawoy V., Kinet J. M., Jacquemart A. L. Morphology of nectaries and biology of nectar production in the distylous species *Fagopyrum esculentum* //Annals of botany. – 2008. – T. 102. – №. 5. – C. 675-684.
162. Chen W. et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment //Plant and soil. – 2010. – T. 326. – C. 61-73.
163. Chen Y. et al. A *Bacillus subtilis* sensor kinase involved in triggering biofilm formation on the roots of tomato plants //Molecular microbiology. – 2012. – T. 85. – №. 3. – C. 418-430.

164. Cheng Z. Q., Meng J. H. Research advances and perspectives on crop yield estimation models //Chinese Journal of Eco-Agriculture. – 2015. – T. 23. – №. 4. – C. 402-415.
165. Cheng, Ni, Yuan Wang, and Wei Cao. "The protective effect of whole honey and phenolic extract on oxidative DNA damage in mice lymphocytes using comet assay." *Plant Foods for Human Nutrition* 72 (2017): 388-395.
166. Cherubin M. R. et al. Precision agriculture in Brazil: the trajectory of 25 years of scientific research //Agriculture. – 2022. – T. 12. – №. 11. – C. 1882.
167. Choi J.Y., et al. Morpho-physiological response of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) to flooding stress at different growth stages // *Journal of Crop Science and Biotechnology*. - 2021 - T. 24 - C. 41-49.
168. Choubey S. et al. Medicinal importance of gallic acid and its ester derivatives: a patent review //Pharmaceutical patent analyst. – 2015. – T. 4. – №. 4. – C. 305-315.
169. Chrungoo N. K., Dohtdong L., Chetry U. Phenotypic plasticity in buckwheat //Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat. – Academic Press, 2016. – C. 137-149.
170. Contesini F. J., Melo R. R., Sato H. H. An overview of Bacillus proteases: from production to application //Critical reviews in biotechnology. – 2018. – T. 38. – №. 3. – C. 321-334.
171. Cordeiro G. D., Dötterl S. Floral scents in bee-pollinated buckwheat and oilseed rape under a global warming scenario //Insects. – 2023. – T. 14. – №. 3. – C. 242.
172. Crawford N. M., Forde B. G. Molecular and developmental biology of inorganic nitrogen nutrition //The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists. – 2002. – T. 1.
173. Das S. K., Varma A. Role of enzymes in maintaining soil health //Soil enzymology. – 2011. – C. 25-42.

174. de Mello K. et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil //Journal of Environmental Management. – 2020. – T. 270. – C. 110879.
175. Deng S. P., Tabatabai M. A. Cellulase activity of soils //Soil Biology and Biochemistry. – 1994. – T. 26. – №. 10. – C. 1347-1354.
176. Driedonks N., Rieu I., Vriezen W. H. Breeding for plant heat tolerance at vegetative and reproductive stages //Plant reproduction. – 2016. – T. 29. – C. 67-79.
177. Duan Y. et al. Effects of long-term potassium application on yield and quality of tobacco and soil physical and chemical properties //Guizhou Agric. Sci. – 2015. – T. 43. – C. 100-104.
178. El Khattabi J. et al. Impact of fertilizer application and agricultural crops on the quality of groundwater in the alluvial aquifer, Northern France //Water, Air, & Soil Pollution. – 2018. – T. 229. – C. 1-15.
179. Fageria N. K. Yield and yield components and phosphorus use efficiency of lowland rice genotypes //Journal of plant nutrition. – 2014. – T. 37. – №. 7. – C. 979-989.
180. Fang X. et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) //Field Crops Research. – 2018. – T. 219. – C. 160-168.
181. Fijen T. P. M., van Bodegraven V., Lucassen F. Limited honeybee hive placement balances the trade-off between biodiversity conservation and crop yield of buckwheat cultivation //Basic and Applied Ecology. – 2022. – T. 65. – C. 28-38.
182. Flemming H. C., Wingender J. The biofilm matrix //Nature reviews microbiology. – 2010. – T. 8. – №. 9. – C. 623-633.
183. Forde B. G., Clarkson D. T. Nitrate and ammonium nutrition of plants: physiological and molecular perspectives //Advances in botanical research. – Academic Press, 1999. – T. 30. – C. 1-90.

184. Frink C. R., Waggoner P. E., Ausubel J. H. Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1999. – T. 96. – №. 4. – C. 1175-1180.
185. Gadd G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation //Mycological research. – 2007. – T. 111. – №. 1. – C. 3-49.
186. Garibaldi L. A. et al. From research to action: enhancing crop yield through wild pollinators //Frontiers in Ecology and the Environment. – 2014. – T. 12. – №. 8. – C. 439-447.
187. Gavric, T.; Cadro, S.; Gadzo, D.; Djikic, M.; Bezdob, M.; Jovovic, Z.; Jurkovic, J.; Hamidovic, S. Influence of Meteorological Parameters on the Yield and Chemical Composition of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Agric. Cult. For.* 2018, 64.
188. Gavrilesco M. Water, soil, and plants interactions in a threatened environment //Water. – 2021. – T. 13. – №. 19. – C. 2746.
189. Geisseler D., Horwath W. R. Regulation of extracellular protease activity in soil in response to different sources and concentrations of nitrogen and carbon //Soil Biology and Biochemistry. – 2008. – T. 40. – №. 12. – C. 3040-3048.
190. Germ M., Gaberščik A. The effect of environmental factors on buckwheat //Molecular breeding and nutritional aspects of buckwheat. – Academic Press, 2016. – C. 273-281.
191. Ghanbari-Movahed M. et al. Quercetin-and rutin-based nano-formulations for cancer treatment: A systematic review of improved efficacy and molecular mechanisms //Phytomedicine. – 2022. – T. 97. – C. 153909.
192. Ghorbani A. Mechanisms of antidiabetic effects of flavonoid rutin //Biomedicine & Pharmacotherapy. – 2017. – T. 96. – C. 305-312.
193. Gilhar O. et al. Multigenerational inheritance drives symbiotic interactions of the bacterium *Bacillus subtilis* with its plant host //Microbiological Research. – 2024. – C. 127814.

194. Gimenez-Bastida J. A., Zielinski H. Buckwheat as a functional food and its effects on health //Journal of agricultural and food chemistry. – 2015. – T. 63. – №. 36. – C. 7896-7913.
195. Glass A. D. M. Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption //Critical reviews in plant sciences. – 2003. – T. 22. – №. 5. – C. 453-470.
196. Gong S. et al. Response of soil enzyme activity to warming and nitrogen addition in a meadow steppe //Soil Research. – 2015. – T. 53. – №. 3. – C. 242-252.
197. Goodman R. et al. Honeybee pollination of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) cv. Manor //Australian Journal of Experimental Agriculture. – 2001. – T. 41. – №. 8. – C. 1217-1221.
198. Gośliński M., Nowak D., Szwengiel A. Multidimensional comparative analysis of bioactive phenolic compounds of honeys of various origin //Antioxidants. – 2021. – T. 10. – №. 4. – C. 530.
199. Grace S. C., Logan B. A., Adams W. W. Seasonal differences in foliar content of chlorogenic acid, a phenylpropanoid antioxidant, in *Mahonia repens* //Plant, Cell & Environment. – 1998. – T. 21. – №. 5. – C. 513-521.
200. Grant C. A. et al. The importance of early season phosphorus nutrition //Canadian journal of plant science. – 2001. – T. 81. – №. 2. – C. 211-224.
201. Greenfield L. M. et al. Do plants use root-derived proteases to promote the uptake of soil organic nitrogen? //Plant and soil. – 2020. – T. 456. – C. 355-367.
202. Guo, X.; Zhu, K.; Zhang, H.; Yao, H. Anti-tumor activity of a novel protein obtained from tatar buckwheat. *Int. J. Mol. Sci.* 2010, 11, 5201–5211.
203. Gupta J. J., Yadavi B. P. S., Hore D. K. Production potential of buckwheat grain and its feeding value for poultry in Northeast India //Fagopyrum. – 2002. – T. 19. – C. 101-104.
204. Hakim S. et al. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability //Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2021. – T. 5. – C. 617157.

205. Hasanuzzaman M. et al. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants //International journal of molecular sciences. – 2013. – T. 14. – №. 5. – C. 9643-9684.
206. Hasanuzzaman M. et al. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses //Agronomy. – 2018. – T. 8. – №. 3. – C. 31.
207. Hashem A., Tabassum B., Abd Allah E. F. Bacillus subtilis: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress //Saudi journal of biological sciences. – 2019. – T. 26. – №. 6. – C. 1291-1297.
208. Hashimi R., Hashimi M. H. Effect of losing nitrogen fertilizers on living organism and ecosystem, and prevention approaches of their harmful effect //Asian Soil Research Journal. – 2020. – T. 4. – №. 2. – C. 10-20.
209. Hawkesford M. J. et al. Functions of macronutrients //Marschner's mineral nutrition of plants. – Academic press, 2023. – C. 201-281.
210. Hazell P., Wood S. Drivers of change in global agriculture //Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2008. – T. 363. – №. 1491. – C. 495-515.
211. Henna, T.K.; Raphey, V.R.; Sankar, R.; Ameena Shirin, V.K.; Gangadharappa, H.V.; Pramod, K. Carbon nanostructures: The drug and the delivery system for brain disorders. Int. J. Pharm. 2020, 587.
212. Henneron L. et al. Rhizosphere control of soil nitrogen cycling: a key component of plant economic strategies //New Phytologist. – 2020. – T. 228. – №. 4. – C. 1269-1282.
213. Herbien S. A., Neal J. L. Soil pH and phosphatase activity //Communications in soil science and plant analysis. – 1990. – T. 21. – №. 5-6. – C. 439-456.
214. Holasova M. et al. Buckwheat—the source of antioxidant activity in functional foods //Food research international. – 2002. – T. 35. – №. 2-3. – C. 207-211.

215. Hu M. et al. Transgenic expression of plastidic glutamine synthetase increases nitrogen uptake and yield in wheat //Plant biotechnology journal. – 2018. – T. 16. – №. 11. – C. 1858-1867.
216. Huda M. N. et al. Treasure from garden: Bioactive compounds of buckwheat //Food chemistry. – 2021. – T. 335. – C. 127653.
217. Ihsan M. Z. et al. Wheat phenological development and growth studies as affected by drought and late season high temperature stress under arid environment //Frontiers in Plant Science. – 2016. – T. 7. – C. 795.
218. Iqbal Z. et al. Allelopathic activity of buckwheat: isolation and characterization of phenolics //Weed science. – 2003. – T. 51. – №. 5. – C. 657-662.
219. Iriti M. et al. Rutin, a quercetin glycoside, restores chemosensitivity in human breast cancer cells //Phytotherapy Research. – 2017. – T. 31. – №. 10. – C. 1529-1538.
220. Itelima J. U. et al. Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A review. – 2018.
221. J Deka S. et al. Evidence of PKC binding and translocation to explain the anticancer mechanism of chlorogenic acid in breast cancer cells //Current Molecular Medicine. – 2017. – T. 17. – №. 1. – C. 79-89.
222. Jagadish S. V. K. Heat stress during flowering in cereals—effects and adaptation strategies //New Phytologist. – 2020. – T. 226. – №. 6. – C. 1567-1572.
223. Jan M. T. et al. Protein breakdown represents a major bottleneck in nitrogen cycling in grassland soils //Soil Biology and Biochemistry. – 2009. – T. 41. – №. 11. – C. 2272-2282.
224. Johnston A. E. et al. Phosphorus: its efficient use in agriculture //Advances in agronomy. – 2014. – T. 123. – C. 177-228.
225. Kalinova J., Vrchotova N., Triska J. Exudation of allelopathic substances in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) //Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2007. – T. 55. – №. 16. – C. 6453-6459.

226. Kamal N. et al. The mosaic oat genome gives insights into a uniquely healthy cereal crop //Nature. – 2022. – T. 606. – №. 7912. – C. 113-119.
227. Kawabata, K.; Mukai, R.; Ishisaka, A. Quercetin and related polyphenols: New insights and implications for their bioactivity and bioavailability. Food Funct. 2015, 6, 1399–1417.
228. Kitabayashi H., A. Ujihara, T. Hirose and M. Minami, 1995a. Varietal differences and heritability for rutin content in common buckwheat, *Fagopyrum esculentum* Moench., Breeding Science (45 (1), 75 – 79
229. Kochian L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. – 1995.
230. Kreft M. Buckwheat phenolic metabolites in health and disease //Nutrition Research Reviews. – 2016. – T. 29. – №. 1. – C. 30-39.
231. Kreft, I.; Germ, M.; Golob, A.; Vombergar, B.; Bonafaccia, F.; Luthar, Z. Impact of Rutin and Other Phenolic Substances on the Digestibility of Buckwheat Grain Metabolites. Int. J. Mol. Sci. 2022, 23, 3923.
232. Krkoskova B., Mrazova Z. Prophylactic components of buckwheat // Food Research International. - 2005. – V. 38. – P.561-568.
233. Kubo K. et al. Effect of soil exchangeable potassium content on cesium absorption and partitioning in buckwheat grown in a radioactive cesium-contaminated field //Plant production science. – 2017. – T. 20. – №. 4. – C. 396-405.
234. Kundu A., Vadassery J. Chlorogenic acid-mediated chemical defence of plants against insect herbivores //Plant Biology. – 2019. – T. 21. – №. 2. – C. 185-189.
235. Lee L. S. et al. Contribution of flavonoids to the antioxidant properties of common and tartary buckwheat //Journal of Cereal Science. – 2016. – T. 68. – C. 181-186.
236. Li X. et al. Differential expression of flavonoid biosynthesis genes and accumulation of phenolic compounds in common buckwheat (*Fagopyrum*

- esculentum) //Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2010. – T. 58. – №. 23. – C. 12176-12181.
237. Li Z. et al. Responses of soil enzymatic activities to transgenic *Bacillus thuringiensis* (Bt) crops-A global meta-analysis //Science of the Total Environment. – 2019. – T. 651. – C. 1830-1838.
238. Li, D.Y.; Yue, L.X.; Wang, S.G.; Wang, T.X. Quercitrin restrains the growth and invasion of lung adenocarcinoma cells by regulating gap junction protein beta 2. *Bioengineered* 2022, 13, 6126–6135.
239. Li, F.; Zhang, X.; Li, Y.; Lu, K.; Yin, R.; Ming, J. Phenolics extracted from tartary (*Fagopyrum tartaricum* L. Gaertn.) buckwheat bran exhibit antioxidant activity, and an antiproliferative effect on human breast cancer MDA-MB-231 cells through the p38/MAP kinase pathway. *Food Funct.* 2017, 8, 177–188.
240. Lim J. H. et al. Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout //Food chemistry. – 2012. – T. 135. – №. 3. – C. 1065-1070.
241. Liszewski M., Chorbiński P. The influence of foliar buckwheat fertilization with copper, manganese and iron on selected parameters of its nectar production and seed yield //Polish Journal of Agronomy. – 2021. – №. 46. – C. 23-30.
242. Liu C. et al. Study on morphological traits, nutrient compositions and comparative metabolomics of diploid and tetraploid Tartary buckwheat sprouts during sprouting //Food Research International. – 2023. – T. 164. – C. 112334.
243. Margalef O. et al. The effect of global change on soil phosphatase activity //Global Change Biology. – 2021. – T. 27. – №. 22. – C. 5989-6003.
244. Martínez-Goñi X. S., Miranda-Apodaca J., Pérez-López U. Enhanced photosynthesis, transpiration regulation, water use-efficiency and growth in buckwheat outperforms wheat response to high [CO₂], high temperature and drought //Environmental and Experimental Botany. – 2024. – T. 222. – C. 105756.
245. Merrick M. J., Edwards R. A. Nitrogen control in bacteria //Microbiological reviews. – 1995. – T. 59. – №. 4. – C. 604-622.

246. Mia M. A. B. Enhanced Root Morphogenesis in Non-legumes as Induced by Rhizobacteria *Bacillus* spp //Bacilli in Agrobiotechnology: Plant Stress Tolerance, Bioremediation, and Bioprospecting. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – C. 151-168.
247. Miao M., Xiang L. Pharmacological action and potential targets of chlorogenic acid //Advances in pharmacology. – 2020. – T. 87. – C. 71-88.
248. Michiyama H., Arikuni M., Hirano T. Effect of air temperature on the growth, flowering and ripening in common buckwheat //The Proceeding of the 8th ISB. – 2001. – C. 138-142.
249. Miller A. J., Cramer M. D. Root nitrogen acquisition and assimilation //Plant and soil. – 2005. – T. 274. – C. 1-36.
250. Miltner A. et al. SOM genesis: microbial biomass as a significant source //Biogeochemistry. – 2012. – T. 111. – C. 41-55.
251. Min J. et al. Analysis of anti-osteoporosis function of chlorogenic acid by gene microarray profiling in ovariectomy rat model //Bioscience Reports. – 2018. – T. 38. – №. 4. – C. BSR20180775.
252. Moniruzzaman M. et al. Evaluation of physicochemical and antioxidant properties of sourwood and other Malaysian honeys: a comparison with manuka honey //Chemistry Central Journal. – 2013. – T. 7. – C. 1-12.
253. Nadolska-Orczyk A. et al. Major genes determining yield-related traits in wheat and barley //Theoretical and Applied Genetics. – 2017. – T. 130. – C. 1081-1098.
- a. Nations U. World population prospects: The 2015 revision //United Nations Econ Soc Aff. – 2015. – T. 33. – №. 2. – C. 1-66.
254. Natsume K., Hayashi S., Miyashita T. Ants are effective pollinators of common buckwheat *Fagopyrum esculentum* //Agricultural and Forest Entomology. – 2022. – T. 24. – №. 3. – C. 446-452.
255. Naveed M. et al. Chlorogenic acid (CGA): A pharmacological review and call for further research //Biomedicine & pharmacotherapy. – 2018. – T. 97. – C. 67-74.

256. Nobbe F., Hiltner L. Inoculation of the soil for cultivating leguminous plants //US patent. – 1986. – T. 570. – C. 813.
257. Ohsawa R. and T. Tsutsumi, 1995. Inter – varietal variation of rutin content in common buckwheat flour (*Fagopyrum esculentum* Moench.). *Euphytica* 86 (3): 183-189
258. Olthof M. R., Katan M. B., Hollman P. C. H. Chlorogenic acid and caffeic acid are absorbed in humans //The Journal of nutrition. – 2001. – T. 131. – №. 1. – C. 66-71.
259. Oomah B.D. and G. Mazza, 1996. Flavonoids and antioxidative activities in buckwheat. *J. Agric. Food Chem.* 44: 1746-1750.
260. Ortiz-Lopez A., Chang H. C., Bush D. R. Amino acid transporters in plants //Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes. – 2000. – T. 1465. – №. 1-2. – C. 275-280.
261. Pandey P. et al. Rutin (Bioflavonoid) as cell signaling pathway modulator: Prospects in treatment and chemoprevention //Pharmaceuticals. – 2021. – T. 14. – №. 11. – C. 1069.
262. Park C. H. et al. Influence of chitosan, salicylic acid and jasmonic acid on phenylpropanoid accumulation in germinated buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) //Foods. – 2019. – T. 8. – №. 5. – C. 153.
263. Park C. H. et al. Influence of indole-3-acetic acid and gibberellic acid on phenylpropanoid accumulation in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) sprouts //Molecules. – 2017. – T. 22. – №. 3. – C. 374.
264. Park M. H. et al. Rutin induces autophagy in cancer cells //International Journal of Oral Biology. – 2016. – T. 41. – №. 1. – C. 45-51.
265. Pasini F. et al. Buckwheat honeys: screening of composition and properties //Food Chemistry. – 2013. – T. 141. – №. 3. – C. 2802-2811.
266. Plaxton W., Lambers H. (ed.). Annual plant reviews, phosphorus metabolism in plants. – John Wiley & Sons, 2015. – T. 48.

267. Płażek, A.; Dziurka, M.; Słomka, A.; Kopeć, P. The Effect of Stimulants on Nectar Composition, Flowering, and Seed Yield of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 12852.
268. Posada L. F. et al. Enhanced molecular visualization of root colonization and growth promotion by *Bacillus subtilis* EA-CB0575 in different growth systems // *Microbiological research.* – 2018. – T. 217. – C. 69-80.
269. Possinger A. R., Byrne L. B., Breen N. E. Effect of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) on soil-phosphorus availability and organic acids // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* – 2013. – T. 176. – №. 1. – C. 16-18.
270. Potkule J., Punia S., Kumar M. Buckwheat: Nutritional Composition, Health Benefits, and Applications // *Handbook of Cereals, Pulses, Roots, and Tubers.* – CRC Press, 2021. – C. 253-266.
271. Potts S. G. et al. Safeguarding pollinators and their values to human well-being // *Nature.* – 2016. – T. 540. – №. 7632. – C. 220-229.
272. Qiu Q. et al. Interkingdom multi-omics analysis reveals the effects of nitrogen application on growth and rhizosphere microbial community of Tartary buckwheat // *Frontiers in Microbiology.* – 2023. – T. 14. – C. 1240029.
273. Ramanantenasoa M. M. J. et al. A new framework to estimate spatio-temporal ammonia emissions due to nitrogen fertilization in France // *Science of the Total Environment.* – 2018. – T. 645. – C. 205-219.
274. Rezaei E. E., Siebert S., Ewert F. Intensity of heat stress in winter wheat—phenology compensates for the adverse effect of global warming // *Environmental Research Letters.* – 2015. – T. 10. – №. 2. – C. 024012.
275. Robertson G. P., Vitousek P. M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource // *Annual review of environment and resources.* – 2009. – T. 34. – №. 1. – C. 97-125.
276. Rütting T., Aronsson H., Delin S. Efficient use of nitrogen in agriculture // *Nutrient cycling in Agroecosystems.* – 2018. – T. 110. – C. 1-5.

277. Ryle M. The influence of nitrogen, phosphate and potash on the secretion of nectar. Part II //The Journal of Agricultural Science. – 1954. – T. 44. – №. 4. – C. 408-419.
278. Saeed F. et al. Developing future heat-resilient vegetable crops //Functional & integrative genomics. – 2023. – T. 23. – №. 1. – C. 47.
279. Sagar B. M., Cauvery N. K. Agriculture data analytics in crop yield estimation: a critical review //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – T. 12. – №. 3. – C. 1087-1093.
280. Sanyal S. K. et al. Role of protein phosphatases in signaling, potassium transport, and abiotic stress responses //Protein phosphatases and stress management in plants: Functional genomic perspective. – 2020. – C. 203-232.
281. Sasaki H., Wagatsuma T. Bumblebees (Apidae: Hymenoptera) are the main pollinators of common buckwheat, *Fagopyrum esculentum*, in Hokkaido, Japan //Applied entomology and zoology. – 2007. – T. 42. – №. 4. – C. 659-661.
282. Sathya A., Vijayabharathi R., Gopalakrishnan S. Soil microbes: the invisible managers of soil fertility //Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 2: Functional Applications. – 2016. – C. 1-16.
283. Schimel J. P., Bennett J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm //Ecology. – 2004. – T. 85. – №. 3. – C. 591-602.
284. Sharma K. K., Ortiz R. Program for the application of genetic transformation for crop improvement in the semi-arid tropics //In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. – 2000. – T. 36. – C. 83-92.
285. Shen W. et al. Opportunity and shift of nitrogen use in China //Geography and Sustainability. – 2024. – T. 5. – №. 1. – C. 33-40.
286. Singh M. M. Foraging behaviour of the Himalayan honeybee (*Apis cerana* F.) on flowers of *Fagopyrum esculentum* M. and its impact on grain quality and yield //Ecoprint: An International Journal of Ecology. – 2008. – T. 15. – C. 37-46.

287. Sinsabaugh R. L., Carreiro M. M., Repert D. A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss //Biogeochemistry. – 2002. – T. 60. – C. 1-24.
288. Siracusa, L.; Gresta, F.; Sperlinga, E.; Ruberto, G. Effect of Sowing Time and Soil Water Content on Grain Yield and Phenolic Profile of Four Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) Varieties in a Mediterranean Environment. *J. Food Compos. Anal.* 2017, 62, 1–7.
289. Skřivan P. et al. Buckwheat Flour (*Fagopyrum Esculentum* Moench)—A Contemporary View on the Problems of Its Production for Human Nutrition //Foods. – 2023. – T. 12. – №. 16. – C. 3055.
290. Smith W. N. et al. Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada //Agriculture, ecosystems & environment. – 2013. – T. 179. – C. 139-150.
291. Sokoloff D. D. et al. Reproductive development of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) and its wild relatives provides insights into their evolutionary biology //Frontiers in Plant Science. – 2023. – T. 13. – C. 1081981.
292. Spiertz J. H. J. Nitrogen, sustainable agriculture and food security: a review //Sustainable agriculture. – 2009. – C. 635-651.
293. Springmann M. et al. Changes in food management, technology and diets to stay within planetary boundaries //Nature. – 2018. – T. 562. – C. 519-525.
294. Stefano M., Rosario M. Effects of light quality on micropropagation of woody species //Micropropagation of woody trees and fruits. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2003. – C. 3-35.
295. Sun B. O. et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil //Soil Biology and Biochemistry. – 2020. – T. 148. – C. 107911.
296. Sytar O. et al. Effect of chlorocholine chlorid on phenolic acids accumulation and polyphenols formation of buckwheat plants //Biological research. – 2014. – T. 47. – C. 1-7.

297. Tabatabai M. A. Soil enzymes //Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties. – 1994. – T. 5. – C. 775-833.
298. Takahama, U.; Tanaka, M.; Hirota, S. Buckwheat Flour and Bread. In Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention; Preedy, V.R., Watson, R.R., Patel, V.B., Eds.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2011; pp. 141–151.
299. Talamini M. V. et al. Buckwheat, alternative as second crop during the Summer and the Autumn in Southern Brazil: a crop review //Ciência Rural. – 2023. – T. 54. – №. 7. – C. e20230169.
300. Tang L. et al. Potassium fertilizer promotes the thin-shelled Tartary buckwheat yield by delaying senescence and promoting grain filling //Frontiers in Plant Science. – 2024. – T. 15. – C. 1385548.
301. Tepe H. D., et al. Ameliorative Effect of P and Ca, Mg, K Addition on Buckwheat in the Presence of Heavy Metal Stress //Celal Bayar University Journal of Science. – 2018. – T. 14. – №. 2. – C. 217-221.
302. Tiedtke J. Information requirements for botanical cosmetic ingredients //Cosmet Sci Technol. – 2006. – T. 1. – C. 15-21.
303. Tollefson J. IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years //Nature. – 2021. – T. 596. – №. 7871. – C. 171-172.
304. Transpiration activity of leaves in buckwheat varieties of different breeding periods / A. Amelin, A. Fesenko, V. Zaikin [et al.] // BIO Web of Conferences, Orel, 23–24 марта 2022 года. Vol. 47. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2022. – P. 01002. – DOI 10.1051/bioconf/20224701002. – EDN WAMEXW.
305. Tu C. M., Miles J. R. W. Interactions between insecticides and soil microbes //Residue Reviews: Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment. – 1976. – C. 17-65.
306. Uroz S. et al. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms //Trends in microbiology. – 2009. – T. 17. – №. 8. – C. 378-387.

307. Vágnerová K., Macura J. Relationships between plant roots, proteolytic organisms and activity of protease //Folia microbiologica. – 1974. – Т. 19. – С. 525-535.
308. Verma S., Singh A., Mishra A. Gallic acid: Molecular rival of cancer //Environmental toxicology and pharmacology. – 2013. – Т. 35. – №. 3. – С. 473-485.
309. Vogrinčič, M.; Kreft, I.; Filipič, M.; Žegura, B. Antigenotoxic effect of tartary (*Fagopyrum tataricum*) and common (*Fagopyrum esculentum*) buckwheat flour. J. Med. Food 2013, 16, 944–952.
310. Vogrinčič, M.; Kreft, I.; Filipič, M.; Žegura, B. Antigenotoxic effect of tartary (*Fagopyrum tataricum*) and common (*Fagopyrum esculentum*) buckwheat flour. J. Med. Food 2013, 16, 944–952.
311. Vollmannová A. et al. Концентрации фенольных кислот по-разному генетически определяются в листьях, цветках и зерне гречихи обыкновенной (*Fagopyrum esculentum* Moench) //Растения. – 2021. – Т. 10. – No 6. – С. 1142.
312. von Wirén N., Gazzarrini S., Frommer W. B. Regulation of mineral nitrogen uptake in plants //Plant and Soil. – 1997. – Т. 196. – №. 2. – С. 191-199.
313. Waldrop M. P., Balser T. C., Firestone M. K. Linking microbial community composition to function in a tropical soil //Soil biology and biochemistry. – 2000. – Т. 32. – №. 13. – С. 1837-1846.
314. Wang C. et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the lignin synthesis in the culm in relation to lodging resistance of buckwheat //Plant Production Science. – 2015. – Т. 18. – №. 2. – С. 218-227.
315. Wang M. et al. New insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells //International review of cell and molecular biology. – 2014. – Т. 310. – С. 1-37.
316. Wang Y. et al. Effect of different potassium fertilization treatments on the root and yield of Tartary buckwheat //Mol. Plant Breed. – 2019. – Т. 17. – С. 7955-7961.

317. Wiesmeier M. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales //Geoderma. – 2019. – T. 333. – C. 149-162.
318. Wineman A. et al. The changing face of agriculture in Tanzania: Indicators of transformation //Development Policy Review. – 2020. – T. 38. – №. 6. – C. 685-709.
319. Woliński J. Selected physical properties of buckwheat in determinate form //Inżynieria Rolnicza. – 2012. – T. 16. – C. 175-181.
320. Wu D. et al. Gallic acid-fortified buckwheat Wantuo: characteristics of in vitro starch digestibility, antioxidant and eating quality //Journal of Food Science and Technology. – 2023. – T. 60. – №. 1. – C. 292-302.
321. Yakushev A. V. et al. Temperature dependence of the activity of polyphenol peroxidases and polyphenol oxidases in modern and buried soils //Eurasian Soil Science. – 2014. – T. 47. – C. 459-465.
322. Yousaf L. et al. Millet: A review of its nutritional and functional changes during processing //Food Research International. – 2021. – T. 142. – C. 110197.
323. Yssel A., Reva O., Tastan Bishop O. Comparative structural bioinformatics analysis of *Bacillus amyloliquefaciens* chemotaxis proteins within *Bacillus subtilis* group //Applied microbiology and biotechnology. – 2011. – T. 92. – C. 997-1008.
324. Zenkova M. Bioactivated buckwheat in terms of its nutritional value //Food Science & Technology (2073-8684). – 2021. – T. 15. – №. 2.
325. Zhang L. et al. The tartary buckwheat genome provides insights into rutin biosynthesis and abiotic stress tolerance //Molecular plant. – 2017. – T. 10. – №. 9. – C. 1224-1237.
326. Zhao Y. et al. Dynamics of microbial community structure and cellulolytic activity in agricultural soil amended with two biofertilizers //European Journal of Soil Biology. – 2005. – T. 41. – №. 1-2. – C. 21-29.

327. Zhao Z. B. et al. Fertilization changes soil microbiome functioning, especially phagotrophic protists //Soil Biology and Biochemistry. – 2020. – T. 148. – C. 107863.
328. Zheng S. J., Ma J. F., Matsumoto H. High aluminum resistance in buckwheat: I. Al-induced specific secretion of oxalic acid from root tips //Plant Physiology. – 1998. – T. 117. – №. 3. – C. 745-751.
329. Zhihong J. et al. Influence of different fertilizers to crop rhizosphere microorganisms //Zuo wu xue bao. – 2004. – T. 30. – №. 5. – C. 491-495.
330. Zhu Y., Guo Y. Optimization of culture conditions for accumulating γ -aminobutyric acid (GABA) in germinated tartary buckwheat under salt stress by response surface methodology //Food Sci. – 2015. – T. 19. – C. 012.
331. Zia R. et al. Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation //Microbiological research. – 2021. – T. 242. – C. 126626.
332. Zvikas V. et al. Variety-based research on the phenolic content in the aerial parts of organically and conventionally grown buckwheat //Food Chemistry. – 2016. – T. 213. – C. 660-667.

Приложения

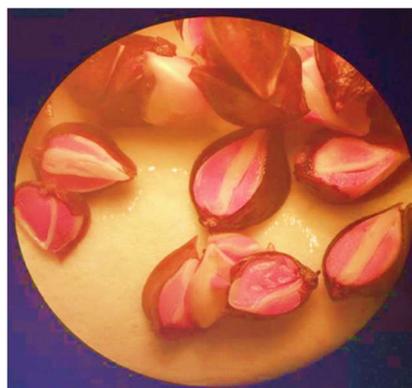
Приложение А



Примечание: На изображениях представлены два сорта гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum Moench*) — Диколь (слева) и Даша (справа) — в фазе полного цветения (июль 2024 г.). Оба сорта демонстрируют типичные для вида морфологические признаки семейства Гречишные (*Polygonaceae*), однако наблюдаются сортовые различия, имеющие агрономическое значение. На цветках сорта Диколь запечатлён шмель *Bombus lucorum* (семейство *Apidae*). Этот вид эффективен как опылитель благодаря длине хоботка (6–8 мм), соответствующей глубине нектарников гречихи (3–5 мм). Механизм опыления: вибрационная (buzz-опыление), при которой шмель вызывает резонанс пыльников, высвобождая пыльцу, что подтверждается характерным положением насекомого на нижней губе венчика. (Фото: Автор)

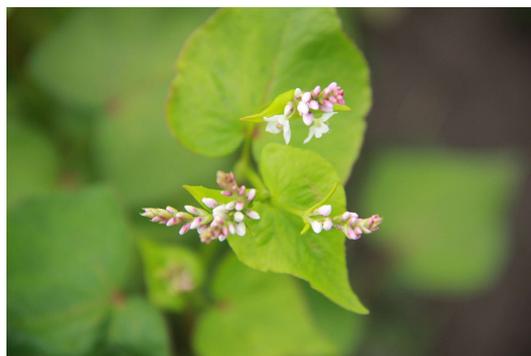


Примечание: На представленной фотографии зафиксированы сорта гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum Moench*) Диколь и Даша в фазе полного цветения в условиях умеренно-континентального климата Московской области (г. Орехово-Зуево, 55°48' с.ш., 38°58' в.д., июль 2023 г.).



Примечание: Фаза плодообразования у гречихи сорта Дикуль (*Fagopyrum esculentum* Moench) в агроклиматических условиях Московской области. Фаза плодообразования у сорта Дикуль в условиях Московской области охватывает период от завершения массового цветения до физиологической зрелости плодов (орешков). Этап онтогенеза критически зависит от комплекса агроклиматических факторов региона возделывания.

На рисунке поперечного среза плода гречихи (орешка) визуализирована внутренняя морфология семени. Перикарпий (плодовая оболочка) представлен трёхслойной структурой с выраженной ребристостью, характерной для трёхгранной формы. Эндосперм занимает центральную часть среза и представлен однородной массой с гладкой текстурой, подчёркивающей его аморфное строение. Зародыш смещён к верхнему ребру плода (эксцентрическое положение). Его изогнутая форма визуализирует характерный «крючок» гипокотыля, направленный в сторону микропиле. Рудименты околоцветника у основания плода показаны в виде двух редуцированных чешуевидных выростов. Окраска: кислый фуксин.

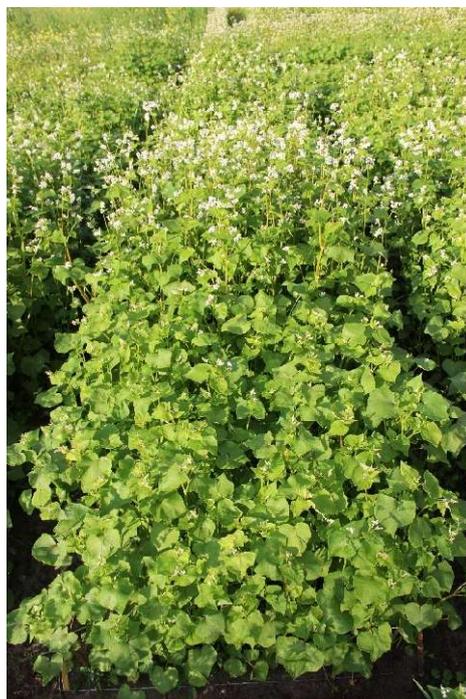


Примечание: На фотографии запечатлены пазушные листья гречихи сорта Дикуль, выращенной в г. Орехово-Зуево Московской области. Листья демонстрируют типичную для вида морфологию: сердцевидно-треугольная или стреловидная форма с цельными краями. Листовая пластинка гладкая, без опушения, с отчётливо выраженным жилкованием — пальчато-сетчатым, характерным для Polygonaceae.



Примечание: Верхняя часть растения демонстрирует цветки в разных фазах развития: бутоны (закрытые, зеленовато-розовые) на верхушках кистей, раскрытые цветки с бело-розовыми лепестками и выступающими тычинками, привлекающими опылителей, а также опавшие венчики у основания соцветий, где уже началось формирование плодов. На нижних ярусах видны плоды (семянки): молодые завязи (зелёные, ребристые) в пазухах листьев и созревающие сеянки (коричневатые, трёхгранные) с сохраняющимся околоцветником у основания.

Полевые опыты



Лабораторные опыты



Лабораторные опыты

