

На правах рукописи

УДК 631.811.1 : 633.1 : 470.53

Алёшин Матвей Алексеевич

**РЕГУЛИРОВАНИЕ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ ЗЕРНОВЫХ БОБОВЫХ И
ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР В АГРОЦЕНОЗАХ ПРЕДУРАЛЬЯ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук**

Москва - 2023

Работа выполнена на кафедре агрохимии ФГБОУ ВО «Пермский аграрно-технологический университет имени Д.Н. Прянишникова» и лаборатории минерального и биологического азота и оценки эффективности применения удобрений ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова».

**Научный
консультант:**

Завалин Алексей Анатольевич,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
академик РАН

**Официальные
оппоненты:**

Гармаш Нина Юрьевна,
доктор биологических наук, ФГБНУ Федеральный
исследовательский центр «Немчиновка», лаборатория
аналитических и регистрационных испытаний, главный
научный сотрудник

Завьялова Нина Егоровна,
доктор биологических наук, ФГБНУ Пермский НИИСХ
– филиал Пермского исследовательского центра
УрО РАН, лаборатория агротехнологий, главный
научный сотрудник

Полякова Надежда Васильевна,
доктор биологических наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский
государственный агротехнологический университет»,
кафедра почвоведения и природообустройства,
заведующая кафедрой

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный научный центр
кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.006.01 при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова» и на сайте: https://www.vniia-pr.ru/upload/iblock/480/aleshin_diss_14_06_2023.pdf

Автореферат разослан «__» «_____» 2023 г.

Приглашаем Вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании диссертационного совета. Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 31а, учёному секретарю диссертационного совета.

E-mail: dissovet_vniia@mail.ru

**Учёный секретарь
диссертационного совета**

Л.В. Никитина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Благодаря присущей бобовым культурам способности к азотфиксации и средообразующей функции, им отводится особая роль в агроценозах (Тихонович и др., 2012; Завалин и др., 2019). При их участии происходит регулирование круговорота азота в системе почва – растение – атмосфера. Зернобобовые культуры возделываются в одновидовых и смешанных агроценозах в качестве основных культур, занятых паров, поукосных и пожнивных посевов, где они являются эффективным биогенным стоком углерода и снижают продуцирование CO_2 в атмосферу. Посевы зернобобовых используют для сохранения и повышения плодородия почв, благодаря поступлению в почву пожнивно-корневых остатков, в которых накапливаются лабильное органическое вещество и фиксируемый ризобиями биологический азот, активно используемый последующими культурами в течение 3-4 лет (Назарюк и др., 2016; Конончук и др., 2019).

За счёт зернобобовых культур в земледелии РФ на сегодняшний день производится 4,42 млн т растительного белка, что на 2,08 млн т больше по сравнению с периодом 2005-2010 гг. (Завалин, 2022). Дальнейшее увеличение посевных площадей под их одновидовыми и смешанными посевами, является приемлемым решением одной из наиболее острых проблем, которая в настоящее время наблюдается в большинстве регионов РФ и Пермского края, в частности – дефицит кормового и продовольственного белка (Косолапов и др., 2021). Благодаря зернобобовым культурам (горох, вика), в растительной биомассе и зерне которых содержание переваримого протеина превышает зоотехническую норму на 32...55%, можно добиться повышения качества объёмистых и концентрированных кормов из наиболее распространенных злаковых культур (ячмень, овёс, кукуруза, тритикале), составляющих основу рациона сельскохозяйственных животных и птицы (Савченко и др., 2009; Елисеев, 2014).

Однако биологический потенциал бобовых культур в севооборотах используют не в полной мере, поскольку при создании агротехнологий не учитывается как видовая, так и сортовая специфичность растений в отношении формируемых агроценозов и применяемых удобрений, взаимодействия с почвенной микрофлорой и штаммами микроорганизмов, используемыми для инокуляции семян (Сидорова и др., 2010; Парахин, Кузмичёва, 2012; Новикова, 2018). Оптимизация азотного питания зернобобовых культур, при сохранении и последующем наращивании объёмов применения N-удобрений в агротехнологиях, является сложной задачей, поскольку используемые приемы должны обеспечивать формирование высокого урожая и накопление в нём протеина, не оказывая ингибирующего влияния на способность растений потреблять биологический азот. Среди таких приёмов особого внимания заслуживают использование биопрепаратов на основе ризобий для предпосевной инокуляции семян и возделывание зернобобовых в смешанных агроценозах с зерновыми злаками.

Цель работы – научное обоснование биологических параметров регулирования азотного питания зерновых бобовых и злаковых культур на дерново-подзолистых почвах Среднего Предуралья.

Задачи исследований:

1. Оценить эффективность действия азотного удобрения на урожайность зерновых бобовых и злаковых культур в одновидовых и смешанных агроценозах и инокуляции семян симбиотическими ризобактериями;
2. Установить изменения биохимического состава и технологических показателей качества урожая зерновых культур при разном уровне азотного питания;
3. Определить объём накопления свежего органического вещества, количество общего и биологического азота, поступающих в почву в агроценозах зернобобовых культур;
4. Установить объём секвестирования C-CO₂, прямой и косвенной эмиссии N-N₂O из почвы в агроценозах зерновых бобовых и злаковых культур при разных уровнях N-питания;
5. Определить баланс азота в почве и эффективность его использования зерновыми культурами в разных по составу агроценозах;
6. Оценить действие биологического азота (N_{биол.}), накопленного зернобобовыми культурами в одновидовых и смешанных агроценозах;
7. Выявить изменения в структуре микробного сообщества и содержании форм биогенных элементов (C, N) в почве при разложении соломы зерновых культур.

Научная новизна. Впервые для условий Предуралья выявлены различия в азотном питании сортов гороха посевного, которые выражены посредством более высокой отзывчивости растений сорта Агроинтел (+0,66 т/га) на внесение N-удобрения, а у сорта Вельвет (+0,45 т/га) на инокуляцию семян симбиотическими ризобактериями. При повышении обеспеченности растений гороха азотом происходят увеличение урожайности зерна до 2,53...2,63 т/га у сорта Агроинтел и наращивание вегетативной массы, в ущерб зерновой продуктивности, у сорта Вельвет.

Выявлены изменения параметров фотоассимилирующей поверхности и структуры симбиотического аппарата на корнях растений гороха при внесении N-удобрения. Они связаны с более интенсивным формированием до 38,6...41,0 шт. крупных клубеньков на начальном этапе развития растений, а также быстрым прекращением функционирования 62,5...94,4% клубеньков при обесцвечивании бактериоидной ткани на их срезе в дальнейшем.

Обнаружены особенности в реакции растений гороха на внесение N-удобрения при выращивании на дерново-подзолистой почве разной окультуренности. На среднеокультуренной почве прибавка зелёной массы и зерна от внесения N-удобрения в 1,2...3,0 раза выше, чем на слабоокультуренной почве. Пороговая дозировка N-удобрения для слабо- и среднеокультуренной почвы, выше которой у гороха полностью подавляется процесс формирования симбиотического аппарата, составляет 0,05 и 0,20 г N/кг а.с.п. соответственно.

При включении гороха посевного в состав агроценозов с яровой пшеницей, зафиксирована оптимизация её азотного питания, что прослеживается по увеличению урожайности зерносенажа (на 2,9...4,0 т/га) и зерна (на 0,42 т/га), накоплению сырого протеина в зелёной биомассе растений (на 28,0...61,9 г/кг) и зерне (на 5,1...27,6 г/кг). Аналогичные изменения в продуктивности растений и биохимическом составе урожая прослеживаются у озимой тритикале в смешанных агроценозах с озимой викией.

Конкретизированы генетические различия зернобобовых культур на внесение N-удобрения. Увеличение доли гороха в смешанных агроценозах с 25 до 75% сопровождалось повышением их отзывчивости на N-удобрение с 0,6...1,4 до 1,6...2,9 т/га. Увеличение дозы N-удобрения и доли вики в смесях с тритикале, приводит к снижению урожайности зерна на 0,72...2,13 т/га из-за сохранения у растений положительного баланса между автотрофным и симбиотрофным питанием азотом.

Рассчитан потенциальный объём свежего органического вещества (0,8...7,7 т/га), общего (15,8...128,6 кг/га) и биологического (10,3...74,6 кг/га) азота, накапливаемых в почве при разных сроках уборки зернобобовых культур в условиях Предуралья. Предложено уравнение регрессии для учёта выхода ПКО озимой вики, позволяющее дополнить методику определения вклада биологического азота бобовых культур в азотный баланс земледелия России.

Произведены расчёты количества C-CO₂ (120...2565 кг/га) дополнительно секвестрируемое зернобобовыми культурами и поступающее в почву (до 777...856 кг/га) за счёт усиления азотфиксирующей способности. Объём эмиссии закиси азота из почвы при разных уровнях азотного питания зернобобовых культур составил от 1,21 до 4,54 кг N-N₂O/га.

Установлены доза N-удобрения (свыше 60 кг N/га), величины расходных и приходных статей, включая поступление N_{биол.} в разных по составу агроценозах гороха, при формировании устойчивого положительного баланса азота в дерново-подзолистой почве (в среднем 17,9...73,7 кг/га). В отличие от гороха, для озимой вики возможна компенсация всех статей затрат N за счёт симбиотической азотфиксации.

В рамках комплексной оценки действия биологического азота зернобобовых культур отмечено увеличение урожайности зерна овса, ячменя и пшеницы на 0,18...0,74 т/га и содержания в нём сырого протеина на 6,1...17,8 г/кг.

Определены форма жизнедеятельности микроорганизмов, структура и динамика развития микробиома на поверхности соломы зерновых культур в начальный период её разложения в почве. Установлено увеличение общей численности культивируемых на МПА, КАА и СЧ микроорганизмов (в 1,2-1,9 раза) в первые 3 месяца инкубирования. По истечении 120 суток отмечен гомеостаз микробного сообщества, участвующего в деструкции соломы. Суммарный объём фактической минерализации органического вещества соломы зерновых культур составил 8,63...17,79 мкг C-CO₂ × 1 г почвы⁻¹ × час⁻¹, образуя следующий возрастающий ряд: озимая рожь → яровая пшеница → ячмень → овёс → горох.

Расширено представление относительно динамики и трансформации фракций углерода органического вещества почвы при минерализационно-иммобилизационных превращениях азота, поступающего с пожнивными остатками зерновых культур. Происходит увеличение содержания углерода легкоразлагаемых фракций (C_{эв.} на 14...79 мг/кг почвы, C_{лов} на 0,14...0,21%), C_{орг.} (на 0,24...0,46%) и снижение почвенных запасов азота (N_{мин.} на 1,5 мг/100 г почвы, N_{лг} на 0,8 мг/100 г почвы, N_{тг+нг} на 10,7 мг/100 г почвы).

Методология и методы исследований. Исследования в одновидовых и смешанных агроценозах зернобобовых культур проводили с 2012 по 2019 гг. на учебно-научном опытном поле ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени Д.Н. Прянишникова». В контролируемых

условиях на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности растения гороха выращивали в сосудах на вегетационной площадке УНЦ «Липогорье». Лабораторные модельные эксперименты в период с 2020 по 2022 гг., а также все сопутствующие агрохимические исследования растений и почвы проводили на кафедре агрохимии Пермского ГАТУ. Учёт накопления свежего органического вещества в почве, общего и фиксированного N в биомассе зернобобовых культур, инвентаризацию объёма эмиссии N-N₂O из почвы и расчёт эмиссионного фактора, эффективность использования, вынос и баланс N в почве, а также оценку действия биологического азота производили в лаборатории минерального и биологического азота и эффективности применения удобрений ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Действие азотного удобрения на урожайность зерновых бобовых и злаковых культур в одновидовых и смешанных агроценозах;
2. Биохимический состав и технологические показатели качества урожая зерновых культур при изменении уровня азотного питания;
3. Количество свежего органического вещества, общего и биологического азота, накапливающегося в почве в агроценозах зернобобовых культур;
4. Объём C-CO₂, секвестрируемый зернобобовыми культурами, и эмиссия N-N₂O из почвы в их агроценозах;
5. Баланс азота в почве и величина показателей, характеризующих эффективность его использования в агроценозах зерновых культур;
6. Действие биологического азота, накопленного в разных по составу агроценозах зернобобовых культур;
7. Динамика микробиологических и агрохимических показателей почвы при разложении соломы зерновых культур.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе, при разработке биологизированных агротехнологий гороха посевного и вики озимой на дерново-подзолистой почве.

Установление дополнительного объёма углерода и биологического азота, поступающих в почву с послеуборочными растительными остатками зернобобовых культур, позволяет усовершенствовать расчёт баланса этих элементов в почве и разработку системы применения азотных удобрений в севообороте.

Данные по стоку CO₂ и эмиссии N₂O могут быть использованы при составлении национального кадастра выбросов парниковых газов, а также в качестве основания для дальнейших исследований и разработки методики по оценке потоков углерода и азота в агроценозах.

Представленная оценка действия биологического азота, накопленного зернобобовыми культурами, позволяет обоснованно рекомендовать их включение в состав севооборотов в качестве хороших и отличных предшественников.

Результаты лабораторных модельных экспериментов позволяют детализировать представление и качественно дополнить уровень знаний о микробных процессах при разложении в почве растительных остатков.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены на 28 научных мероприятиях различного уровня: Всероссийских научно-практических

конференциях (Пермь, Пермский ГАТУ, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2022); Международных научно-практических конференциях (Ижевск, Ижевская ГСХА, 2014, 2019); Международных и Всероссийской научно-практических конференциях (Москва, ВНИИА, 2015, 2018, 2022); Международных научно-практических конференциях (Краснодар, КубГАУ, 2016, 2020); Международных научно-практических конференциях (Нижний Новгород, Нижегородская ГСХА, 2017, 2021); Международной Пушкинской школы-конференции (Пушино, 2020); Всероссийского конгресса (Пермь, Пермский ГНИУ, 2020); Всероссийской научно-практической конференции (Пермский НИИСХ, ПФИЦ УрО РАН, 2021); Международной научно-практической конференции (Горки, Беларусь, Белорусская ГСХА, 2021).

Основные положения диссертационной работы доложены в рамках научного сообщения «Кормопроизводство: состояние, проблемы и пути их решения» на заседании бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН (24 февраля 2022 г.).

Личный вклад соискателя. Автору принадлежит формулировка темы и программы исследований, анализ опубликованных источников. Лично проведены закладка полевых опытов со смешанными посевами яровых и озимых зерновых культур (2012-2016 гг.), одновидовыми посевами гороха (2014-2016 гг., 2018-2019 гг.), определение действия биологического азота на урожайность и качество зерна ячменя (2013-2015 гг.), яровой пшеницы (2015-2017 гг.) и овса (2015-2017 гг.), поставлены лабораторные модельные эксперименты (2020-2022 гг.). Осуществлён анализ результатов исследований, сформулированы выводы работы.

Публикации по теме диссертации. По материалам исследований опубликовано 57 работ, в том числе 16 – в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, списка литературы, включающего 883 наименований, в том числе – 310 на иностранных языках. Работа изложена на 478 страницах печатного текста, содержит 109 таблиц, 20 рисунков, 75 приложений.

Благодарности. Автор выражает признательность научному консультанту академику РАН, доктору сельскохозяйственных наук, профессору Алексею Анатольевичу Завалину за всестороннюю поддержку и ценные советы, а также Г.П. Майсак, В.А. Волошину (Пермский НИИСХ), Т.В. Полюдовой (ИЭГМ УрО РАН), А.Н. Шихову (Пермский ГНИУ), Л.А. Михайловой, [А.М. Смолину], [Р.Х. Садикову], М.Г. Субботиной, В.П. Мурыгину (Пермский ГАТУ) за помощь в проведении исследований и творческое сотрудничество. Выражаю благодарность студентам-дипломникам, принимавшим участие в проведении полевых, вегетационных и лабораторных экспериментов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

Первая глава посвящена обзору результатов, которые представлены в отечественных и зарубежных научных источниках, по влиянию N-удобрений на азотфиксирующую активность и продуктивность зернобобовых культур в разных по составу агроценозах. Научно обоснованное применение активных штаммов симбиотических ризобактерий, при сохранении и последующем наращивании объемов применения минерального азота в агротехнологиях, является основой для формирования высокой продуктивности зернобобовых культур в агроценозах и реализации их биологического потенциала связанного с азотфиксацией. Необходимой предпосылкой для этого является установление биологических параметров, регулирующих величину и качество урожая зернобобовых культур, потенциальный объём биологического азота, накапливаемого в органическом веществе растительных остатков, вынос урожая и баланс азота в почве, эмиссию N-N₂O из почвы, продуктивность последующих культур. Это определило актуальность исследования, позволило сформулировать цель и задачи для последующей работы.

Глава 2. Условия и методика проведения опытов и исследований

Научно-учебное опытное поле Пермского ГАТУ, на котором произведена закладка полевых опытов, согласно агроклиматическому районированию Пермского края, относится к IV^A агроклиматическому району. Он характеризуется как теплый, незначительно засушливый. Во время проведения исследований (2012-2019 гг.) сумма осадков за вегетационный период варьировала от 162 до 521 мм, при сумме активных температур $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 1610-2095 $^{\circ}\text{C}$. Гидротермический коэффициент (ГТК, по Селянинову) по месяцам в среднем составил: май - 1,77, июнь - 1,91, июль - 1,93, август - 2,55. Средняя суточная температура воздуха за вегетационный период, продолжительность которого от 134 до 156 суток, составляла 15,5 $^{\circ}\text{C}$. (<http://gis.psu.ru>).

Территория Пермского края относится к южно-таёжной подзоне, где в окультуренном состоянии под пашней располагаются 8,3% дерново-сильнопodzolistых, 29,3% дерново-среднеpodzolistых и 62,4% дерново-слабоpodzolistых почв (Кротких, Михайлова, 2013).

Почва участков, на которых проводили исследования с одновидовыми посевами афильных сортов гороха, слабо- и среднегумусированная (2,04...2,47%), с близкой к нейтральной и нейтральной реакцией среды (рН_{KCl} 5,6...6,2), повышенным содержанием минерального азота (30,3...42,3 мг/кг), высоким содержанием подвижного фосфора (170...222 мг/кг) и калия (185...251 мг/кг) по Кирсанову; с одновидовым и смешанными посевами гороха листочкового морфотипа среднегумусированная (2,31...2,60%) с близкой к нейтральной и нейтральной реакцией среды (рН_{KCl} 5,6...6,7), повышенным содержанием минерального азота (38,8...54,7 мг/кг), высоким и очень высоким содержанием подвижного фосфора (215...262 мг/кг) и повышенным-очень высоким калия (129...275 мг/кг); с одновидовым и смешанными посевами озимой вики слабогумусированная (1,60...1,83%), со слабокислой-нейтральной реакцией среды (рН_{KCl} 5,5...6,1), повышенным содержанием минерального азота (43,2...47,0 мг/кг), высоким и очень высоким содержанием подвижного фосфора (205...255 мг/кг) и калия (170...240 мг/кг).

В работе приведены результаты четырёх полевых опытов, вегетационного и трёх модельных лабораторных экспериментов. Каждый эксперимент был сопровождён фенологическими наблюдениями и последующим лабораторным анализом почвы, растений, полученного урожая по ГОСТам и общепринятым методикам. Для полевых опытов с одновидовыми и смешанными агроценозами зернобобовых культур производился расчёт: количества общего и биологического азота в поступающем в почву свежем органическом веществе (Завалин и др., 2007), секвестрируемого при азотфиксации C-CO₂, прямой и косвенной эмиссии N-N₂O (Методические рекомендации..., 2014); выноса азота урожаем, эффективности его использования из удобрения и баланса в почве (Рекомендации по проектированию..., 2010); количества усвоенного N_{биол.} и величины прибавок урожайности зерна, высеваемых в последующем яровых зерновых культур (Нормативы для определения вклада..., 2007). Представлен материал по действию биологического азота, накопленного в посевах зернобобовых культур (гороха, озимой вики) на урожайность, кормовую питательность, продовольственные и технологические показатели зерна овса, ячменя и пшеницы.

Опыт №1 (2014-2017 гг.) был посвящён изучению влияния инокуляции семян симбиотическими ризобактериями и азотного удобрения на урожайность и качество зерна гороха посевного. Схема опыта: фактор А – обработка посевного материала инокулянтом: А₀ – без обработки, А₁ – при обработке; фактор В – дозы N-удобрения, кг д.в./га: В₀ – N0, В₁ – N30, В₂ – N45, В₃ – N60, В₄ – N75, В₅ – N90, В₆ – N105, В₇ – N120. Учётная площадь делянок 100 м² (20×5). Высевались сорта гороха безлисточкового морфотипа, которые различаются по происхождению и направлению использования: Агроинтел – отечественной селекции, зернового, продовольственного назначения; Вельвет – зарубежной селекции, зернового, фуражного назначения. Азотное удобрение (N_{аа}, 34,4% д.в.) вносили под предпосевную культивацию. Инокуляционная нагрузка при обработке семенного материала биопрепаратом составила 6,2...9,3×10⁵ бактериальных клеток на семя. Действие накопленного в ПКО гороха симбиотически фиксированного азота оценивали по урожайности и качеству зерна последующей культуры – ярового овса.

В *опыте №2* (2018-2019 гг.) на фоне инокуляции семян симбиотическими ризобактериями изучали влияние азотного удобрения на формирование фотосинтетического и симбиотического аппарата гороха посевного сортов Красноуфимский 11 и Вельвет. Схема опыта: фактор А – сорт гороха (направление использования): А₀ – Красноуфимский 11 (зернового, продовольственного), А₁ – Вельвет (зернового, фуражного); фактор В – дозы N-удобрения, кг д.в./га: В₀ – N0, В₁ – N15, В₂ – N30, В₃ – N45. Удобрения те же. Учётная площадь делянок 33 м². Определения интенсивности развития фотосинтетического и симбиотического аппарата гороха, проводили по фазам развития растений (3-4 листьев, ветвления стебля, бутонизации – начало цветения, зелёных бобов).

В *опыте №3* (2012-2015 гг.) изучали влияние азотного удобрения на урожайность яровой пшеницы и посевного гороха в одновидовых и смешанных агроценозах. Схема опыта: фактор А – состав агроценоза: А₀ – пшеница 100%, А₁ – пшеница 75% + горох 25%, А₂ – пшеница 50% + горох 50%, А₃ – пшеница 25% + горох 75%, А₄ – горох 100%; фактор В – дозы N-удобрения, кг д.в./га: В₀ – N0, В₁ – N30, В₂ – N60. Учётная площадь делянок при уборке на зерносеянец и зерно составляла 25,2 и 91,5 м². Возделывали

районированные сорта гороха посевного листочкового морфотипа (Альбумен) и пшеницы яровой (Иргина), имеющие близкий по продолжительности вегетационный период. Азотное удобрение (N_m , 46% д.в.) вносили под предпосевную культивацию. Уборку на зерносеяж проводили дифференцированно, по достижении культурами уборочной спелости, в сочетании с прямым методом учёта урожая. Уборку на зерно – по достижении полной спелости зерна. Действие накопленного в ПКО гороха симбиотически фиксированного азота оценивали по урожайности и качеству зерна последующей культуры – ярового ячменя.

В *опыт №4* в 2013-2017 гг. изучали влияние азотного удобрения на урожайность озимой тритикале и озимой вики в смешанных и одновидовых агроценозах. Схема опыта: фактор А – состав агроценоза: A_1 – тритикале 100%, A_2 – тритикале 75% + вика 25%, A_3 – тритикале 50% + вика 50%, A_4 – тритикале 25% + вика 75%, A_5 – вика 100%; фактор В – дозы N-удобрения, кг д.в./га: B_1 – N_0 , B_2 – N_{30} , B_3 – N_{45} , B_4 – N_{60} . Учётная площадь делянок при уборке на зерносеяж и зерно составляла 10,5 и 89,5 м². Высевали перспективные сорта тритикале озимой (Ставропольский 5) и вики озимой (Юбилейная). Азотное удобрение (N_{ab} , 34,4% д.в.) вносили в качестве ранневесенней подкормки. Действие накопленного в ПКО озимой вики симбиотически фиксированного азота оценивали по урожайности и качеству зерна последующей культуры – яровой пшеницы.

В *опыте №5* (2015, 2017 гг.) устанавливали эффективность использования азотного удобрения на фоне инокуляции семян гороха симбиотическими ризобактериями при возделывании на слабо- и среднеокультуренной тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почве. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы, дифференцированной по степени окультуренности (Сычев и др., 2020) представлена в таблице 1.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика пахотного слоя дерново-подзолистой почвы разной степени окультуренности

Глубина слоя, см	Гумус, %	pH _{KCl}	Нг	S	ЕКО	V, %	Подвижные формы, мг/кг почвы	
			мг-экв. /100 г почвы				P ₂ O ₅	K ₂ O
Слабоокультуренная почва								
$A_{пах, 0-22}$	2,10	4,4	5,7	12,5	17,8	70	44	72
Среднеокультуренная почва								
$A_{пах, 0-25}$	2,05	5,1	4,1	17,5	21,6	81	59	92

Для закладки использовали сосуды Митчерлиха (20×20), вмещающие 5 кг абсолютно сухой почвы. Схема опыта: фактор А – обработка посевного материала инокулянтom: A_0 – без обработки, A_1 – при обработке; фактор В – дозы N-удобрения, г N/кг абсолютно сухой почвы: B_0 – N_0 , B_1 – $N_{0,05}$, B_2 – $N_{0,10}$, B_3 – $N_{0,15}$, B_4 – $N_{0,20}$, B_5 – $N_{0,25}$. Посев осуществляли пророщенными семенами гороха сорта Агроинтел. Уборку растений и установление их продуктивности проводили в 3 срока (фазы): ветвления стебля, бутонизации – начало цветения и полной спелости. Определение морфологического строения симбиотического ризобиального аппарата на корневой системе было сопряжено с первым и вторым сроками уборки, а также с фазой формирования зелёных (плоских) бобов.

В *опыте №6* (2020 г.) в лабораторном модельном эксперименте изучали активность и развитие почвенного микробного сообщества, трансформацию форм биогенных элементов (С, N) в почве при разложении соломы зерновых культур, где использовали следующую схему: 1. Почва без соломы (контроль); 2. Солома озимой ржи; 3. Солома яровой пшеницы; 4. Солома ярового ячменя; 5. Солома посевного гороха; 6. Солома ярового овса. Повторность вариантов 12-кратная. В сосуды, вмещающие 2,6 кг абсолютно сухой среднесуглинистой дерново-подзолистой почвы, закладывали по 12 г каждого вида соломы, которая была отобрана с делянок одного полевого севооборота. Длина соломенной резки составляла 3-4 см. Агрохимическая характеристика почвы представлена в таблице 2.

Таблица 2. Агрохимическая характеристика пахотного слоя дерново-подзолистой почвы в лабораторных модельных опытах

Глубина слоя, см	Гумус, %	pH _{KCl}	Нг	S	ЕКО	V, %	Подвижные формы, мг/кг		
			мг-экв./100 г почвы				N _{мин}	P ₂ O ₅	K ₂ O
0-23	2,10	5,9	1,6	16,0	17,6	91	50,0	154	227

Для поддержания высокой микробиологической активности и энергичного разложения соломы, почву в сосудах увлажняли до 60% ПВ. По истечении 30, 60, 90 и 120 суток в каждом из вариантов учитывали по 3 сосуда. Определяли массу разложившейся соломы, агрохимические и микробиологические показатели почвы.

В *опыте №7* (2021 г.) изучали влияние вида соломы и N-удобрения на развитие проростков овса. Схема опыта: 1. Солома пшеницы; 2. Солома пшеницы + N; 3. Солома гороха; 4. Солома гороха + N. Азотное удобрение (N_{аа}, 34,4% д.в.) вносили в дозе 8 мг N/100 г почвы. Для эксперимента использовали сосуды, вмещающие 250 г абсолютно сухой дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы. В каждый сосуд высевали по 5 предварительно пророщенных семян овса. Для оценки условий азотного питания проростков овса на 15- и 45-е сутки проводили: определение обеспеченности почвы подвижными формами минерального азота (N-NO₃, N-NH₄); морфо-биометрическую, тканевую и листовую диагностики азотного питания растений.

В *опыте №8* (2022 г.) определяли развитие микробных сообществ на поверхности соломы зерновых культур на начальном этапе её разложения в почве. Для этого солому яровой пшеницы и посевного гороха заделывали в почву (табл. 3) на глубину 5 см. При этом одну часть соломы подвергали стерилизации. Инкубирование сосудов с почвой и соломой проводили в термостате при постоянной влажности (60% ПВ) и температуре (25±2°C). Отбор и последующий анализ образцов соломы осуществляли в 3-кратной повторности на 1, 2, 5, 15, 20 и 30 сутки. Определение микробной метаболической активности производили при окрашивании соломы 0,1%-ным р-ром 2, 3, 5-трифенил-тетразолия хлористого (Калинина и др., 2018). Микробный пейзаж сообществ, формирующихся на соломе в процессе её разложения, изучали с помощью микровизора mVizo-103 «Ломо».

Полученные результаты в полевых и вегетационном опытах обрабатывали методом дисперсионного анализа. Для лабораторных модельных экспериментов рассчитывали средние значения, их стандартные ошибки и доверительные интервалы с помощью программы MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глава 3. Урожайность зерновых бобовых и злаковых культур в одновидовых и смешанных агроценозах

В среднем за 3 года (табл. 3) зерновая продуктивность гороха сорта Агроинтел в одновидовом агроценозе (*опыт №1*) изменялась от 1,88 до 2,63 т/га. На сорте Вельвет отмечено более существенное варьирование урожайности зерна – от 1,55 до 3,09 т/га, что указывает на более высокий генетический потенциал сорта и низкую его адаптивность к условиям возделывания. Установлена различная реакция сортов гороха на инокуляцию семян симбиотическими ризобактериями и N-удобрение. Максимальная урожайность зерна гороха сорта Агроинтел (2,63 т/га) получена при инокуляции семян ризобактериями и внесении N105. Более высокая зерновая продуктивность у сорта Вельвет (3,09 т/га) отмечена также при инокуляции симбиотическими ризобактериями и внесении N30.

Таблица 3. Сортная отзывчивость гороха посевного на инокуляцию семян симбиотическими ризобактериями и дозы азотного удобрения, т/га (среднее за 3 года)

Дозы азота (В)	Агроинтел		Среднее по В	Вельвет		Среднее по В
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N0	1,88	2,07	1,98	2,41	2,86	2,70
N30	2,03	2,13	2,08	2,74	3,09	2,95
N45	2,34	2,26	2,30	2,56	2,85	2,71
N60	2,28	2,57	2,42	2,38	2,69	2,53
N75	2,23	2,33	2,28	2,31	2,58	2,45
N90	2,16	2,24	2,20	2,13	2,38	2,24
N105	2,54	2,63	2,59	1,91	1,94	1,96
N120	2,24	2,27	2,26	1,81	1,55	1,73
Среднее по А	2,22	2,36		2,28	2,49	
НСР ₀₅ для главных эффектов	0,12		0,20	0,20		0,18
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А		0,28	А		0,36
	В		0,43	В		0,38

Эффект от инокуляции семян ризобактериями по сортам составил +0,14 т/га (Агроинтел) и +0,21 т/га (Вельвет), или 6,2% и 8,8%. Более высокая отзывчивость на инокуляцию отмечена у сорта Вельвет (+0,45 т/га) без внесения N-удобрения (N0), у сорта Агроинтел (+0,22 т/га) – при внесении 60 кг N/га. Это подтверждает положение (Проворов, 2015) о том, что восприимчивость сортов на инокуляцию семян определяется их ориентированностью на взаимодействие с ризосферной микрофлорой. Обработка семян симбиотическими ризобактериями способствует сохранению более длительной активности фотосинтетического аппарата у обоих сортов и способности корневой системы растений к дополнительному поглощению N, последующему его поступлению в формирующиеся семена. Высокая конкурентоспособность и вирулентность штаммов *Rhizobium* позволяет им активно инфицировать корневую систему гороха, несмотря на наличие в почве значительного количества ($4,15...6,13 \times 10^5$ КОЕ в 1 г почвы) спонтанных ризосферных, в том числе симбиотических N-фиксирующих микроорганизмов. Эффект от инокуляции симбиотическими ризобактериями подтверждается увеличением урожайности и оптимизацией биохимического состава зерна следующей культуры севооборота (овса).

Внесение N-удобрения на сорте Агроинтел в дозах свыше N60 снижало отзывчивость гороха на инокуляцию, что связано с переходом растений на автотрофный тип питания. Повышение урожайности зерна сорта Вельвет получено при внесении только стартовой дозы N30. Увеличение доз N-удобрения приводило к ингибированию процесса азотфиксации, снижению отзывчивости гороха на инокуляцию семян ризобактериями. Наличие у сорта Агроинтел, в диапазоне изучаемых доз N-удобрения, чётко обозначенного 2-го пика урожайности (2,63 т/га), связано с проявлением синергического эффекта с инокулянтom.

В *опыте №2* установлены интенсивность нодуляции и сохранение способности симбиотического аппарата на корневой системе гороха к активной азотфиксации при внесении N-удобрения на фоне инокуляции семян ризобактериями (рис. 1).

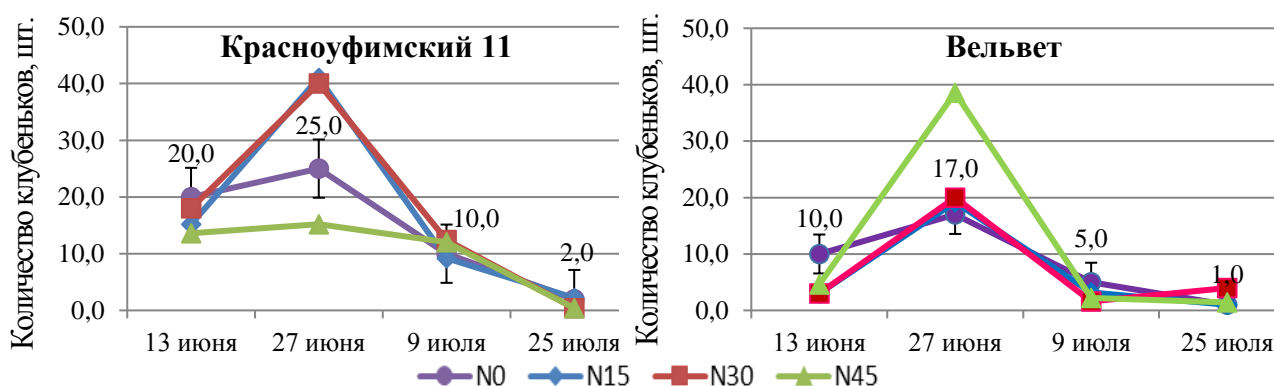


Рисунок 1. Влияние доз N-удобрения и инокуляции семян симбиотическими ризобактериями на количество клубеньков на корневой системе гороха

При наступлении фазы ветвления стебля и появлении 5-6-го листа, на корневой системе афилльных сортов гороха формируется до 20 клубеньков на растении. Более выполненные клубеньки располагались на главном корне. Единичные клубеньки с ровной, не сморщенной поверхностью, правильной округлой и слегка удлинённой формы были на скелетных боковых корнях 1-2-го порядков. Количество клубеньков, независимо от сорта, достигало максимума (38,6...41,0 шт./растение) в фазу бутонизации. К фазе зелёных (плоских) бобов количество клубеньков значительно уменьшилось или они исчезли вовсе. Это связано со снижением развития листового аппарата и его ассимилирующей способности, оттоком питательных веществ к корням, прекращением активного функционирования и последующим отмиранием корневых систем растений. При недостаточном количестве атмосферных осадков и повышенной температуре воздуха (ГТК 0,74) функционирование клубеньков на корнях гороха прекращается уже через 7 недель после появления всходов.

Во второй месяц развития растений при внесении N45 наблюдали быстрое снижение количества клубеньков у сорта Красноуфимский 11 и сохранение их численности у сорта Вельвет. Это указывает на значительные различия между сортами по влиянию N-удобрения. Сохранность части симбиотического аппарата и активное функционирование корневой системы на более поздних этапах развития гороха указывает на наличие стимулирующего влияния «стартовых доз» N-удобрения. Различия в массе клубеньков на корнях растений сорта Красноуфимский 11 отмечены только 27 июня и 9 июля, за счёт внесения азотного удобрения в дозах 30 и 45 кг N/га (рис. 2). Существенное влияние на развитие симбиотического аппарата

у сорта Вельвет оказали все изучаемые дозы азотного удобрения (N15-45) только на начальном этапе вегетации (13 июня).

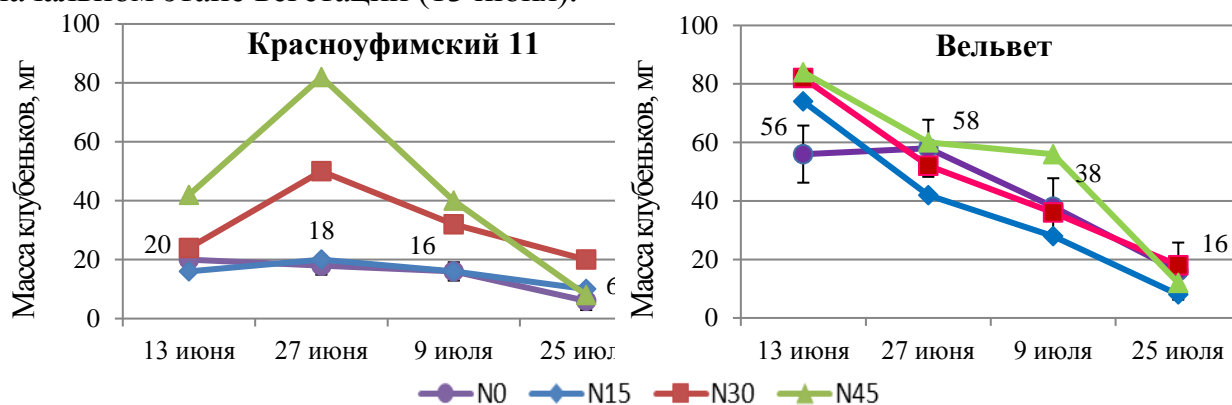


Рисунок 2. Влияние доз N-удобрения и инокуляции семян симбиотическими ризобактериями на массу клубеньков на корневой системе гороха

В течение вегетации гороха происходит снижение количества леггемоглобина и обесцвечивание бактериоидной ткани клубеньков, что приводит к прекращению симбиотической азотфиксации. Внесение N-удобрения способствует увеличению доли равномерно окрашенных розовых клубеньков на срезе в начале вегетации гороха Красноуфимский 11 и более быстрому обесцвечиванию бактериоидной ткани в последующем. При переходе от фазы бутонизации к цветению и последующему формированию бобов в период с 27 июня по 9 июля наблюдаются угасание активности клубеньков и изменение структуры симбиотического аппарата. Доля обесцвеченных клубеньков по вариантам составила 62,5...80,9%. Прекращение функционирования значительной части клубеньков (73,7...94,4%) у сорта Вельвет зафиксировано также через 7 недель после всходов. Несмотря на это полное отмирание клубеньков не произошло вплоть до фазы зелёных (плоских) бобов. Внесение N15-45 не ограничивает нодуляцию на корнях растений, способствует увеличению доли равномерно окрашенных розовых клубеньков на срезе и их физиологической активности на начальном этапе развития гороха. Вместе с тем, наблюдалось формирование полноценной ассимилирующей листовой поверхности, за счёт чего обеспечивался устойчивый приток продуктов фотосинтеза к центрам их запаса и активного использования, происходило накопление углеводного субстрата для дыхания и необходимого объёма энергии для функционирования ключевых механизмов в растительном организме, включая поддержание высокой активности бактериоидов и собственно процесса азотфиксации. По окончании фазы цветения происходило быстрое обесцвечивание бактериоидной ткани. Это связано с появлением в растениях более сильных аттрагирующих центров в виде созревающих семян и снижением оттока питательных веществ к корням.

Значительное влияние на соотношение автотрофного и симбиотрофного питания азотом, которое отражается на нодуляции и активности симбиотических взаимоотношений бобовых растений, оказывают эдафические условия и уровень плодородия почвы. Для этого на фоне инокуляции семян гороха симбиотическими ризобактериями изучена эффективность использования N-удобрения на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности (*опыт №5*).

Обеспеченность растений гороха азотом считается необходимым условием для формирования и последующего функционирования активного бобово-ризобиального симбиоза. Наиболее контрастные данные по содержанию минерального азота ($N_{\text{мин.}}$) в почве, служащего важнейшей характеристикой её плодородия, получены в фазу ветвления стебля: на слабоокультуренной почве содержание $N_{\text{мин.}}$ составляло от 12,3 до 20,9 мг/кг почвы, на среднеокультуренной почве – от 29,7 до 45,8 мг/кг почвы. Применение активных штаммов ризобий способствовало более интенсивному симбиотрофному питанию растений, в результате чего снижалось использование почвенных запасов азота.

При уборке гороха на зелёную массу продуктивность растений на среднеокультуренной почве в фазу ветвления стебля была в 1,1...1,3 раза выше, чем на слабоокультуренной почве, в фазу бутонизации – начало цветения – в 1,3...1,9 раза. Урожайность зелёной массы при этом составила 25,1...53,5 и 52,4...87,9 г/сосуд соответственно (табл. 4).

Таблица 4. Влияние доз N-удобрения и инокуляции семян симбиотическими ризобактериями на зелёную массу гороха по фазам развития, г/сосуд

Вариант	Ветвления стебля		Бутонизации – начало цветения	
	1*	2	1	2
N_0^{**}	16,7	25,1	49,4	52,4
$N_{0,05}$	20,9	35,4	52,8	69,7
$N_{0,10}$	21,1	40,0	58,6	73,4
$N_{0,15}$	28,3	44,1	59,8	78,8
$N_{0,20}$	34,9	45,5	65,1	84,0
$N_{0,25}$	38,9	53,5	65,7	87,9
Среднее	26,8	40,6	58,6	74,4
$НСР_{05}$	2,36	5,18	7,32	13,10

Примечание. * 1 – слабоокультуренная почва, 2 – среднеокультуренная почва. ** Дозы N-удобрения для таблиц 5-7 приведены в г N/кг абсолютно сухой почвы.

С повышением дозы N-удобрения с $N_{0,05}$ до $N_{0,25}$ увеличивается урожайность зелёной массы гороха в соответствии со степенью окультуренности почвы на 3,4...22,2 и 10,3...35,5 г/сосуд. Накопление N в вегетативной массе гороха также определялось степенью окультуренности почвы. В фазу бутонизации – начало цветения, более высокое содержание N (2,76...3,60%) отмечено на слабоокультуренной почве, за счёт большей отзывчивости растений на внесение возрастающих доз N-удобрения на менее плодородной дерново-подзолистой почве.

Урожайность зерна гороха на среднеокультуренной почве получена в 1,24-1,25 раза выше (6,91...8,64 г/сосуд), чем на слабоокультуренной почве (табл. 5). Прибавка урожая от инокуляции семян симбиотическими ризобактериями составила 22,3% на слабо- и 25,2% на среднеокультуренной почве. При внесении N-удобрения наблюдается повышение зерновой продуктивности посевного гороха независимо от степени окультуренности почвы. За счёт использования бактериального препарата на основе ризобий и внесения N-удобрения увеличивалось накопление N в зерне гороха на 0,22% (слабоокультуренная почва) и 0,18% (среднеокультуренная почва). Внесение N-удобрения способствовало увеличению выноса азота в 1,8-4,1 раза с надземной биомассой гороха в фазу стеблевания на слабо- и в 1,9-3,4 раза на

среднеокультуренной почве. В фазу бутонизации – начало цветения потребление N растениями гороха было ещё более активным, $K_{хоз.}$ увеличился до 0,83...0,88.

Таблица 5. Влияние доз N-удобрения и предпосевной инокуляции семян симбиотическими ризобактериями на массу зерна гороха, г/сосуд

Вариант	Слабоокультуренная почва		Среднее значение	Среднеокультуренная почва		Среднее значение
	A ₀	A ₁		A ₀	A ₁	
N ₀	5,87	7,18	6,53	6,60	8,26	7,43
N _{0,05}	6,67	7,92	7,30	7,01	8,77	7,89
N _{0,10}	4,29	5,44	4,87	6,63	8,30	7,47
N _{0,15}	4,68	5,91	5,30	7,06	8,85	7,96
N _{0,20}	5,21	7,19	6,20	7,37	9,22	8,30
N _{0,25}	6,38	8,29	7,34	6,76	8,46	7,61
Среднее	5,52	6,99		6,91	8,64	
НСР ₀₅	1,10			0,45		

Обработка семян симбиотическими ризобактериями оказала влияние на накопление и распределение потреблённого N между основной и побочной продукцией. Благодаря этому в зерне было дополнительно аккумулировано 38,0...65,5 мг N/сосуд.

Для оценки влияния удобрений на развитие симбиотического аппарата гороха учитывали общее количество активных клубеньков и их суммарную массу (табл. 6).

Таблица 6. Влияние N-удобрения и инокуляции семян активным штаммами ризобактерий на формирование симбиотического аппарата на корнях гороха

Почва	Дозы азота	Фаза развития					
		ветвления стебля		бутонизации – начало цветения		зелёных (плоских) бобов	
		шт./раст.	мг/раст.	шт./раст.	мг/раст.	шт./раст.	мг/раст.
Слабоокультуренная	N ₀	8	34	15	203	4	14
	N _{0,05}	-	-	43	125	5	18
	N _{0,10}	-	-	4	11	-	-
Среднеокультуренная	N ₀	32	154	36	746	-	-
	N _{0,05}	11	108	21	594	3	27
	N _{0,10}	13	103	68	382	5	76

На слабоокультуренной почве формирование симбиотического аппарата на корневой системе гороха в фазу ветвления стебля отмечено только без внесения N-удобрения. На среднеокультуренной почве формирование симбиотического аппарата происходило более активно при внесении N-удобрения – увеличивались общее количество клубеньков и их масса. С увеличением дозы N-удобрения свыше 0,05 г/кг на слабо- и 0,20 г/кг на среднеокультуренной почве процесс формирования симбиотического аппарата полностью подавляется. Происходит переход растений на автотрофное потребление азота почвы и связанное с ним последующее накопление N в вегетативной массе и зерне. Наибольшее накопление азота в клубеньках гороха наблюдается в фазу бутонизации – начало цветения. На слабоокультуренной почве оно варьировалось от 4,35 до 4,91%, на более окультуренной почве накопление N было выше – 5,32...5,93%.

Зернобобовые культуры вовлекают в биологический цикл более значительное количество азота атмосферы в смешанных агроценозах (Конончук и др., 2019). Их совместные посевы с зерновыми злаками, благодаря высокой технологичности, позволяют дифференцированно проводить уборку на зерносеуж и зерно (*опыты №3 и №4*). При уборке на зерносеуж горох посевной характеризовался меньшей пластичностью к климатическим и почвенным условиям, чем яровая пшеница. Без удобрений его урожайность по годам составила 5,3...6,6 т/га. Более высокая урожайность 7,0...12,8 т/га во все годы исследований получена в смешанных посевах (табл. 7).

Таблица 7. Урожайность зерносеужной массы одновидовых и смешанных агроценозов пшеницы и гороха при влажности 55%, т/га (среднее за 3 года)

Состав агроценоза (фактор А)	Дозы азота (фактор В)			Среднее по А
	N0	N30	N60	
Пшеница 100%	5,9	6,5	7,6	6,7
Пшеница 75% + горох 25%	7,0	7,6	8,4	7,6
Пшеница 50% + горох 50%	8,3	9,6	10,8	9,6
Пшеница 25% + горох 75%	9,2	10,8	12,1	10,7
Горох 100%	5,3	5,9	7,1	6,1
Среднее по В	7,1	8,1	9,2	
НСР ₀₅ для главных эффектов	0,3			2,3
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А			4,0
	В			0,8

За счёт увеличения доли гороха в высеваемой смеси с 25 до 50 и 75% возрастала урожайность зерносеужа на 13,4...59,7%. Более высокая урожайность зерносеужа (8,3...10,8 и 9,2...12,1 т/га) получена при равном соотношении компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха в смеси (пшеница 25% + горох 75%). Повышение доли гороха в составе смешанных агроценозов, сопровождалось увеличением их отзывчивости на дозы N-удобрения: с 0,6 до 1,3 и 1,6 т/га при внесении N30, и с 1,4 до 2,5 и 2,9 т/га при внесении N60. Полученная урожайность смеси существенно превышала продуктивность пшеницы (на 0,6...1,7 т/га) и гороха (на 0,6...1,8 т/га) в одновидовых агроценозах. Максимальная урожайность зерносеужа (12,1 т/га) формируется при внесении N60 в смешанном посеве с превалированием гороха (пшеница 25% + горох 75%).

Семенная продуктивность смесей возрастала на 0,30-0,92 т/га при увеличении в их составе доли яровой пшеницы. Максимальные урожайность зерна (3,42 т/га) и окупаемость 1 кг азота удобрения прибавкой (10,8 кг/кг) получены при внесении N60 в агроценозе пшеница 75% + горох 25%. Зерновая продуктивность яровой пшеницы в одновидовом посеве имела прямую линейную зависимость от доз N-удобрения ($R^2 = 0,99$; $y = 0,298 \times X + 2,143$), обратная линейная зависимость ($R^2 = 0,85$; $y = -0,198 \times X + 2,637$) была характерна для посевного гороха. Она проявлялась посредством соответствующего изменения урожайности компонентов и в смешанных агроценозах. Более устойчивое доленое соотношение зерна пшеницы и гороха в урожае наблюдалось в смешанном посеве пшеница 50% + горох 50%. За счёт менее напряженных конкурентных взаимоотношений компонентов в этой рецептуре высеваемой смеси, относительно потребления азота и ряда сопутствующих условий,

в получаемом урожае преобладало зерно гороха (+12,8...16,8%). В смесях пшеница 75% + горох 25% и пшеница 25% + горох 75%, наблюдали увеличение конкурентоспособности со стороны субмиссивного компонента в посеве.

Вика озимая по своим биологическим и хозяйственным свойствам служит лучшим и, по сути, единственным компонентом для смешанных посевов с озимыми зерновыми культурами (табл. 8).

Таблица 8. Урожайность зерносенажной массы одновидовых и смешанных озимых агроценозов тритикале и вики при влажности 55%, т/га (среднее за 3 года)

Состав агроценоза (фактор А)	Дозы азота (фактор В)				Среднее по А
	N ₀	N ₃₀	N ₄₅	N ₆₀	
Тритикале 100%	6,0	8,5	10,3	11,2	9,0
Тритикале 75% + вика 25%	11,6	13,2	15,0	16,1	14,0
Тритикале 50% + вика 50%	12,7	13,9	16,4	15,9	14,7
Тритикале 25% + вика 75%	12,9	13,8	15,8	12,8	13,9
Вика 100%	11,0	11,8	10,7	9,4	10,7
Среднее по В	10,8	12,2	13,6	13,1	
НСР ₀₅ для главных эффектов	0,6				3,8
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А				7,6
	В				1,4

Без азотной подкормки большей пластичностью к условиям произрастания и урожайностью зерносенажа в монопосеве (10,5...11,7 т/га) характеризуется озимая вика. Существенных различий между смешанными агроценозами в урожайности зерносенажа, благодаря реализации принципа комплементарности во взаимодействии компонентов, не отмечено. В свою очередь, смешанные посевы любого из изучаемых компонентных составов превосходили на 4,9...5,7 т/га по урожайности зерносенажа одновидовой посев тритикале. Подкормка N-удобрением способствовала увеличению продуктивности обоих компонентов в составе одновидовых и смешанных агроценозов. Отзывчивость злакового компонента (тритикале) на применение N-удобрения в подкормку была более высокой. В одновидовых посевах отзывчивость культур на внесение N₃₀₋₆₀ составила 2,5...5,2 т/га (тритикале) и -1,5...+0,8 т/га (вика). При увеличении доз N-удобрения в смешанных агроценозах прибавка урожайности зерносенажа составила, т/га: 0,9...1,6 (N₃₀); 2,9...3,7 (N₄₅); 3,2...4,6 (N₆₀).

Увеличение доли вики в смешанном посеве с 25 до 50 и до 75%, приводит к снижению их отзывчивости на дозы N-удобрения. Это обусловлено угнетением симбиотического аппарата озимой вики, не адаптированного к функционированию в условиях обеспеченности почвы N_{мин.}, а также возросшей конкуренцией со стороны тритикале за использование азота почвы и удобрения, которая наблюдается при снижении её доли в составе посева. В посеве с преобладанием вики (тритикале 25% + вика 75%) растения изучаемого сорта озимой тритикале (Ставропольский 5) в полной мере не справляются с ролью поддерживающего компонента, за счёт которого должна сохраняться вертикальная архитектура травостоя.

Максимальная урожайность зерносенажа (16,4 т/га) получена в агроценозе с равным долевым участием компонентов в составе высеваемой смеси (тритикале 50% + вика 50%) и внесении N₄₅. Смешанный агроценоз, формируемый при посеве указанным составом, характеризуется выстроенной и последовательной отзывчивостью на уровни

азотного питания из-за морфо-фенологической совместимости видов, накопления в тканях растений большего количества ценных в питательном отношении веществ, удлинённых сроков уборочной пригодности для заготовки объёмистых кормов.

Смешанные агроценозы озимой вики также могут быть использованы для обеспечения отрасли животноводства фуражным зерном. Степень и характер отзывчивости одновидовых агроценозов на внесение N-удобрения определяла видовая принадлежность культур. Высокой положительной отзывчивостью (+0,25...+0,42 т/га) на внесение N-удобрения, в рамках применяемого диапазона доз, характеризуется только одновидовой агроценоз тритикале. В посевах озимой вики наблюдалось сильное полегание растений за счёт увеличения числа побегов, их длины и облиственности, что негативно сказалось на процессах опыления и формирования бобов, семенной продуктивности растений. Поэтому наблюдали прямую линейную зависимость урожайности зерна озимой тритикале от доз N-удобрения ($R^2 = 0,98$; $y = 0,357 \times X + 2,004$) и обратную линейную ($R^2 = 0,89$; $y = -0,198 \times X + 1,319$) – для озимой вики.

При повышении в высеваемой смеси доли тритикале с 25 до 50 и 75% происходит увеличение урожайности зерна на 1,01; 2,06 и 2,60 т/га. Смешанный посев тритикале 75% + вика 25% превосходил по урожайности зерна одновидовые агроценозы тритикале в два из трёх лет и вики – во все годы проведения исследований. Более высокая окупаемость 1 кг N (24,4 кг/кг) получена при внесении N30 в агроценозе тритикале 50% + вика 50%. Долевое соотношение зерна озимой тритикале и озимой вики в урожае только отчасти отражало изначальную рецептуру высеваемой смеси. Сохранялась общая для обоих компонентов тенденция, связанная с повышением (понижением) количества зерна в урожае при увеличении (снижении) его доли в посевной норме. Высокой зерновой продуктивностью в любой смеси характеризовался злаковый компонент. Даже в случае преобладания в составе посевной нормы семян вики (тритикале 25% + вика 75%) наблюдалось превышающее в 1,7...3,5 раза количество зерна тритикале в урожае, что обусловлено потенциально низкой семенной продуктивностью бобовой культуры. При внесении N30-60 также отмечено снижение на 6,7...15,3% количества семян вики в урожае смешанных агроценозов.

Глава 4. Биохимический состав и технологические показатели качества урожая зерновых культур в одновидовых и смешанных агроценозах

Оптимизация минерального питания зерновых культур осуществляется при сбалансированном применении минеральных и бактериальных удобрений (Алферов и др., 2016), совершенствовании научных основ их возделывания в смешанных агроценозах (Коконов, 2018). За счёт этого происходят наиболее полное использование биологического потенциала растений и оптимизация биохимического состава их урожая.

Тесная зависимость отмечена между величиной фиксируемого горохом азота и накоплением протеина в растениях (табл. 9). Только на сорте Вельвет зафиксирован синергический эффект (+28,3 г/кг) по накоплению сырого протеина в зерне гороха от инокуляции посевного материала симбиотическими ризобактериями и внесения N75. В результате получено зерно, соответствующее 2 классу качества по ГОСТ Р 54630-2011 «Горох кормовой. Технические условия». На обоих сортах гороха изначальное наблюдается увеличение содержания сырого протеина при внесении возрастающих доз N-удобрения.

Максимальное содержание сырого протеина в зерне сорта Агроинтел (225,6-226,6 г/кг) достигнуто при внесении N30, у сорта Вельвет (238,0 г/кг) при внесении N75.

Таблица 9. Содержание сырого протеина в зерне сортов гороха, г/кг сухого вещества (среднее за 3 года)

Дозы азота (В)	Агроинтел		Среднее по В	Вельвет		Среднее по В
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N0	202,0	217,7	209,8	191,7	196,3	194,0
N30	226,6	225,6	226,1	212,9	203,0	208,0
N45	216,2	219,5	217,8	214,7	211,8	213,2
N60	217,7	210,5	214,1	221,4	223,6	222,5
N75	210,1	212,9	211,5	209,8	238,0	223,9
N90	210,8	208,0	209,4	210,9	221,3	216,1
N105	201,2	207,1	204,2	198,4	217,2	207,8
N120	193,3	190,2	191,7	185,4	185,6	185,5
Среднее по А	209,7	211,4		205,6	212,1	
НСР ₀₅ для главных эффектов	16,3		10,2	7,5		8,3
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А		26,2	А		21,2
	В		14,4	В		11,7

В связи с увеличением концентрации N-содержащих веществ в растениях, и особенно в зерне гороха, наблюдаются и другие изменения в составе получаемого урожая, которые отражаются на итоговой питательности корма. Только при инокуляции ризобактериями внесение N-удобрения способствовало снижению содержания сырой клетчатки в зерне гороха. Без инокуляции наблюдалось увеличение содержания сырой клетчатки на 5,7...6,3 г/кг при внесении N75-120. Существенное увеличение содержания сырой золы в зерне гороха сорта Вельвет (+0,5...2,2 г/кг) получено за счёт использования N-удобрения на фоне инокуляции. Эти изменения являются фиксируемым результатом усиления фотосинтетической и ассимилирующей активности растений, индукции метаболических процессов синтеза при поступлении азота с удобрением и в процессе симбиотической азотфиксации бобовой культуры.

Зерно гороха сорта Агроинтел в большинстве вариантов опыта соответствовало норме 2 класса качества по ГОСТ Р 54630-2011. По накоплению обменной энергии зерно гороха сорта Вельвет соответствовало норме 1 класса качества. Применение штаммов симбиотических ризобактерий и N-удобрения способствовало увеличению в зерне гороха сорта Вельвет обменной энергии в среднем на 0,3 МДж/кг и содержания кормовых единиц до 1,62...1,85 ед. Выявленное различие указывает на перспективность использования сорта Вельвет для кормовых целей.

Зерно обоих сортов гороха соответствовало I классу по крупности, 2 сорту по выходу целого гороха и 1 подтипу I типа по цвету и остальным требованиям ГОСТа 6201-68 «Горох шлифованный. Технические условия», что позволяет рекомендовать его в качестве продовольственного для переработки в крупу. Инокуляция семян ризобиями способствовала увеличению выхода шлифованного гороха на 4-5% (Агроинтел) и 3-7% (Вельвет). Применение N-удобрения под оба сорта увеличивало выход (+2,0...5,0%) и выравненность (+2,7...7,0%) цельнозерновой крупы, которая имела хорошие кулинарные достоинства.

Для обеспечения полноценного кормления животных объёмистые корма должны иметь среднюю энергетическую питательность не менее 10,0 МДж (0,80 корм. ед.) в 1 кг сухого вещества, при содержании свыше 140 г/кг сырого протеина (табл. 10).

Таблица 10. Содержание сырого протеина (г) и обменной энергии (МДж) в зерносенаже яровых зерновых культур, кг сухого вещества (среднее за 3 года)

Состав агроценоза (фактор А)	Сырой протеин			Среднее по А	Обменная энергия			Среднее по А
	N0	N30	N60		N0	N30	N60	
Пшеница 100%	76,8	82,0	91,5	83,4	8,0	8,1	8,3	8,1
Пшеница 75%+горох 25%	89,8	98,2	104,5	97,5	8,4	8,6	8,7	8,5
Пшеница 50%+горох 50%	107,2	114,2	112,8	111,4	8,7	8,8	8,8	8,8
Пшеница 25%+горох 75%	139,3	147,9	148,8	145,3	9,4	9,6	9,5	9,5
Горох 100%	178,2	179,7	182,3	180,1	10,3	10,3	10,3	10,3
Среднее по В	118,3	124,4	128,0		9,0	9,1	9,1	
НСР ₀₅ для главных эффектов	9,5			24,0	0,2			0,6
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А	41,6			1,0			
	В	21,3			0,5			

Зерносенаж, полученный в смешанных агроценозах, значительно отличается по биохимическому составу и питательности от корма в одновидовом посеве пшеницы. Более высокое содержание сырого протеина в корме (139,3-148,8 г/кг) получено в смешанном агроценозе пшеница 25% + горох 75%. Корм в этом варианте соответствует 1 классу качества (не менее 120 г/кг корма). От использования N-удобрения количество сырого протеина и обменной энергии в корме смешанных посевов увеличилось на 5,2...14,7 г/кг и 0,1...0,3 МДж/кг. По абсолютному большинству нормируемых показателей (сырой протеин, сырая зола, количество обменной энергии) получаемый зерносенаж соответствовал 1 классу качества, согласно ГОСТ Р 58145-2018 «Зерносенаж. Технические условия».

При возделывании смешанных агроценозов на зерно, разница в составе зернового вороха обусловлена только видовыми различиями культур. За счёт включения в состав агроценозов яровой пшеницы посевного гороха, происходит увеличение общей питательной ценности зернового вороха и отдельно злакового компонента. Это указывает на оптимизацию минерального и, прежде всего, азотного питания яровой пшеницы. Так, за счёт включения 25% гороха в рецептуру высеваемой смеси наблюдалось повышение содержания сырого протеина в зерне пшеницы на 3,6...6,2 г/кг корма. Последующее увеличение доли гороха в смесях соответственно до 50 и 75%, обеспечило дополнительный сбор сырого протеина в среднем на 14,3 и 8,1 г с каждым кг полученного зернофуража. При внесении азотного удобрения, а также увеличении доли гороха в смеси, наблюдалось повышение содержания сырого протеина в его зерне на 10,4...17,3 и 11,6...12,3 г/кг соответственно.

При возделывании озимой тритикале и озимой вики в смешанных агроценозах происходит определённое сглаживание различий в биохимическом составе урожая (табл. 11). Более высокое, соответствующее 1 классу качества (не менее 120 г/кг корма), содержание сырого протеина (144,0...164,0 г/кг корма) в зерносенажной массе смешанных агроценозов было характерно для посева тритикале 25% + вика 75%. По содержанию обменной энергии в зерносенаже смешанные агроценозы на 0,3...1,0 МДж/кг превосходили одновидовой посев

тритикале и на 0,3...1,0 МДж/кг уступали посеву вики. При использовании N-удобрения содержание сырого протеина в зерносенаже в среднем по опыту увеличилось на +8,0...20,6 г/кг, обменной энергии на 0,2...0,5 МДж/кг корма.

Таблица 11. Содержание сырого протеина (г) и обменной энергии (МДж) в зерносенаже озимых зерновых культур, кг сухого вещества (среднее за 3 года)

Состав агроценоза (фактор А)	Сырой протеин				Среднее по А	Обменная энергия				Среднее по А
	N0	N30	N45	N60		N0	N30	N45	N60	
Тритикале 100%	97,1	108,5	113,7	120,1	109,9	8,4	8,6	8,7	8,9	8,7
Трипикале 75%+вика 25%	111,8	120,1	130,6	137,0	124,9	8,7	8,9	9,1	9,3	9,0
Трипикале 50%+вика 50%	132,9	139,7	148,0	155,0	143,9	9,1	9,3	9,5	9,7	9,4
Трипикале 25%+вика 75%	144,0	153,0	157,8	164,0	154,7	9,4	9,7	9,7	9,9	9,7
Вика 100%	162,2	166,6	171,3	175,1	168,8	9,9	9,9	10,0	10,1	10,0
Среднее по В	129,6	137,6	144,3	150,2		9,1	9,3	9,4	9,6	
НСР ₀₅ для главных эффектов	2,6				2,1	0,1				0,3
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А	24,3				0,6				
	В	5,9				0,1				

При внесении азотной подкормки наблюдалось изменение биохимического состава зерна тритикале и вики в одновидовых и смешанных посевах. При увеличении доли вики в составе смешанных агроценозов (до 25, 50 и 75%) происходило планомерное увеличение содержания сырого протеина в зерне озимой тритикале на 11,1 г/кг; 20,3 г/кг и 25,9 г/кг соответственно. Более высокое содержание сырого протеина в зерне злака (150,6...164,4 г/кг), которое соответствует норме для 1 класса качества (более 130 г/кг), получили при превазировании вики (тритикале 25% + вика 75%) в составе высеваемой смеси. При внесении азотного удобрения (N30-60) зафиксировано устойчивое повышение содержания сырого протеина в зерне озимой тритикале на 8,9...20,6 г/кг. Комбинирование этих приёмов позволит произвести частичную, а в отдельных случаях, даже полную замену минерального азота биологическим, снизить дозировку N-удобрений для проведения ранневесенней подкормки, получать зерно с необходимым уровнем содержания сырого протеина и обменной энергии.

Зерно озимой вики, полученное в смешанных агроценозах с озимой тритикале, соответствует норме 1 класса качества, так как характеризуется более высоким содержанием сырого протеина (254,4...278,2 г/кг) и обменной энергии (13,1...13,4 МДж/кг). Это позволяет скармливать полученные зерносмеси сельскохозяйственным животным и птице без предварительного разделения на компоненты.

Глава 5. Накопление свежего органического вещества и биологического азота в почве в одновидовых и смешанных агроценозах зернобобовых культур

Клубеньки на корневой системе зернобобовых культур обычно составляют менее 5% от их общей биомассы (Трепачев, 1999), несмотря на это они могут обеспечивать поглощение более 100 кг N/га (табл. 12). При инокуляции семян симбиотическими ризобактериями увеличилась общая продуктивность растений обоих сортов гороха. Поступление в почву органического вещества в составе побочной продукции и корневой массы (ПКО) у сорта Агроинтел возросло на 0,22 т/га, у сорта Вельвет – на 1,13 т/га. При внесении N-удобрения поступление органического вещества ПКО увеличилось на 0,36...1,65 т/га (Агроинтел) и

0,38...0,83 т/га (Вельвет). В последнем случае, количество поступающего в почву с ПКО органической биомассы увеличилось только при дозах N30 и N45. Эффект от совместного использования биопрепарата с симбиотическими ризобактериями и N-удобрения составил +0,43...1,70 т/га органического вещества.

Таблица 12. Накопление N и C в соломе и ПКО сортов гороха при возделывании на зерно в одновидовом агроценозе (среднее за 3 года)

Сорт	Без инокуляции								При инокуляции							
	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120
Поступление в почву свежего ОВ после распашки, т/га																
Агроинтел	4,71	5,07	5,86	5,79	5,57	5,39	6,36	5,61	5,18	5,32	5,65	6,33	5,83	5,61	6,58	5,68
Вельвет	6,03	6,86	6,41	5,96	5,78	5,33	4,78	4,53	7,16	7,73	7,14	6,72	6,46	5,95	4,86	3,87
Накопление общего N, кг/га																
Агроинтел	75,2	81,1	91,9	94,1	88,4	86,1	103,8	88,0	81,3	85,6	89,1	103,0	95,0	89,7	109,4	92,0
Вельвет	96,6	111,4	101,9	96,2	95,5	86,6	78,6	72,0	115,5	128,4	116,1	108,8	105,0	97,3	79,4	62,9
Накопление фиксированного N, кг/га																
Агроинтел	42,9	46,2	52,4	53,6	50,4	49,1	59,2	50,2	46,3	48,8	50,8	58,7	54,2	51,1	62,4	52,4
Вельвет	55,1	63,5	58,1	54,8	54,4	49,3	44,8	41,1	65,8	73,1	66,2	62,0	59,9	55,4	45,3	35,9
Накопление органического C, кг/га																
Агроинтел	2156	2320	2682	2649	2551	2468	2913	2567	2370	2436	2584	2896	2666	2567	3011	2599
Вельвет	2759	3137	2936	2725	2645	2439	2187	2072	3274	3537	3266	3076	2956	2723	2226	1772
Дополнительный объём C-CO ₂ поступающий в почву при азотфиксации, кг/га																
Агроинтел	-	165	527	494	395	313	757	411	214	280	428	741	510	411	856	443
Вельвет	-	378	176	-	-	-	-	-	515	778	507	317	196	-	-	-

При внесении N-удобрения наблюдалось увеличение накопления общего N в урожае гороха сорта Агроинтел на 5,0...27,5% за счёт роста продуктивности растений и содержания в них азота. При инокуляции семян ризобактериями содержание N в урожае зерна и соломы увеличилось до 92,6...120,0 кг/га. При этом в составе ПКО в почву поступило порядка 50,7...64,4 кг N/га. Существенное увеличение накопления общего N в урожае (+13,2...23,1%) сорта Вельвет получено при внесении N30. При инокуляции ризобиями накопление N в зерне и соломе этого сорта составило 64,6...138,9 кг/га. В составе послеуборочных остатков в почву поступило 37,9...75,7 кг N/га.

Доля симбиотически фиксированного азота в составе соломы и ПКО от общего его количества в биомассе гороха составила 56,2...60,8% (Агроинтел) и 55,4...61,4% (Вельвет). В числовом выражении прибавка по этому показателю от инокуляции семян биопрепаратом на сорте Агроинтел составила 2,0...5,1 кг/га, на сорте Вельвет – 0,5...1,7 кг/га. За счёт применения N-удобрения накопление фиксированного азота в соломе и ПКО увеличилось на 2,5...16,3 и 3,0...8,4 кг/га соответственно. Повышение дозы до N45 кг/га приводило к ингибированию развития симбиотического аппарата на корневой системе гороха у сорта Вельвет.

При инокуляции семян симбиотическими ризобактериями увеличилась азотфиксирующая способность у обоих сортов гороха. Потребление дополнительного количества C-CO₂ на сорте Агроинтел возросло до 374...1145 кг/га, обеспечив сток в почву 280...856 кг C-CO₂/га. Чистый эффект от инокуляции семян этого сорта гороха составил 213,9 кг C-CO₂/га. Благодаря инокуляции семян сорта Вельвет и внесению N30-75, количество потребляемого дополнительно C-CO₂ увеличилось до 263...1040 кг/га,

обеспечивая сток в почву 196...778 кг С-СО₂/га. Чистый эффект от инокуляции семян ризобактериями составил порядка 515 кг С-СО₂/га. При этом на каждый мг фиксируемого ризобиями азота в среднем дополнительно усваивалось 6,3 мг углерода.

При возделывании гороха в смешанных агроценозах количество пожнивно-корневых остатков существенно выше, чем урожайность отчуждаемой хозяйственно-востребованной части урожая (табл. 13).

Таблица 13. Накопление N и C в растительных остатках при возделывании гороха на зерносенаж и зерно в одновидовом и смешанных агроценозах (среднее за 3 года)

Продукция	Пшеница 75% + горох 25%			Пшеница 50% + горох 50%			Пшеница 25% + горох 75%			Горох 100%		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Поступление в почву свежего ОВ после распашки, т/га												
Зерносенаж	3,33	3,67	4,05	4,04	4,67	5,24	4,44	5,22	5,86	2,57	2,87	3,41
Зерно	5,49	5,94	6,77	6,02	6,45	6,55	5,35	5,40	4,64	5,98	5,85	4,99
Накопление общего N, кг/га												
Зерносенаж	43,5	50,1	59,7	60,7	72,2	85,4	75,6	90,3	104,7	48,7	54,9	66,4
Зерно	58,0	62,2	69,9	76,6	82,4	85,2	76,5	72,8	62,6	103,0	97,9	84,4
Накопление фиксированного N, кг/га												
Зерносенаж	10,3	11,4	12,8	24,9	29,0	33,1	41,1	48,7	55,6	27,8	31,3	37,9
Зерно	16,9	18,1	18,4	36,2	40,5	41,4	42,0	39,4	33,8	58,7	55,8	48,1
Накопление органического С, кг/га												
Зерносенаж	1538	1697	1872	1899	2196	2465	2128	2502	2807	1252	1401	1666
Зерно	2543	2745	3127	2846	3052	3096	2556	2581	2215	2918	2853	2434
Дополнительный объём С-СО ₂ , поступающий в почву при азотфиксации, кг/га												
Зерносенаж	252	272	208	612	771	801	842	1077	1143	589	674	831
Зерно	396	285	451	699	592	420	409	120	-	771	393	-

При уборке смешанных посевов на зерносенаж с ПКО бобовой культуры в почву поступало от 15,8...19,7 кг/га (пшеница 75% + горох 25%) до 63,3...85,5 кг/га (пшеница 25% + горох 75%) общего азота. Горохо-пшеничные смеси накапливали от 45 до 130 кг/га общего азота в вегетативной массе и от 44 до 105 кг N/га в пожнивно-корневых остатках, в том числе 10...56 кг/га симбиотического азота. Смешанный посев пшеница 25% + горох 75% на 13,3...17,7 кг/га превосходил одновидовой посев гороха по количеству фиксированного азота воздуха в составе ПКО. При равном сочетании компонентов (пшеница 50% + горох 50%) и преобладании гороха (пшеница 25% + горох 75%) в составе высеваемой смеси зафиксировано поступление свыше 2 тонн С на гектар. В смешанных посевах наблюдается сток углерода в почву, так как количество С, поступившее с ПКО, на 143...354 кг/га превышает величину С, отчуждаемого с урожаем зерносенажа. С увеличением доли гороха в высеваемой смеси свыше 50% наблюдается более высокое содержание азота (> 2%) в составе зерносенажной массы и ПКО, за счёт чего достигается более узкое соотношение С : N = 27...28 в поступающем в почву ОВ. Дополнительный объём С-СО₂, секвестрируемый горохом при усилении азотфиксации, за счёт возделывания в составе смешанных агроценозов, составил 208...1143 кг/га. При внесении азотного удобрения в смешанных агроценозах пшеница 50% + горох 50%, пшеница 25% + горох 75%, наблюдали увеличение потребляемых объёмов С-СО₂ на 159...302 кг/га и последующий их сток в почву.

При уборке смешанных посевов на зерно, с ПКО и соломой гороха в почву поступило от 26,1...28,3 до 52,0...64,6 кг/га общего азота, том в числе 16,9...42,0 кг/га биологического, который будет использоваться следующими культурами севооборота. Совокупный вклад гороха в биологический и хозяйственный вынос N был в 1,1...1,6 раза выше в смешанном агроценозе с преобладанием злака (пшеница 75% + горох 25%). Поступающее в почву после смешанных посевов органическое вещество растительных остатков характеризуется более широким соотношением C : N = 33,4...44,7 за счёт заделки в почву не только корневой системы и поверхностных пожнивных остатков, но и соломы, прежде всего злакового компонента. Благодаря включению гороха в состав смешанных агроценозов с яровой пшеницей наблюдается увеличение N₂-фиксирующей способности, за счёт которой дополнительно ассимилировалось из воздуха 120...771 кг C-CO₂/га. Использование азотного удобрения не способствовало увеличению потребляемых объёмов C-CO₂ при уборке смесей на зерно. На каждый мг фиксируемого ризобиями N в одновидовых посевах гороха дополнительно усваивалось 4,8...6,2 мг C, в смешанных агроценозах – 10,4...17,0 мг C.

Вика мохнатая обладает более высокой потенциальной способностью к эффективному симбиозу с клубеньковыми бактериями и продуктивностью растений, по сравнению с другими видами вик. Количество ПКО озимой вики в общем объёме растительных остатков, поступающих в почву, прежде всего, определялось сроком уборки урожая и составом высеваемой смеси (табл. 14).

Таблица 14. Накопление N и C в растительных остатках при возделывании озимой вики на зерносеяж и зерно в одновидовом и смешанных агроценозах (среднее за 3 года)

Продукция	трикале 75%+ вика 25%				трикале 50%+ вика 50%				трикале 25%+ вика 75%				вика 100%			
	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60
Поступление в почву свежего ОВ после распашки, т/га																
Зерносеяж	5,59	6,37	7,23	7,80	6,13	6,74	7,91	7,68	6,25	6,70	7,65	6,20	5,30	5,71	5,16	4,56
Зерно	10,71	11,29	12,46	11,95	9,83	11,13	11,16	10,45	9,42	8,94	8,58	8,17	7,66	6,94	6,81	6,54
Накопление общего N, кг/га																
Зерносеяж	83,9	103,7	122,6	138,6	100,0	116,8	142,2	143,3	110,1	123,1	145,3	121,3	100,4	111,1	103,2	93,2
Зерно	188,3	187,4	202,7	190,9	182,5	195,2	185,9	167,4	198,7	183,8	165,8	151,7	128,6	117,2	116,4	112,5
Накопление фиксированного N, кг/га																
Зерносеяж	17,2	20,2	23,5	25,9	37,7	42,6	51,4	51,1	57,7	63,5	74,6	61,8	57,2	63,3	58,8	53,1
Зерно	27,6	26,6	26,0	25,3	50,4	48,7	46,6	45,1	73,8	71,2	68,3	66,4	73,3	66,8	66,3	64,1
Накопление органического C, кг/га																
Зерносеяж	2399	2735	3101	3347	2604	2865	3362	3265	2629	2819	3222	2612	2210	2381	2152	1900
Зерно	4892	5142	5668	5431	4529	5106	5105	4766	4390	4156	3967	3763	3740	3388	3325	3190
Дополнительный объём C-CO ₂ , поступающий в почву при азотфиксации, кг/га																
Зерносеяж	1081	883	852	899	1286	1013	1113	818	1311	967	973	165	892	529	-	-
Зерно	2565	2394	2519	2041	2203	2358	1956	1376	2063	1408	818	373	1413	640	176	-

При уборке смешанных агроценозов на зерносеяж с 5,59...7,91 т/га свежего органического вещества, в составе растительных остатков, в почву поступало 83,9...145,3 кг/га общего азота. Из этого количества, в соответствии с составом агроценоза, на долю озимой вики приходилось 31,6...80,6%. В биомассе озимой вики накапливалось от 60,3 до 261,3 кг N/га в смешанном посеве и от 212,0 до 252,7 кг N/га в одновидовом агроценозе. С ПКО в почву поступает от 26,5...39,9 кг/га (трикале

75% + вика 25%) до 88,7...114,8 кг/га (тритикале 25% + вика 75%) азота, в том числе 17,2...74,6 кг/га симбиотического. При использовании N-удобрения наблюдали повышение урожайности зерносенажной массы, накопление общего и биологического азота в общем урожае и биомассе зернобобового компонента. Незначительная рецессия показателей отмечена при использовании N60 в посевах с равным соотношением компонентов или преобладании вики. За счёт высокой урожайности смешанных агроценозов в почву поступало более 2,5 тыс. кг С на гектар, благодаря чему сток возрастает на 13...79 кг С/га. С увеличением доли озимой вики в высеваемой смеси отмечено более высокое содержание азота в зерносенаже и ПКО, что способствует поступлению в почву свежей растительной биомассы с узким соотношением $C : N = 22...24$.

При уборке смешанных посевов на зерно, с ПКО и соломой в почву поступает 151,7...202,7 кг/га общего азота. Доля озимой вики в этом количестве составляет 20...67%. Для использования последующими культурами будет доступно 6,3...18,4 кг/га биологического азота, накопленного бобовым предшественником. Максимальное количество С (5,67 и 5,43 т/га) поступает в почву в посевах тритикале 75% + вика 25% и внесении N45 и N60. В смешанных агроценозах объёмы секвестрируемого углерода в почву с соломой и ПКО в 3,7-6,5 раза превышают отчуждаемое количество с зерном. После уборки смешанных посевов озимой вики в почву поступает свежее органическое вещество, которое отличается более узким соотношением $C : N = 22...28$, прежде всего за счёт накопления большего количества общего азота в составе соломы и ПКО.

При включении озимой вики в состав смешанных агроценозов с тритикале, наблюдаются активное накопление биологического азота в биомассе и зерне растений, усиление ассимиляции $C-CO_2$. Благодаря этому из воздуха растения дополнительно использовали 165...1286 кг $C-CO_2$ /га при уборке на зерносенаж и 373...2565 кг $C-CO_2$ /га при возделывании на зерно. Применение N-удобрения снижало азотфиксирующую способность озимой вики, за счёт чего наблюдалось уменьшение количества потребляемых объёмов $C-CO_2$ и последующий его сток в почву. Наиболее чётко это прослеживается в смешанном агроценозе с доминированием бобового компонента (тритикале 25% + вика 75%). На каждый мг фиксированного азота, в среднем по опыту, дополнительно усваивалось 23,1...42,8 мг углерода.

Глава 6. Эмиссия закиси азота в агроценозах зерновых бобовых и злаковых культур

Пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур являются весомым источником антропогенных выбросов закиси азота в атмосферу. Их вклад в общий поток N_2O из сельскохозяйственных почв на территории России по расчётам (Романовская, 2003) может в 4-5 раз превышать вклад минеральных удобрений. Продукция $N-N_2O$ из почвы зависит от вида и количества растительных остатков, способа их заделки в почву. Объёмы суммарных антропогенных выбросов N_2O (прямых и косвенных) из почвы при возделывании одновидовых посевов гороха представлены в таблице 15. Низкие объёмы выбросов закиси азота в посевах сортов Агроинтел (1,68 кг N_2O /га) и Вельвет (2,02 кг N_2O /га) получены без инокуляции семян ризобактериями и N-удобрения. В среднем по сортам доля косвенных выбросов в суммарном объёме эмиссии $N-N_2O$, независимо от

используемых удобрений, составляла 14,1...17,0%. При инокуляции семян симбиотическими ризобактериями наблюдалась тенденция к увеличению продуцируемого количества N-N₂O в посевах гороха на 0,10...0,30 кг N-N₂O/год.

Таблица 15. Суммарная эмиссия N₂O из почвы при использовании азотного удобрения в одновидовых посевах гороха (среднее за 3 года)

Показатель	Без инокуляции								При инокуляции							
	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120
N-N ₂ O _(N поступл.) , кг N-N ₂ O/год	<u>1,44</u> 1,74	<u>1,93</u> 2,35	<u>2,29</u> 2,42	<u>2,52</u> 2,55	<u>2,65</u> 2,75	<u>2,82</u> 2,83	<u>3,27</u> 2,93	<u>3,26</u> 3,04	<u>1,52</u> 1,99	<u>2,00</u> 2,58	<u>2,52</u> 2,62	<u>2,64</u> 2,72	<u>2,74</u> 2,88	<u>2,87</u> 2,98	<u>3,35</u> 2,94	<u>3,32</u> 2,92
N-N ₂ O _(АТД) , кг N-N ₂ O/год	0	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12
N-N ₂ O _(L) , кг N-N ₂ O/год	<u>0,24</u> 0,29	<u>0,32</u> 0,39	<u>0,38</u> 0,40	<u>0,41</u> 0,42	<u>0,44</u> 0,45	<u>0,46</u> 0,46	<u>0,54</u> 0,48	<u>0,54</u> 0,50	<u>0,25</u> 0,33	<u>0,33</u> 0,42	<u>0,37</u> 0,43	<u>0,43</u> 0,45	<u>0,45</u> 0,47	<u>0,47</u> 0,49	<u>0,55</u> 0,48	<u>0,54</u> 0,48
Суммарная эмиссия N-N ₂ O, кг N-N ₂ O/га	<u>1,68</u> 2,02	<u>2,28</u> 2,76	<u>2,71</u> 2,87	<u>3,00</u> 3,03	<u>3,16</u> 3,27	<u>3,38</u> 3,38	<u>3,91</u> 3,51	<u>3,92</u> 3,66	<u>1,78</u> 2,32	<u>2,35</u> 3,03	<u>2,66</u> 3,09	<u>3,14</u> 3,23	<u>3,27</u> 3,43	<u>3,43</u> 3,56	<u>4,00</u> 3,53	<u>3,98</u> 3,52

Примечание: В числителе представлены данные по сорту Агроинтел, в знаменателе – по сорту Вельвет.

Суммарная эмиссия N-N₂O, при использовании возрастающих доз N-удобрения по сортам возросла на 0,60...2,24 кг/га (Агроинтел) и 0,58...2,20 кг/га (Вельвет). Различие по продуцированию N₂O между сортами обусловлено отзывчивостью растений гороха на инокуляцию семян симбиотическими ризобактериями и применение N-удобрения, которое выражено посредством увеличения урожайности и накопления азота в растительных остатках.

Величины газообразных потерь азота находятся в тесной связи с процессами его трансформации в почве и биологическими особенностями возделываемых культур (Кудеяров, 2020). Выращивание зерновых бобовых и злаковых культур в составе смешанных агроценозов является одним из приёмов, направленных на повышение эффективности использования азота из почвы и применяемых N-удобрений, а следовательно, на снижение его потерь (табл. 16).

Таблица 16. Суммарная эмиссия N₂O из почвы при использовании азотного удобрения в одновидовых и смешанных посевах яровых зерновых культур (среднее за 3 года)

Показатель	Пшеница 100 %			Пшеница 75 % + горох 25 %			Пшеница 50 % + горох 50 %			Пшеница 25 % + горох 75 %			Горох 100 %		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60
N-N ₂ O _(N поступл.) , кг N-N ₂ O/год	<u>0,88</u> 0,95	<u>1,34</u> 1,42	<u>1,84</u> 1,88	<u>1,04</u> 1,21	<u>1,52</u> 1,67	<u>2,00</u> 2,19	<u>1,27</u> 1,46	<u>1,82</u> 1,95	<u>2,35</u> 2,40	<u>1,47</u> 1,46	<u>2,07</u> 1,82	<u>2,63</u> 2,09	<u>1,09</u> 1,82	<u>1,58</u> 2,16	<u>2,13</u> 2,39
N-N ₂ O _(АТД) , кг N-N ₂ O/год	-	0,03	0,06	-	0,03	0,06	-	0,03	0,06	-	0,03	0,06	-	0,03	0,06
N-N ₂ O _(L) , кг N-N ₂ O/год	<u>0,14</u> 0,16	<u>0,22</u> 0,23	<u>0,30</u> 0,31	<u>0,17</u> 0,20	<u>0,25</u> 0,27	<u>0,33</u> 0,36	<u>0,21</u> 0,24	<u>0,30</u> 0,32	<u>0,39</u> 0,39	<u>0,24</u> 0,24	<u>0,34</u> 0,30	<u>0,43</u> 0,34	<u>0,18</u> 0,30	<u>0,26</u> 0,36	<u>0,35</u> 0,39
Суммарная эмиссия N-N ₂ O, кг N-N ₂ O/га	<u>1,02</u> 1,10	<u>1,59</u> 1,68	<u>2,20</u> 2,25	<u>1,21</u> 1,40	<u>1,80</u> 1,98	<u>2,39</u> 2,61	<u>1,48</u> 1,70	<u>2,15</u> 2,30	<u>2,80</u> 2,85	<u>1,71</u> 1,70	<u>2,44</u> 2,15	<u>3,12</u> 2,49	<u>1,26</u> 2,12	<u>1,87</u> 2,55	<u>2,54</u> 2,84

Примечание: В числителе представлены данные при уборке агроценозов на зерносеяж, в знаменателе – на зерно (здесь и в таблице 17).

Выбросы N-N₂O по смешанным посевам, убираемым на зерносеяж, превышали аналогичные значения для монопосевов пшеницы и гороха на 0,33...0,40 кг/га. Значения эмиссионного фактора (ЭФ_{N₂O}) для смешанных

агроценозов: пшеница 50% + горох 50% и пшеница 25% + горох 75% составляет 2,19 и 2,42%. При использовании N-удобрения наблюдается значительное увеличение суммарной эмиссии N-N₂O в смесях: +0,63 кг N-N₂O/га при внесении N30 и +1,27 кг N-N₂O/га при внесении N60.

В смешанных посевах пшеницы и гороха, возделываемых на зерно, при внесении N30 наблюдалось увеличение продукции N₂O на 0,58...0,71 кг N-N₂O/га, при внесении N60 суммарная продукция N-N₂O увеличивалась на 0,79...1,21 кг N-N₂O/га. Величина эмиссионного фактора (ЭФ_{N₂O}) в одновидовых посевах гороха была ниже, чем в посеве пшеницы на 0,51...0,71%, что обусловлено низкой зерновой продуктивностью растений гороха листочковой формы сорта Альбумен. Более высокое суммарное продуцирование N-N₂O (+0,05...+0,86 кг/га) отмечено при возделывании яровой пшеницы и посевного гороха в составе одновидовых и смешанных агроценозов на зерно. Исключение составляет посев с преобладанием зернобобовой культуры, где продуцирование N₂O выше на 0,01...0,63 кг N-N₂O/га при уборке на зерносеяж, за счёт более высокой урожайности и выхода ПКО.

В результате использования N-удобрения в подкормку, запашки ПКО оставшихся после уборки смешанных посевов озимых зерновых культур на зерносеяж и минерализации почвенного ОВ, суммарная эмиссия закиси азота составила 1,82...3,78 кг N-N₂O/га, превышая значения, рассчитанные для монопосевов в среднем на 0,70...1,14 кг/га (табл. 17). При использовании азотного удобрения объёмы суммарной эмиссии N-N₂O увеличились: +1,21 кг N-N₂O/га при внесении N30; +1,99 кг N-N₂O/га при внесении N45 и +2,36 кг N-N₂O/га при внесении N60.

Таблица 17. Суммарная эмиссия N₂O из почвы при использовании азотного удобрения в одновидовых и смешанных посевах озимых зерновых культур (среднее за 3 года)

Показатель	Трипикале 100%				Трипикале 75%+ вика 25%				Трипикале 50%+ вика 50%				Трипикале 25%+ вика 75%				Вика 100%			
	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60
N-N ₂ O _(Нпоступл.) , кг N-N ₂ O/год	0,96	1,67	2,11	2,48	1,56	2,24	2,71	3,13	1,78	2,42	2,98	3,20	1,92	2,51	3,02	2,89	1,79	2,34	2,44	2,51
N-N ₂ O _(АТД) , кг N-N ₂ O/год	-	0,03	0,05	0,06	-	0,03	0,05	0,06	-	0,03	0,05	0,06	-	0,03	0,05	0,06	-	0,03	0,05	0,06
N-N ₂ O _(L) , кг N-N ₂ O/год	0,16	0,27	0,35	0,41	0,26	0,37	0,44	0,51	0,29	0,40	0,49	0,53	0,32	0,41	0,50	0,48	0,29	0,38	0,40	0,41
Сумм. эмиссия N-N ₂ O, кг N- N ₂ O/га	1,11	1,98	2,50	2,95	1,82	2,64	3,20	3,71	2,07	2,85	3,51	3,78	2,23	2,95	3,56	3,43	2,08	2,76	2,89	2,98
	1,16	1,80	2,15	2,37	3,48	3,98	4,48	4,54	3,39	4,10	4,21	4,17	3,65	3,92	3,89	3,91	2,53	2,86	3,10	3,29

В смешанных посевах озимых зерновых культур при уборке на зерно, прибавки в суммарной продукции N-N₂O от внесения N-удобрения, составили, соответственно, 0,49; 0,68 и 0,70 кг/год. Более высокое продуцирование N₂O (+0,10...+1,66 кг/га) отмечено при возделывании озимой вики в составе одновидовых и смешанных агроценозов на зерно. В посеве озимой трипикале объёмы продуцирования N₂O были выше при уборке на зерносеяж, за счёт выхода ПКО и более высокого содержания N в физиологически активном органическом веществе послеуборочных растительных остатков.

Глава 7. Баланс азота в почве и эффективность его использования зерновыми культурами в одновидовых и смешанных агроценозах

Изучение вопросов, связанных с балансом N в почве, оптимизацией азотного питания растений и рациональным использованием N-удобрений, является важным направлением в агрохимии (Лапа и др., 2013). Наряду с удобрениями, существенной составляющей приходной части баланса и дополнительным источником азотного питания для растений гороха служит симбиотически фиксированный азот (табл. 18).

Таблица 18. Вынос урожая, эффективность использования и баланс азота в почве в одновидовых агроценозах безлисточковых сортов гороха (среднее за 3 года)

Сорт	Без инокуляции								При инокуляции							
	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120	N0	N30	N45	N60	N75	N90	N105	N120
Вынос азота урожаем, кг/га																
Агроинтел	81,4	94,7	104,1	106,8	98,2	95,9	111,9	92,7	92,6	99,6	102,0	114,3	106,2	98,9	120,0	95,8
Вельвет	101,2	124,6	114,8	110,4	105,6	96,2	84,0	73,8	122,7	138,9	129,4	125,7	126,4	111,4	89,9	64,6
Коэффициент использования азота из удобрения (КИУ _N), %																
Агроинтел	–	44,1	50,5	42,2	22,4	16,0	29,0	9,4	–	60,4	45,8	54,8	33,1	19,5	36,7	12,0
Вельвет	–	77,9	30,2	15,2	5,8	–	–	–	–	125,7	62,5	40,8	33,5	11,3	–	–
Оплата азотного удобрения прибавкой урожая зерна, кг/кг																
Агроинтел	–	4,1	8,8	6,2	4,0	2,6	5,4	2,6	–	7,0	7,1	9,3	5,1	3,4	6,1	2,8
Вельвет	–	9,5	2,9	–	–	–	–	–	–	19,5	8,5	4,0	2,0	–	–	–
Баланс азота в почве, кг/га																
Агроинтел	-27,7	-10,3	-2,9	7,6	25,5	38,8	42,8	66,8	-36,1	-13,1	-2,0	4,1	20,5	37,4	37,3	65,6
Вельвет	-38,0	-24,1	-9,2	4,6	21,0	38,4	59,0	78,1	-51,1	-33,2	-17,8	-7,2	4,6	27,7	53,6	84,4

Установлено, что суммарный вынос азота урожаем гороха составил 64,6...138,9 кг/га. Его величина определялась уровнем урожайности, содержанием N в зерне и соломе. Большая часть потребляемого растениями азота ($K_{хоз.} = 0,63...0,64$), накапливалась в зерне. При использовании для инокуляции семян штаммов симбиотических ризобактерий вынос N увеличился на 11,2 кг/га (Агроинтел) и 21,4 кг/га (Вельвет). При использовании N-удобрения на сорте Агроинтел вынос N возрос на 11,3...38,6 кг/га. На сорте Вельвет вынос N с урожаем больше на 3,0...23,4 кг/га только при внесении N30-60. Показано, что более высокий коэффициент использования азота из удобрения растениями гороха сортов Агроинтел (60,4%) и Вельвет (125,7%) зафиксирован при инокуляции семян ризобактериями и внесении N30. На 1 кг потребленного N, в среднем по сортам гороха, было создано 18,0...21,0 кг зерна. При инокуляции окупаемость N-удобрения увеличилась на 2,6...7,6 кг/кг.

Вынос азота для формирования 1 т зерна гороха, с соответствующим количеством соломы, по сортам варьировал от 47,7 до 56,9 кг/т. При этом, даже несмотря на инокуляцию ризобактериями и поступление в почву симбиотически фиксированного азота, без внесения N-удобрения в одновидовых посевах гороха наблюдался отрицательный баланс азота (-27,7...-38,0 кг/га). Это указывает на ориентированность гороха, как биологического вида, относительно автотрофного питания растений азотом. Устойчивый положительный баланс N в дерново-подзолистой почве Предуралья (в среднем 17,9...73,7 кг/га) формируется под одновидовыми агроценозами безлисточковых сортов гороха, при внесении N-удобрения в дозах свыше 60 кг д.в./га.

Вынос азота с урожаем в смешанных посевах определяется также урожайностью и концентрацией в зерносенной массе и зерне этого элемента. Величина этих показателей обусловлена прежде всего долей бобового компонента в формируемом агроценозе и дозами N-удобрения. Вынос азота 1 т зерносенной массы в одновидовых посевах пшеницы составлял 12,3...14,6 кг/т, в посевах гороха 28,5...29,2 кг/т. Увеличение доли гороха в смеси сопровождалось повышением выноса азота на 0,4...3,1 кг при внесении N30-60. Совокупный вклад гороха в биологический и хозяйственный вынос N был в 1,1...1,6 раза выше в смешанном агроценозе пшеница 75% + горох 25%. При внесении N-удобрения: возросло суммарное накопление N растениями в смешанных посевах, происходило интенсивное накопление и увеличение выноса N пшеницей, наблюдалось снижение количества фиксированного N в одновидовом посеве гороха и смеси с его превалированием. Без внесения N-удобрения по всем агроценозам баланс N был отрицательным (-17,1...-39,0 кг/га). Это указывает на необходимость использования N-удобрений в рекомендуемых дозах (30-60 кг д.в./га) при возделывании на зерносенной одновидовых и смешанных агроценозов яровой пшеницы и посевного гороха в Предуралье.

Возделывание смешанных и одновидовых агроценозов пшеницы и гороха для получения зерна отличается величиной производимого урожая основной и побочной продукции, концентрацией азота в их составе (табл. 19).

Таблица 19. Вынос урожая, эффективность использования и баланс азота в почве при возделывании смешанных агроценозов пшеницы и гороха (среднее за 3 года)

Культура	Пшеница 100 %			Пшеница 75 % + горох 25 %			Пшеница 50 % + горох 50 %			Пшеница 25 % + горох 75 %			Горох 100 %		
	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60	N0	N30	N60
Вынос урожая, кг/га															
Пшеница	46,7	53,9	59,3	40,3	44,7	54,9	28,8	29,1	32,4	17,6	18,7	16,7			
Горох				33,6	35,8	37,5	76,0	84,3	86,4	89,0	87,0	73,9	116,6	110,0	94,0
Коэффициент использования азота из удобрения (КИУ _N), %															
Пшеница	–	24,1	21,1	–	14,5	24,3	–	1,1	5,9	–	3,4	–			
Горох				–	7,2	6,5	–	27,7	17,4	–	–	–	–	–	–
Оплата азотного удобрения прибавкой урожая зерна, кг/кг															
Пшеница		10,3	8,6	–	6,2	8,3	–	1,8	2,1	–	1,4	–			
Горох				–	0,3	1,0	–	4,3	1,7	–	–	–	–	–	–
Баланс азота в почве, кг/га															
Общий	-31,3	-10,6	8,0	-43,6	-21,1	-8,9	-57,5	-34,6	-15,3	-53,2	-26,3	8,3	-48,2	-16,0	17,8

В зерне пшеницы, полученном в смешанных агроценозах, содержание азота было выше на 0,09...0,44%, чем в одновидовом посеве. При внесении N-удобрения оно повышалось на 0,06...0,12%. Оба факта связаны с оптимизацией азотного питания злака при увеличении общего пула азотистых веществ, поступающих в ризосферу посредством экзоосмоса гороха и конкуренции, наблюдающейся в отношении потребления азота из почвы и удобрения. Потреблённый растениями пшеницы и гороха азот большей частью накапливался в зерне. Максимальная суммарная прибавка урожая зерна от 1 кг N (9,3 кг), получена в смеси пшеница 75% + горох 25% при внесении N60. По отдельности культурами: пшеницей (8,6...10,3

кг/кг) в одновидовом посеве, горохом (4,3 кг/кг) в смеси с равным сочетанием компонентов (пшеница 50% + горох 50%).

Вынос азота 1 т зерна с соответствующим количеством соломы в смешанных агроценозах зависел от доли гороха в высеваемой смеси ($r = 0,98$), обуславливающей совокупный вклад зернобобовой культуры в хозяйственный и биологический вынос N, который увеличивался с 42,5 до 72,6 и 82,1%, и лишь потом от доз N-удобрения ($r = 0,35$). При этом наблюдался планомерный рост потребляемого количества N не только злаковой, но и бобовой культурой. Положительный баланс азота (+8,3...+17,8 кг/га) получен только после смешанного (пшеница 25% + горох 75%) и одновидового агроценозов гороха при условии внесения N-удобрения в дозе 60 кг д.в./га.

Вынос азота 1 т зерносенажной массы в одновидовых посевах озимой тритикале составлял 16,2...19,2 кг/т, в посевах вики – 26,0...28,0 кг/т, что согласуется с действующими нормативами. Смешанные посевы занимали промежуточное значение по потреблению азота. При увеличении в их составе доли вики, вынос азота возрастает в среднем на 3,1...4,8 кг/т. Суммарный вынос азота урожаем зерносенажа увеличивался пропорционально вносимым дозам N-удобрения в одновидовом посеве тритикале и её смесях – тритикале 75% + вика 25% и тритикале 50% + вика 50%. Для этих агроценозов KIU_N составлял 63,2...118%. По всем агроценозам баланс азота в почве был отрицательным (-11,3...-79,8 кг/га). Это указывает на необходимость использования N-удобрений в более высоких дозах (60-90 кг д.в./га) при возделывании одновидовых и смешанных агроценозов озимой тритикале и озимой вики на зерносенаж в условиях Предуралья.

Эффективность потребления азота озимыми зерновыми культурами также определялась сочетанием компонентов в смесях и дозами N-удобрения (табл. 20). В смешанных агроценозах в зерне тритикале содержание азота было выше, чем в одновидовом посеве на 0,14...0,53%, тогда как при внесении N-удобрения оно повысилось лишь на 0,14...0,33%. Это связано с оптимизацией азотного питания злака и свидетельствует о возможности регулирования содержания азотистых веществ в зерне тритикале за счёт включения в состав смешанных агроценозов с озимой викой.

Таблица 20. Вынос урожаем, эффективность использования и баланс азота в почве при возделывании смешанных агроценозов озимых тритикале и вики (среднее за 3 года)

Культура	Тритикале 100%				Тритикале 75 % + вика 25 %				Тритикале 50 % + вика 50 %				Тритикале 25 % + вика 75 %				Вика 100 %			
	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60	N0	N30	N45	N60
Вынос азота урожаем, кг/га																				
Тритикале	54,3	69,3	81,1	89,2	73,1	85,9	105,8	101,9	55,3	75,6	81,1	76,5	41,7	40,7	40,3	39,1				
Вика					18,4	14,0	13,0	9,6	31,0	30,3	23,4	15,4	51,0	39,6	30,7	21,7	99,2	76,0	70,7	61,8
Коэффициент использования азота из удобрения (KIU_N), %																				
Тритикале	–	50,2	59,6	58,2	–	42,7	72,8	48,2	–	67,6	57,5	35,3	–	–	–	–				
Вика					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Оплата азотного удобрения прибавкой урожая зерна, кг/кг																				
Тритикале	–	12,1	15,5	15,2	–	11,8	20,8	12,4	–	21,3	16,7	8,9	–	–	–	–				
Вика					–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Баланс азота в почве, кг/га																				
Общий	-22,4	-6,2	-3,9	0,3	-20,6	-2,5	-7,0	9,4	0,1	10,1	18,6	37,7	14,9	48,7	65,1	81,9	25,9	65,2	80,4	96,8

Потребленный растениями тритикале азот большей частью накапливался в зерне ($K_{хоз.} 0,31...0,75$), а у вики – в вегетативной массе ($K_{хоз.} 0,05...0,46$). Максимальная прибавка урожая зернового вороха от 1 кг N (21,0 кг) получена в смеси тритикале 50% + вика 50% при внесении N30. Прибавка урожая зерна озимой вики от внесения N-удобрения отсутствовала, что подтверждает ориентированность культуры на симбиотрофное питание азотом. В смешанных агроценозах происходило увеличение выноса N с зерном, соломой и ПКО озимой тритикале. Совокупный вклад озимой вики в биологический и хозяйственный вынос N в смешанных агроценозах увеличивался пропорционально её доли в посеве с 13,4 до 25,9 и 45,8%.

Использование N-удобрения сдерживало количество потребленного азота при увеличении доли вики в составе смешанного посева. Бездефицитный и положительный балансы азота (0...96,8 кг/га) получены в одновидовом и смешанных агроценозах вики (тритикале 50% + вика 50%, тритикале 25% + вика 75%), а также тритикале 25% + вика 75%, но только при внесении N60. В отличие от гороха, для озимой вики возможна компенсация всех статей затрат N за счёт симбиотической азотфиксации, благодаря сохранению у растений положительного баланса между авто- и симбиотрофным питанием азотом.

Глава 8. Оценка действия биологического азота, накопленного зернобобовыми культурами в одновидовых и смешанных агроценозах

Продуктивность зерновых культур на дерново-подзолистых почвах Предуралья определяется уровнем минерального и, прежде всего, азотного питания (Пискунов, 1994). После уборки одновидовых агроценозов гороха на зерно в почву поступает 3,87...7,73 т/га свежего органического вещества, которое благодаря высокому содержанию N и узкому отношению C : N (27,5...29,2) можно отнести к числу быстро разлагаемых субстратов, имеющих меньшую минерализационную способность, подвергаясь по этой причине более прочной стабилизации в почве. Это обуславливает краткосрочный процесс иммобилизации входящего в их состав азота в почве. При возделывании овса после безлисточковых сортов гороха из почвы потребляется в среднем 10,5...17,0 кг $N_{биол.}$ /га. За счёт этого, без дополнительного внесения удобрений, в условиях Предуралья возможно получить 3,05-3,17 т/га зерна (табл. 21).

Таблица 21. Урожайность зерна ярового овса, возделываемого после одновидовых агроценозов гороха, т/га (среднее за 3 года)

Дозы азота (В)	Агроинтел		Среднее по В	Вельвет		Среднее по В
	без инокуляции	при инокуляции		без инокуляции	при инокуляции	
N0	3,05	3,24	3,15	3,17	3,41	3,29
N30	3,21	3,43	3,32	3,26	3,70	3,48
N45	3,50	3,74	3,62	3,35	3,68	3,51
N60	3,45	3,79	3,62	3,37	3,69	3,53
N75	3,22	3,48	3,35	3,29	3,49	3,39
N90	3,10	3,30	3,20	3,25	3,40	3,32
N105	3,21	3,37	3,29	3,23	3,42	3,33
N120	3,28	3,41	3,34	3,32	3,48	3,40
Среднее по А	3,25	3,47		3,28	3,53	
НСР _{об} для главных эффектов	0,07		0,34	0,08		0,26
НСР _{об} для частных различий по фактору	А		0,20	А		0,18
	В		0,48	В		0,36

Благодаря инокуляции семян гороха симбиотическими ризобактериями, наблюдается повышение продуктивности и азотфиксирующей способности растений (см. табл. 4). Это позволяет увеличить урожайность зерна овса после сорта Агроинтел на 0,25...0,74 т/га, после сорта Вельвет – на 0,23...0,53 т/га. N-удобрение, используемое в посевах гороха, в последствии увеличивало зерновую продуктивность овса на 0,50-0,55 т/га только при внесении N45-60 на фоне инокуляции семян гороха сорта Агроинтел. Полученное зерно овса, из-за высокого содержания сырой золы (> 25 г/кг), соответствует норме только 2 класса качества, а по содержанию обменной энергии в 1 кг сухого вещества – норме для 1 класса качества национального стандарта ГОСТ Р 53901-2010 «Овёс кормовой. Технические условия». Технологические показатели зерна овса (кислотность, пленчатость, содержание ядра), определяющие его пригодность для производственной переработки, соответствовали норме для 1 класса качества по ГОСТ Р 28673-2019 «Овёс. Технические условия». Наблюдается увеличение натурности зерна овса на 6,4-8,4 г/л при использовании инокулянта для обработки семян обоих сортов гороха в отсутствие внесения N-удобрения. Увеличение дозы N-удобрения под горох до N45-120 (Агроинтел) и N45-75 (Вельвет) в последствии также приводит к оптимизации азотного питания и повышению натурной массы зерна овса. При этом, эффект от последствия N-удобрения дифференцирован согласно использованию для инокуляции семян гороха биопрепарата симбиотических ризобактерий.

Влияние смешанных агроценозов в качестве предшественника связано с накоплением общего и симбиотически фиксированного азота в корнях и соломе. В условиях Предуралья за счёт накопления горохом в составе смесей с яровой пшеницей 16,9-42,0 кг/га биологического азота и поступления в почву 4,64...6,77 т/га биомассы послеуборочных остатков, можно получить 2,48-2,86 т/га зерна ярового ячменя (табл. 22).

Таблица 22. Урожайность зерна ячменя, возделываемого после одновидовых и смешанных агроценозов гороха и пшеницы, т/га (среднее за 3 года)

Предшественник (фактор А)	Доза азота под предшественник (фактор В)			Среднее по А
	N ₀	N ₃₀	N ₆₀	
Пшеница 100%	2,15	2,27	2,33	2,25
Пшеница 75% + горох 25%	2,48	2,39	2,47	2,43
Пшеница 50% + горох 50%	2,78	2,82	2,82	2,80
Пшеница 25% + горох 75%	2,86	2,86	2,70	2,81
Горох 100%	3,07	3,00	2,91	2,99
Среднее по В	2,67	2,67	2,65	
НСР ₀₅ для главных эффектов	0,10			0,17
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А			0,29
	В			0,22

Прибавка урожайности зерна от накопления и использования биологического азота определяется количественным соотношением компонентов в составе смесей, используемых в качестве предшественника. При размещении ячменя после посева пшеница 75% + горох 25% прибавка урожайности зерна в среднем составила 0,18 т/га. Увеличение доли гороха в смеси до 50 и 75% сопровождалось увеличением прибавки урожайности зерна ячменя до 0,55...0,56 т/га. После одновидового посева гороха дополнительно получено до 0,74 т/га зерна. В большей степени на продуктивность

ячменя влияло накопление общего ($R^2 = 0,57$) и симбиотического ($R^2 = 0,96$) азота в соломе и корневых остатках гороха, нежели суммарная продуктивность посевов и выход ПКО ($R^2 = 0,04$). Использование N-удобрения снижает агрономическую ценность гороха в качестве предшественника в одновидовом посеве и смешанных с яровой пшеницей агроценозах. Это обусловлено ингибирующим действием привносимого с удобрением азота на процесс нодуляции и активность азотфиксирующих микроорганизмов, инфицирующих корневую систему гороха, переходом растений гороха на автотрофное питание азотом почвы и удобрений.

При включении и последующем увеличении доли гороха в составе агроценозов предшественника с 25 до 50 и 75%, наряду с урожайностью, происходило планомерное увеличение содержания сырого протеина в зерне ячменя на 6,1; 15,9 и 17,8 г/кг соответственно. По этому показателю и общей питательности зерно ярового ячменя, полученное после смешанных агроценозов гороха, соответствует нормам 2-3 классов качества национального стандарта ГОСТ Р 53900-2010 «Ячмень кормовой. Технические условия» и превосходит на 6,1...16,8 г/кг сырого протеина корм, полученный после одновидового посева пшеницы.

Оценка посевов озимой вики в качестве предшественника предполагает установление влияния накопленного ею в нетоварной части урожая общего и симбиотического азота на урожайность и качество зерна яровой пшеницы (табл. 23).

Таблица 23. Урожайность зерна яровой пшеницы, возделываемой после одновидовых и смешанных агроценозов озимых тритикале и вики, т/га (среднее за 3 года)

Предшественник (фактор А)	Дозы азота под предшественник (фактор В)				Среднее по А
	N0	N30	N45	N60	
Тритикале 100%	2,47	2,55	2,67	2,86	2,64
Тритикале 75% + вика 25%	2,76	2,81	2,81	2,94	2,83
Тритикале 50% + вика 50%	3,10	3,16	3,13	2,90	3,07
Тритикале 25% + вика 75%	2,93	3,05	3,37	3,12	3,12
Вика 100%	2,83	2,90	3,03	3,25	3,00
Среднее по В	2,82	2,89	3,00	3,01	
НСР ₀₅ для главных эффектов	0,15				0,14
НСР ₀₅ для частных различий по фактору	А				0,29
	В				0,32

При возделывании озимой вики в смешанных посевах с озимой тритикале и накоплении в соломе и ПКО 25,3...73,8 кг/га биологического азота, в условиях Предуралья, без дополнительного внесения N-удобрений возможно получить 2,76-3,10 т/га зерна яровой пшеницы. При размещении пшеницы после посева тритикале 75% + вика 25% прибавка урожайности зерна составила 0,19 т/га. Увеличение доли вики в смеси до 50 и 75% сопровождалось ростом прибавки урожайности до 0,43...0,48 т/га. Последствие от применения N-удобрения отмечено при внесении N45 и N60. Использование N-удобрения снижает ценность озимой вики как предшественника в составе смеси с тритикале.

При включении и последующем увеличении доли озимой вики в смешанных агроценозах наблюдалось увеличение содержания в зерне пшеницы сырого протеина на 3,9...11,3 г/кг корма. Благодаря этому зерно яровой пшеницы

соответствует нормам 1-2 классов качества национального стандарта ГОСТ Р 54078-2010 «Пшеница кормовая. Технические условия». Также зерно пшеницы характеризуется более высоким содержанием сырой клейковины (26,86...27,57%). За счёт этого оно соответствует нормам 3 и 4 классов качества по ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия». Зерно яровой пшеницы, сильное по хлебопекарным свойствам и отвечающее по содержанию белка норме 2 класса качества, получено при возделывании после одновидового агроценоза озимой вики по последдействию N30. Последствие от внесения N-удобрения прослеживалось посредством снижения технологических параметров зерна пшеницы (сырой золы, стекловидности). Из-за этого зерно соответствует нормам 2 класса качества по ГОСТ Р 54078-2010 и 4 классу качества по ГОСТу 9353-2016.

Глава 9. Активность и структура микробного сообщества, содержание и трансформация форм биогенных элементов (С, N) в почве при разложении соломы зерновых культур

Растительные остатки, являясь периодическим источником легкоразлагаемых соединений и сложных конституционных органических веществ в почве, обуславливают изменение микробиологических и агрохимических показателей почвы, трансформацию пулов углерода и азота (Кузнецова и др., 2003). Биохимический состав соломы зерновых культур обусловлен видовой принадлежностью растений (*опыт №6*): для соломы гороха характерно более узкое отношение С : N (28-30), соломы злаков – широкое (64-106). Это определяет её «привлекательность» для колонизации микроорганизмами, подверженность ферментативному гидролизу и разную скорость минерализации (табл. 24).

Таблица 24. Интенсивность разложения соломы зерновых культур, %

Культура	Количество разложившейся соломы, %				НСР ₀₁
	30 суток	60 суток	90 суток	120 суток	
Рожь озимая	21,0	45,7	48,3	92,1	0,97
Пшеница яровая	35,8	51,9	68,5	92,5	0,72
Ячмень яровой	48,9	70,8	94,8	98,1	0,46
Горох посевной	46,0	69,2	94,0	99,3	0,22
Овёс яровой	55,5	76,0	92,3	98,0	0,48
НСР ₀₁	4,23	5,85	5,14	2,76	

По истечении 30 суток меньше всего разложению подверглась солома озимой ржи (21,0%) и яровой пшеницы (35,8%). Более интенсивно протекала деструкция соломы гороха (46,0%), ячменя (48,9%) и овса (55,5%). После 60 суток инкубирования убыль в массе для соломы гороха, ячменя и овса составила более 2/3 от начального количества. При внесении соломы озимой ржи количество неразложившейся органической биомассы в почве через 90 суток составило менее 52 и 6-8...32% при внесении соломы яровых зерновых культур. После 120 суток инкубирования разложение соломы яровой пшеницы и озимой ржи достигло 92%. Разложение соломы основных фуражных зерновых культур и гороха к этому сроку составило от 98,0 до 99,3%.

Более высокую активность протеазы, при разложении соломы зерновых культур в дерново-подзолистой почве, наблюдали в 1 и 2 сроки учёта. Для последнего отмечаются пиковые значения активности фермента $4,16 \dots 5,82 \text{ мг N-NH}_2 \times 1 \text{ г почвы}^{-1} \times 72 \text{ часа}^{-1}$. Это означает, что именно в этот период происходит деструкция основной массы белковых соединений и лигнино-протеидного комплекса соломы зерновых культур. Взаимосвязь с работой протеазы можно охарактеризовать в виде тесной и положительной корреляционной зависимости ($r = 0,88$). Активность уреазы на пике (60 суток) составляла $19,3 \dots 24,7 \text{ мг N-NH}_3 \times 1 \text{ г почвы}^{-1} \times 24 \text{ часа}^{-1}$, что исключает возможность ингибирования процесса разложения поступающих в почву пожнивно-корневых остатков со стороны этого фермента. Активность уреазы, в отличие от протеазы, не характеризует протекание процесса разложения соломы ($r = -0,14$), что связано с более «узкой» её специализацией относительно исходного субстрата.

Разложение соломы в почве начинается с формирования на её поверхности сообщества микроорганизмов в виде микробных биоплёнок (рис. 3) и последующего локального лизиса поверхности клеточных стенок экзоферментами микроорганизмов после утраты ими физиологической защищённости компонентами белковой природы (*опыт №8*).

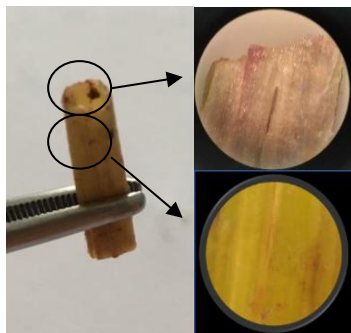


Рисунок 3. Микробные сообщества в виде биопленок на внутренней (А) и внешней (Б) поверхности соломы гороха

Солома гороха заселялась микроорганизмами активнее соломы пшеницы на протяжении всего периода инкубирования. Метаболическая активность на её поверхности в первые 15 суток составляла $0,56 \dots 0,73$ ед. опт. плотности, что в 2 раза выше, чем на соломе пшеницы, за счёт преобладания активных форм микроорганизмов на соломе гороха и спор бацилл на соломе пшеницы. Окрашенные участки микробных колоний на соломе гороха, как правило, имели более яркий цвет и чёткий контур. Это свидетельствует о ней как о более привлекательном субстрате благодаря обеспеченности элементами питания и доступности для микробов легкоразлагаемых компонентов.

В соскобах с инкубируемой в почве соломы наблюдалось значительное увеличение морфологических форм микробов и гетерогенности состава всего микробиома. В микробиологических препаратах, сделанных с предварительно стерилизованных стеблей гороха, преобладали мелкие грамтрицательные палочки, также присутствовали бациллы, актиномицеты и фрагменты мицелия плесени. Плотность мазка, приготовленного с поверхности соломы пшеницы, была существенно ниже.

После 30 суток инкубирования в почве соломы озимой ржи и яровой пшеницы происходило повышение численности микроорганизмов, высеваемых на МПА на $0,41-0,58$ млн. КОЕ/1 г почвы. На 60 суток отмечали сохранение высокой численности протеолитических микроорганизмов ($1030,0 \dots 1423,3 \pm 196,7$ тыс. КОЕ/1 г почвы) в вариантах с внесением соломы ржи, пшеницы и ячменя. Низкое количество микроорганизмов в почве на 30 и 60 суток, при внесении соломы гороха и овса, определялось тем, что вспышка численности этой микробной популяции произошла уже через 1-2 недели после внесения соломы.

Параллельно с этим в течение первого месяца наблюдали снижение численности микроорганизмов амилолитической группы до $453,3...570,0 \pm 58,4$ тыс. КОЕ/1 г почвы при внесении соломы ячменя, овса и гороха. Дальнейшее инкубирование соломы (60 суток) сопровождалось ещё более значительным снижением численности (в 3,2...6,8 раза). Это связано с уменьшением количества минерального азота в почве, который был иммобилизован аммонификаторами в состав своей биомассы. На протяжении следующих 1-2 месяцев можно видеть сначала быстрое (в 2,3...3,1 раза), а затем более медленное (в 1,6...1,9 раза) восполнение численности этой микробной группы.

Деструкция соломы в качестве энергетического материала определяла изменение численности грибных пропагул в исследуемой почве в пределах порядка ($\times 10$). Особо выделились варианты с внесением соломы гороха и овса, где количество микромицетов составляло 820,0...826,7 тыс. КОЕ/1 г почвы. На 60 сутки можно наблюдать дальнейшее увеличение численности этой группы микроорганизмов на несколько сотен тысяч КОЕ/г в вариантах с соломой ячменя, гороха и овса, что говорит о наличии и доступности субстрата для грибов.

В первые 3 месяца инкубирования соломы отмечалось наиболее существенное изменение общей численности культивируемых на МПА, КАА и СЧ микроорганизмов (в 1,2-1,9 раза) в почве. Самые значительные изменения в составе микробиома наблюдались на 90 сутки эксперимента. По истечении 120 суток отмечалось практически полное возвращение микробного сообщества к исходной численности ($1,56 \pm 0,13$ млн. КОЕ/1 г почвы) и гетерогенности по составу (рис. 4). Это указывает на проявление эффекта гомеостаза, свойственного для почвенного микробного пула, в ответ на пополнение запасов углеродсодержащего субстрата.

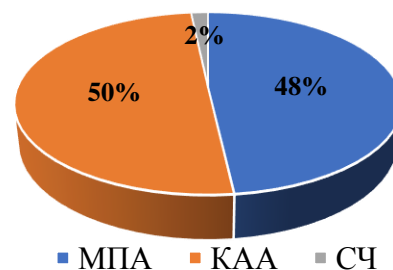


Рисунок. 4. Доля микроорганизмов, культивируемых на соответствующих питательных средах от их общей численности в исходном образце почвы

Существенное увеличение скорости продуцирования $C-CO_2$ (БД) на $2,27...3,16$ мкг $C-CO_2 \times 1$ г почвы⁻¹ \times час⁻¹ отмечалось уже по прошествии 30 суток инкубирования соломы пшеницы, ячменя, гороха и овса (рис. 5А). Суммарно объём фактической минерализации органического вещества соломы по вариантам составил от 8,63 до 17,79 мкг $C-CO_2 \times 1$ г почвы⁻¹ \times час⁻¹, образуя следующий возрастающий ряд: озимая рожь \rightarrow яровая пшеница \rightarrow яровой ячмень \rightarrow яровой овёс \rightarrow посевной горох и имел достоверную отрицательную корреляцию к исходному отношению $C : N$ в фитомассе: от -0,67 на 30 сутки до -0,95 на 120 сутки инкубирования.

Максимальное увеличение активности продуцирования $C-CO_2$ из почвы при добавлении глюкозы (СИД) до 8,79 и 18,73 мкг $C-CO_2 \times 1$ г почвы⁻¹ \times час⁻¹, отмечено по истечении 30 суток в вариантах с соломой ржи и гороха (рис. 5Б). В первом случае наблюдали увеличение фактической минерализации и продуцирования $C-CO_2$ в 3,0 раза, что обусловлено недостатком легко минерализуемых углеводов в соломе озимой ржи, тогда как при внесении соломы гороха, повышение эмиссии $C-CO_2$ в 4,9 раза можно объяснить за счёт более высокого содержания азота и узкого соотношения $C : N$ в соломе.

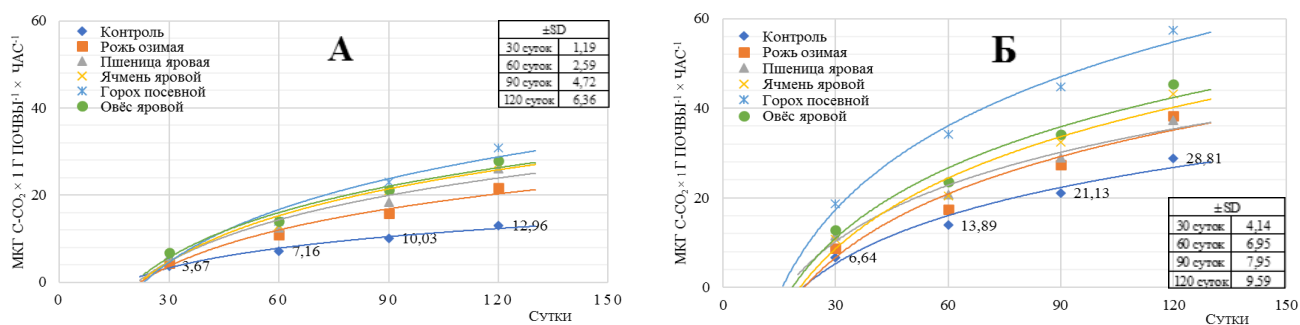


Рисунок 5. Актуальная (А) и потенциальная (Б) активность микробного сообщества почвы и приращение эмиссии С-СО₂ при внесении соломы зерновых культур

По мере разложения соломы зерновых культур наблюдается увеличение метаболического коэффициента (QR) в 1,12...1,64 раза, что указывает на умеренную интенсивность разложения органического вещества и незначительное кратковременное нарушение устойчивости микробного сообщества почвы.

Заделка соломы в почву повышала обеспеченность микробного пула углеродом и другими элементами питания, способствовала снижению интенсивности минерализационных процессов, накоплению $S_{\text{мик}}$ до 435...750 мг/кг почвы. Потенциал увеличения микробной биомассы был обусловлен доступностью микроорганизмам углерода и содержанием азота в соломе зерновых культур. Поэтому максимальное развитие микроорганизмов и повышение $S_{\text{мик}}$ отмечены при разложении соломы гороха на 30 и 60 сутки инкубирования. Трансформация органических остатков в почве завершалась образованием новых групп лабильных гумусовых соединений. Внесенная в почву солома зерновых культур способствовала росту содержания легкоразлагаемого органического вещества $S_{\text{эв}}$ в среднем на 14...79 мг/кг почвы (при разложении соломы гороха +105 мг/кг почвы), $S_{\text{лов}}$ – на 0,14...0,21%. За счёт этого, через 120 суток инкубирования, несмотря на минерализацию углерода, компенсируются потери органического вещества почвы и увеличивается содержание $S_{\text{орг}}$ на 0,24...0,46%.

Основными функциями соломы являются не только формирование и пополнение отдельных фракций углерода, но и регулирование потоков азота в почве. Разложение соломы всех зерновых культур сопровождалось снижением содержания азота почвенных запасов. Если для $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{лг}}$ эти изменения в среднем по опыту составляли, соответственно, 1,5 и 0,8 мг/100 г почвы, то для $N_{\text{тг+нг}}$ содержание снизилось на 10,7 мг/100 г почвы. Прежде всего это прослеживалось при разложении соломы яровых злаковых культур. Пик иммобилизации $N_{\text{мин}}$ почвы соответствовал 1 сроку учёта (30 суток), в рамках которого наблюдались максимальная скорость продуцирования С-СО₂ и формирование микробной биомассы ($S_{\text{мик}}$). Валовое содержание азота в почве в среднем по вариантам на 90,6% было представлено азотом трудно- и негидролизуемых фракций и варьировалось незначительно. По итогу инкубирования соломы прослеживалась тенденция к увеличению этой фракции всего на 1,0% по сравнению с исходным значением.

При низком, как у соломы (0,38...1,51%) содержании азота в растительных остатках, микроорганизмы в процессе их деструкции вынуждены использовать азот почвы. Поэтому, чем меньше азота в соломе, тем выше размеры иммобилизации

почвенного азота. Через 30 суток инкубирования нетто-иммобилизация при разложении соломы ржи и пшеницы составляла 2,11...2,21 мг/100 г почвы, ячменя и гороха 1,23...1,26, овса 1,02 мг/100 г почвы (табл. 25).

Таблица 25. Нетто-минерализация (иммобилизация) азота в почве при разложении соломы зерновых культур с разным отношением С : N, мг/100 г почвы

Культура	Длительность инкубирования, суток			
	30	60	90	120
Рожь озимая	-2,11	-2,17	-0,36	-0,06
Пшеница яровая	-2,21	-0,99	-0,47	0,03
Ячмень яровой	-1,26	-0,92	0,14	0,13
Горох посевной	-1,23	0,65	1,05	1,43
Овёс яровой	-1,02	-0,63	0,27	0,32

Следовательно, N поступающей в почву растительной биомассы более предпочтителен для микроорганизмов, задействованных в её деструкции. Чем шире отношение С : N в соломе, тем медленнее происходила её минерализация до CO₂ в течении начальной стадии разложения и дольше наблюдалась иммобилизация. Заделка в почву более обеспеченных азотом растительных остатков гороха приводит к умеренно продолжительной иммобилизации, не превышающей 1,5 месяца. При внесении соломы яровых злаков нетто-иммобилизация наблюдалась от 2 (овёс, ячмень) до 3 (пшеница) месяцев, при разложении соломы озимой ржи – более 4 месяцев.

При внесении растительных остатков усиливается активность микроорганизмов, сопровождающаяся потреблением кислорода и созданием благоприятных условий для денитрификации. В этом случае нитраты могут быть иммобилизованы непосредственно бактериями и грибами, подвергаясь внутриклеточному восстановлению до NH₄⁺ в присутствии ассимилятивных нитрат- и нитритредуктазы. Максимальная активность нитратредуктазы в вариантах с внесением соломы (0,039...0,058 мг NO₃⁻ × 1 г почвы⁻¹ × 24 часа⁻¹) наблюдалась по истечении первых 30 суток инкубирования, что обусловлено нетто-иммобилизацией подвижных соединений минерального азота. Максимально высокая активность нитритредуктазы (0,024...0,036 мг NO₂⁻ × 1 г почвы⁻¹ × 24 часа⁻¹) также отмечалась в 1 срок учёта. Характер изменения активности нитрат- и нитритредуктазы был однотипным, так как работа этой группы ферментов выстроена линейно. Это также указывает на схожесть направленности и выраженности редуцирующих процессов в почве, независимо от вида соломы.

Между сельскохозяйственными культурами и микроорганизмами существует строгая конкуренция за минеральный азот, в рамках которой демонстрируется фенотипическая пластичность (Титова, 2021). Благодаря ей они могут поглощать и ассимилировать как аммонийную и нитратную формы азота, так и небольшие органические молекулы, сразу используя их для синтеза собственной биомассы. Поэтому при поступлении в почву соломы гороха и пшеницы (*опыт №7*), с характерным для неё широким соотношением С : N = 30-84 : 1, возрастает иммобилизация минерального азота в почве и растения могут испытывать его недостаток, что существенно снижает их продуктивность (рис. 6).

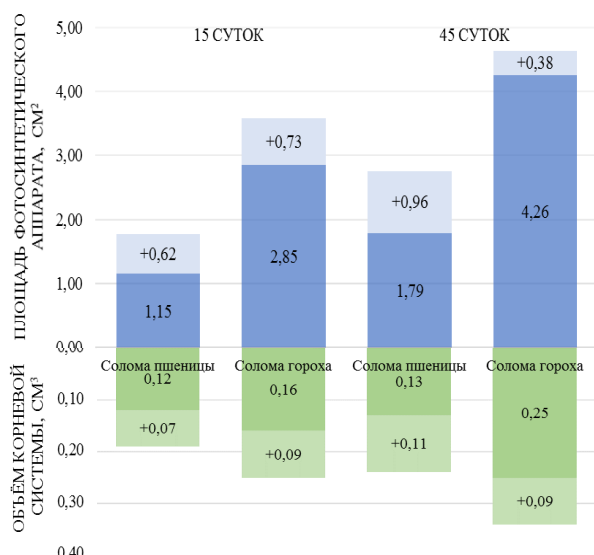


Рисунок 6. Биометрические показатели проростков овса

Примечание: Эффект от использования N-удобрения «+...» по биометрическим параметрам проростков ($p < 0,05$, $n = 3$)

После внесения соломы гороха наблюдается сбалансированность азотного аммонийно-нитратного соотношения в почве по мере развития проростков овса. Минеральный азот сохраняется к периоду наибольшей потребности растений в азоте. Сами растения формируют более существенный его внутренний запас в виде не только вакуолярного фонда нитратов, но и органических соединений белковой природы, что подтверждено результатами тканевой и листовой химической диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Инокуляция семян симбиотическими ризобактериями, с учётом сортовой принадлежности растений гороха, позволяет увеличить урожайность зерна на 0,14...0,21 т/га. Это равноценно использованию 30 кг N/га в составе минеральных азотных удобрений. Более высокая отзывчивость на инокуляцию сорта Вельвет (+0,45 т/га) получена без внесения N-удобрения (N0), на сорте Агроинтел (+0,22 т/га) – при внесении 60 кг N/га. Эффективность инокуляции семян гороха активными интродуцируемыми штаммами ризобий наблюдается при наличии в почве $4,15...6,13 \times 10^5$ КОЕ×1 г почвы⁻¹ азотфиксирующих микроорганизмов.

Урожайность продовольственного сорта Агроинтел повышалась до 2,42 т/га при использовании N60. Продуктивность зернокармального сорта Вельвет увеличилась до 2,95 т/га при внесении N30. Дальнейшее увеличение доз до N90-120 сопровождалось переходом растений гороха на автотрофный тип питания и использование азота удобрения. На сорте Агроинтел это сопровождалось получением максимальной урожайности зерна (2,54...2,63 т/га), на сорте Вельвет – наращиванием вегетативной массы в ущерб урожайности зерна. Это указывает на ориентированность гороха, как биологического вида, относительно автотрофного питания азотом, генотипические различия между сортами по протеканию физиологических процессов, связанных с поступлением и перераспределением ассимилятов, азота и других пластических веществ между органами растений при переходе к генеративному развитию и формированию урожая зерна.

Более высокорослые и облиственные проростки овса с разветвлённой корневой системой развивались при внесении соломы гороха, несмотря на смену в почве иммобилизационных процессов минерализацией по обоим видам растительных остатков. Положительная реакция растений овса на возделывание после внесения соломы гороха обусловлена поступлением в почву большего количества общего, в том числе биологически фиксированного N в составе соломы, усиления азотного питания за счёт мобилизации почвенного азота, которая наблюдается при разложении ПКО с более узким соотношением C : N.

При внесении N-удобрения на фоне инокуляции семян ризобактериями отмечены отдельные различия между сортами гороха по структуре и функционированию симбиотического аппарата на корневой системе растений. За счёт внесения N-удобрения увеличивалась масса клубеньков на корнях растений продовольственного сорта Красноуфимский 11, при переходе от фазы бутонизации к цветению и последующему формированию бобов, у сорта Вельвет – только на начальных этапах вегетативной фазы развития. При внесении N45 количество клубеньков быстро снижалось при прохождении репродуктивной фазы развития растений у сорта Красноуфимский 11 и сохранялась их численность у сорта Вельвет.

2. Отзывчивость гороха на применение азотного удобрения определяется степенью окультуренности дерново-подзолистой почвы. На слабоокультуренной почве формирование симбиотического аппарата на корнях гороха в фазу ветвления стебля происходит только без внесения N-удобрения. На среднеокультуренной почве симбиотический аппарат развивается более активно при внесении N-удобрения. С увеличением дозы N-удобрения свыше 0,05 г/кг на слабо- и 0,20 г/кг на среднеокультуренной почве, процесс формирования симбиотического аппарата полностью подавляется, наблюдается переход растений на автотрофное потребление азота почвы.

Повышение доли гороха в составе возделываемых на зерносенаж смешанных агроценозов с 25 до 75%, сопровождается увеличением их отзывчивости на дозы N-удобрения: с 0,6 до 1,6 т/га при внесении N30 и с 1,4 до 2,9 т/га при внесении N60. В смешанных посевах озимой вики наблюдается обратная тенденция – с увеличением её доли в смеси снижается прибавка урожая от доз N-удобрения. Это показывает различия между видами бобовых культур, прошедших разный по длительности период окультуривания, в соотношении способности к симбиотрофному и автотрофному типу питания азотом. При уборке смешанных агроценозов гороха и вики на зерно максимальные прибавки 0,23...0,65 т/га и 0,33...0,99 т/га получены от использования N-удобрения в случае преобладания злакового компонента в составе высеваемых смесей.

3. Синергический эффект от инокуляции и N-удобрения в отношении накопления сырого протеина в зерне гороха (+16,3...29,9 г/кг) отмечен при внесении N30 на сорте Агроинтел и N30-105 на сорте Вельвет. При обработке семян ризобактериями и внесении N-удобрения содержание сырой клетчатки в зерне гороха снижалось на 5,7...6,3 г/кг. В совокупности это позволяет получить в одновидовых агроценозах гороха зерно, соответствующее норме для 1-2 класса качества.

При внесении N-удобрения увеличивается содержание сырого протеина в зерне пшеницы (на 4,2...9,5 г/кг) и гороха (на 4,8...8,8 г/кг) смешанных агроценозов яровых зерновых культур, а также в зерносенаже (на 6,8...25,2 г/кг) и зерне тритикале (на 7,4...21,7 г/кг) смешанных агроценозов озимых зерновых культур. Это позволяет повысить общую питательность зерносенажа на 0,1...0,6 МДж/кг, а зернофуража на 0,1...0,3 МДж/кг.

4. Инокуляция семян гороха ризобактериями и внесение N-удобрения увеличивают поступление в почву с ПКО на 1,87 т/га свежего органического вещества и на 855 кг/га углерода. При использовании N-удобрения поступление свежего органического вещества и углерода в почву, в убираемых на зерно смешанных

посевах гороха, увеличивается до 6,77 т/га и 3127 кг/га. Использование N-удобрения в качестве ранневесенней подкормки в посевах озимой вики обеспечивает поступление 4,56...7,91 т/га свежего органического вещества при уборке на зерносежа и 6,54...12,46 т/га при уборке на зерно. Вместе с этим количеством в почву поступает, соответственно, до 3,36 и 5,67 т/га углерода.

В одновидовых и смешанных агроценозах с превалированием гороха в почву поступило 62,6...128,4 кг/га общего азота, в том числе 33,8...73,1 кг/га симбиотического. При возделывании вики озимой в почву поступило больше общего азота (151,7...202,7 кг/га) при уборке смешанных агроценозов на зерно. С этим количеством в почве в составе ПКО накапливалось от 25,3 до 73,8 кг/га симбиотически фиксированного азота. Качество послеуборочных остатков, определяемое достаточно узким соотношением C : N (20...45), обеспечивает их быструю минерализацию в почве (от 30 до 120 суток) при краткосрочной или умеренно-продолжительной иммобилизации азота.

За счёт обработки семян ризобактериями и возделывания зернобобовых культур в смешанных агроценозах со злаками, наблюдается индуцирование азотфиксации, что повлекло более интенсивное потребление CO₂ и увеличение секвестрируемых объёмов углерода до 515 и 2565 кг/га.

5. Инокуляция семян симбиотическими ризобактериями увеличивает продуцируемое количество N-N₂O в посевах безлисточковых сортов гороха на 0,10...0,30 кг N-N₂O/год. При внесении N30-60 объём эмиссии закиси азота из почвы в одновидовых агроценозах гороха посевного составил 1,87...3,23 кг N-N₂O/га, вики озимой 2,08...3,91 кг N-N₂O/га, что незначительно превышает количество продуцируемых выбросов N-N₂O из почвы в удобряемых азотом посевах пшеницы и тритикале – на 1,59...2,95 кг/га. Применение в одновидовых посевах гороха более высоких доз (N75-120) способствовало увеличению суммарной эмиссии N-N₂O в 1,2-1,7 раза. При этом значение эмиссионного фактора снижается до 1,00-2,13%.

6. При внесении N-удобрения и инокуляции семян ризобактериями возрастают продуктивность зернобобовых культур, вынос азота урожаем до 126,4...138,9 кг/га в одновидовых и до 118,8...129,7 кг/га в смешанных агроценозах. Эффективность использования азота из удобрения, при обработке в одновидовых агроценозах семян гороха ризобактериями, увеличилась на 16,3...47,8%. Максимальная окупаемость N-удобрения прибавкой урожая зерносежа составила 22,0...24,3 кг/кг, зерна 6,5...9,3 кг/кг в смешанных агроценозах гороха. Более высокая окупаемость N-удобрения в смешанных агроценозах вики составляла 19,0...36,9 кг/га при уборке на зерносежа.

Без внесения N-удобрения в одновидовых и смешанных агроценозах гороха посевного наблюдается отрицательный баланс азота (-27,7...-51,1 кг/га). Устойчивый положительный баланс азота в дерново-подзолистой почве Предуралья (в среднем 17,9...73,7 кг/га) формируется при внесении N-удобрения в дозах свыше 60 кг д.в./га. Озимая вика при возделывании на зерно может компенсировать вынос азота урожаем, а также его потери из почвы за счёт азотфиксации на 100...231% в смешанных посевах и на 143...316% в монопосеве.

7. При возделывании ярового овса после безлисточковых сортов гороха из почвы потребляется в среднем 10,5...17,0 кг N_{биол.}/га. Преимущественно за счёт этого происходит увеличение урожайности зерна овса на 0,19-0,24 т/га, что позволяет без дополнительного внесения удобрений получить 3,05-3,17 т/га зерна. За счёт биологического азота урожайность зерна овса после гороха сорта Агроинтел увеличивается на 0,25...0,74 т/га, после сорта Вельвет – на 0,23...0,53 т/га. Полученное зерно овса по биохимическому составу и содержанию обменной энергии соответствует норме 1-2 классов качества.

За счёт поступления в почву 4,64...6,77 т/га биомассы ПКО и накопления горохом в смешанных посевах с яровой пшеницей 16,9-42,0 кг/га биологического азота, без внесения удобрений формируется 2,39...2,86 т/га зерна ярового ячменя. При увеличении доли гороха в составе смешанных агроценозов, выступающих в качестве предшественника, с 25 до 75% планомерно увеличиваются урожайность зерна ячменя на 0,18...0,56 т/га и содержание в нём сырого протеина на 6,1...17,8 г/кг корма, поэтому оно соответствует нормам 2-3 классов качества.

За счёт возделывания озимой вики в смешанных посевах с озимой тритикале, на 25,3...73,8 кг/га увеличилось накопление биологического азота в соломе и ПКО, что позволяет без дополнительного внесения N-удобрений получить 2,76-3,10 т/га зерна яровой пшеницы. Увеличение доли вики в смеси до 50 и 75% обеспечивает повышение урожайности зерна яровой пшеницы (на 0,43...0,48 т/га) и содержания в нём сырого протеина (на 3,9...11,3 г/кг). В связи с этим, зерно яровой пшеницы соответствует нормам 1-2 классов качества. Использование N-удобрения в смешанных агроценозах гороха и озимой вики снижает их агрономическую ценность в качестве предшественника.

8. При разложении соломы зерновых культур наиболее существенное (в 1,20-1,88 раза) изменение общей численности культивируемых на МПА, КАА и СЧ микроорганизмов отмечалось в первые 3 месяца инкубирования. Самые значительные изменения в составе микробного сообщества наблюдались через 90 суток эксперимента с последующим, практически полным, восстановлением структуры до исходного состояния по истечении 120 суток. Высокая численность протеолитических микроорганизмов (1030,0...1423,3 ± 196,7 тыс. КОЕ/1 г почвы) отмечалась на 60 сутки при внесении соломы озимой ржи, яровой пшеницы и ячменя. При внесении соломы гороха и овса повышение численности этой микробной популяции произошло через 1-2 недели после внесения соломы. Более высокая численность амилолитических микроорганизмов (470,0...743,3 тыс. КОЕ/1 г почвы) была зафиксирована на заключительном этапе инкубирования соломы гороха и овса. Численность микромицетов дифференцирована по виду соломы и срокам её инкубирования. Максимальное их количество (1140,0...1306,7 тыс. КОЕ/1 г почвы) обнаружено при внесении соломы гороха и овса на 60 сутки. При внесении соломы озимой ржи, яровой пшеницы и ячменя наибольшее количество микромицетов составляло 1463,3...1750,0 тыс. КОЕ/1 г почвы на 90 сутки.

При разложении соломы зерновых культур более высокая активность протеазы (4,16...5,82 мг N-NH₂ × 1 г почвы⁻¹ × 72 часа⁻¹) отмечалась на 30 и 60 сутки. При этом производительность уреазы до 12,0-13,1 раза выше, чем протеазы, что исключает возможность ингибирования процесса деструкции соломы со

стороны этого фермента. Менее чёткий отклик на разложение соломы у уреазы обусловлен более «узкой» её специализацией относительно исходного субстрата. Максимальная активность ферментов, отвечающих за превращение нитратов до аммиака (нитратредуктазы $0,039...0,058$ мг $\text{NO}_3^- \times 1$ г почвы $^{-1} \times 24$ часа $^{-1}$, нитритредуктазы $0,024...0,036$ мг $\text{NO}_2^- \times 1$ г почвы $^{-1} \times 24$ часа $^{-1}$), наблюдалась по истечении первых 30 суток инкубирования и разложения соломы.

9. Трансформация органических остатков соломы в почве завершается образованием новых групп лабильных гумусовых соединений, ростом содержания легкоразлагаемого органического вещества $C_{\text{эгв}}$ в среднем на $14...79$ мг/кг почвы, $C_{\text{лов}}$ – на $0,14...0,21\%$. Внесение соломы зерновых культур компенсирует потери органического вещества почвы, наблюдаемые при его минерализации, и увеличивает содержание $C_{\text{орг}}$ через 120 суток инкубирования на $0,24...0,46\%$. Разложение соломы зерновых культур сопровождалось снижением содержания азота почвенных запасов в среднем по опыту на $1,5$ мг ($N_{\text{мин}}$), $0,8$ мг ($N_{\text{лг}}$) и $10,7$ мг/100 г почвы ($N_{\text{тг+нтг}}$). Пик иммобилизации $N_{\text{мин}}$ почвы ($1,02...2,21$ мг/100 г почвы) соответствовал 1 сроку учёта (30 суток) и периоду максимальной скорости продуцирования $C\text{-CO}_2$ ($0,72...3,16$ мкг $C\text{-CO}_2 \times 1$ г почвы $^{-1} \times \text{час}^{-1}$), в течение которого происходило интенсивное формирование микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$). Заделка в почву более обеспеченных азотом растительных остатков гороха приводит к умеренно продолжительной иммобилизации, не превышающей 1,5 месяца. При внесении соломы яровых злаков с более широким соотношением $C : N$, нетто-иммобилизация наблюдалась от 2 (овёс, ячмень) до 3 (пшеница) месяцев. При разложении соломы озимой ржи – более 4 месяцев.

Работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включённых в перечень изданий рекомендованных ВАК

1. Михайлова Л.А. Оценка использования смешанных посевов яровой пшеницы и посевного гороха в качестве предшественника для ярового ячменя / Л.А. Михайлова, М.А. Алёшин, Г.В. Буянова, О.М. Максименко, Д.В. Алёшина // Пермский аграрный вестник, 2016. №3 (15). С. 48-53.
2. Алёшин М.А. Влияние инокуляции и доз азотных удобрений на крупяные свойства и урожайность посевного гороха в условиях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / М.А. Алёшин // Пермский аграрный вестник, 2018. №1 (21). С. 48-53.
3. Алёшин М.А. Влияние удобрений на биохимический состав зерна посевного гороха в условиях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / М.А. Алёшин, Л.А. Михайлова, М.Г. Субботина // Пермский аграрный вестник, 2019. №2 (26). С. 43-49.
4. Алёшин М.А. Влияние доз азота и препарата «Ризоторфин» на продуктивность посевного гороха в условиях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / М.А. Алёшин, М.Г. Субботина // Аграрный научный журнал, 2019. №8. С. 4-11. DOI 10.28983/asj.y2019i8pp4-11.
5. Алёшин М.А. Влияние удобрений на урожайность и биохимический состав зерносеялки смешанных посевов яровой пшеницы и посевного гороха в условиях среднеокультуренной дерново-подзолистой почвы / М.А. Алёшин, Л.А. Михайлова // Пермский аграрный вестник, 2019. №4 (28). С. 33-41.
6. Алёшин М.А. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой почвы на отзывчивость посевного гороха к уровню азотного питания / М.А. Алёшин, Л.А. Михайлова // Аграрный вестник Верхневолжья, 2020. №1 (30). С. 48-54. DOI 10.35523/2307-5872-2020-30-1-48-54.
7. Алёшин М.А. Изменение урожайности и биохимического состава зерна полевых культур в смешанных посевах при использовании минеральных удобрений / М.А. Алёшин, Л.А. Михайлова // Плодородие, 2020. №2 (113). С. 9-13. DOI 10.25680/S19948603.2020.113.03.

8. **Алёшин М.А.** Сравнительная оценка эффективности минерального и биологического азота на посевах озимых зерновых культур / М.А. Алёшин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2020. №4. С. 30-39.
9. **Алёшин М.А.** Влияние минеральных удобрений на взаимодействие компонентов смешанных агроценозов в условиях дерново-подзолистой почвы Предуралья / М.А. Алёшин // Проблемы агрохимии и экологии, 2020. №3. С. 33-38. DOI 10.26178/АЕ.2020.66.57.003.
10. **Алёшин М.А.** Влияние азотной подкормки на урожайность и биохимический состав зерносенажа смешанных посевов озимых культур / М.А. Алёшин // Пермский аграрный вестник, 2020. №4 (32). С. 31-40. DOI 10.47737/2307-2873_2020_32_31.
11. **Алёшин М.А.** Эффективность применения азотного удобрения в смешанных посевах гороха и пшеницы в севообороте / М.А. Алёшин, А.А. Завалин // Агрохимия, 2021. №11. С. 33-48. DOI 10.31857/S000218812111003X.
12. Завалин А.А. Вынос урожая, баланс в почве и эффективность использования азота зерновыми культурами в смешанных и одновидовых агроценозах / А.А. Завалин, **М.А. Алёшин** // Российская сельскохозяйственная наука, 2021. №6. С. 3-8. DOI 10.31857/S2500262721060016.
13. **Алёшин М.А.** Вынос урожая и баланс азота при возделывании зерновых культур в Пермском крае / М.А. Алёшин, А.А. Завалин // Плодородие, 2022. №1 (124). С. 3-6. DOI 10.25680/S19948603.2022.124.01
14. **Алёшин М.А.** Активность и структура микробного сообщества почвы при внесении пожнивно-корневых остатков одновидовых и смешанных посевов зерновых культур / М.А. Алёшин // Проблемы агрохимии и экологии, 2022. №3-4. С. 48-53. DOI: 10.26178/АЕ.2022.55.20.009
15. **Алёшин М.А.** Влияние азотного удобрения и Ризоторфина на морфологию симбиотического аппарата гороха / М.А. Алёшин, А.А. Завалин // Плодородие, 2023. №1. С. 4-8. DOI: 10.25680/S19948603.2023.130.01
16. **Алёшин М.А.** Реакция гороха на азотное удобрение и инокуляцию семян Ризоторфином на дерново-подзолистой почве разной степени окультуренности / М.А. Алёшин, А.А. Завалин // Агрохимия, 2023. №6. С. 22-38. DOI: 10.31857/S0002188123060030

Публикации в других изданиях

17. Михайлова Л.А. Влияние азотных удобрений на урожайность одновидовых и смешанных посевов гороха и пшеницы при возделывании на зерно и зерносенаж / Л.А. Михайлова, **М.А. Алёшин**, Л.С. Воронцова, А.Т. Фахразеева // Актуальные проблемы науки и агропромышленного комплекса в процессе европейской интеграции: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. С. 230-235.
18. **Алёшин М.А.** Влияние условий минерального питания на продуктивность горохо-пшеничных смесей / **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова, Д.В. Алёшина, М.В. Святкина // Роль филиала кафедры на производстве в инновационном развитии сельскохозяйственного предприятия: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2014. С. 189-194.
19. Майсак Г.П. Продуктивность одновидовых и смешанных посевов озимых зерновых культур в зависимости от азотного режима дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы / Г.П. Майсак, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Пермский аграрный вестник, 2014. №2 (6). С. 23-29.
20. **Алёшин М.А.** Продуктивность посевов озимых зерновых культур на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве / **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова, Г.П. Майсак // The role of multidisciplinary approach in solution of actual problems of fundamental and applied sciences (Earth, Technical and Chemical): material 1st international scientific conference of young scientists and specialists – Baku, Azerbaijan, 2014. pp. 130-131.
21. Михайлова Л.А. Влияние условий минерального питания на продуктивность горохо-пшеничных смесей возделываемых на зерносенаж в условиях Предуралья / Л.А. Михайлова, **М.А. Алёшин**, Д.В. Алёшина, М.В. Святкина // Актуальные вопросы кормопроизводства и кормления животных: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2014. С. 9-13.
22. Кривенчук А.Б. Отзывчивость посевного гороха на дозы азота при инокулировании семян штаммом микроорганизмов на дерново-мелкоподзолистой почве / А.Б. Кривенчук, Л.С. Воронцова, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2015: технологии, инновации: материалы всерос.

науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. С. 209-212.

23. Фалалеева А.Л., Влияние доз азотной подкормки на продуктивность одновидовых и смешанных посевов озимой тритикале и озимой вики на дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почве / А.Л. Фалалеева, А.Т. Фахразеева, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2015: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. С. 312-315.

24. Святкина М.В. Влияние условий минерального питания на урожайность зерна одновидовых и смешанных посевов пшеницы и гороха в условиях Предуралья / М.В. Святкина, Д.В. Алёшина, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Молодежная наука 2015: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. С. 277-281.

25. Святкина М.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество зерносеянки одновидовых и смешанных посевов пшеницы и гороха на дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почве ФГУП УОХ «Липовая гора» Пермского района Пермского края / М.В. Святкина, **М.А. Алёшин** // Актуальные проблемы агрохимии и агропочвоведения в исследованиях молодых ученых России: сб. науч. статей по материалам III этапа всерос. конкурса. – Пермь: Изд-во «Прокрость», 2015. С. 37-42.

26. Алёшина Д.В. Последствие минеральных удобрений и биологического азота, накопленного горохом, на продуктивность ячменя в условиях дерново-подзолистой почвы Предуралья / Д.В. Алёшина, **М.А. Алёшин** // Агроэкологические функции удобрений в современном земледелии: материалы 49-й междунар. науч. конф. молодых учёных, специалистов-агрохимиков и экологов. – М.: ВНИИА, 2015. С. 7-10.

27. Алёшина Д.В. Элементы структуры урожайности ярового ячменя, возделываемого после одновидовых и смешанных посевов на разных фонах минерального питания в условиях дерново-подзолистой почвы Предуралья / Д.В. Алёшина, М.Г. Субботина, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: Изд-во Кемеровского ГСХИ, 2015. С. 7-12.

28. Кривенчук А.Б. Влияние доз азота и бактериального препарата Ризоторфин на продуктивность и качество посевного гороха в условиях дерново-неглубокоподзолистой тяжелосуглинистой почвы / А.Б. Кривенчук, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2016: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2016. С. 197-201.

29. Фалалеева А.Л. Продуктивность одновидовых и смешанных посевов озимой тритикале и озимой вики в зависимости от доз азотной подкормки в условиях Предуралья / А.Л. Фалалеева, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2016: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2016. С. 251-256.

30. **Алёшин М.А.** Отзывчивость озимой тритикале на дозы азотной подкормки при возделывании на зерно и зерносеянку в смешанных посевах с озимой викой / **М.А. Алёшин**, Д.В. Алёшина, М.Г. Субботина, Л.А. Михайлова // Совмещенные посевы полевых культур в севообороте агроландшафта: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2016. С. 244-249.

31. Алёшина Д.В. Эффективность возделывания смешанных посевов яровой пшеницы и посевного гороха в качестве предшественника для ярового ячменя / Д.В. Алёшина, Л.А. Михайлова, **М.А. Алёшин**, М.Г. Субботина // Совмещенные посевы полевых культур в севообороте агроландшафта: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2016. С. 63-68.

32. Кривенчук А.Б. Влияние доз азота и препарата «Ризоторфин» на продуктивность посевного гороха в условиях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / А.Б. Кривенчук, **М.А. Алёшин** // Агрохимикаты в XXI веке: теория и практика применения: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Нижний Новгород: ФГБОУ ВПО "Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия", 2017. С. 45-49.

33. Кривенчук А.Б. Влияние возрастающих доз азота и бактериального препарата «Ризоторфин» на продуктивность посевного гороха в условиях дерново-подзолистой

тяжелосуглинистой почвы / А.Б. Кривенчук, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2017: технологии и инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, 2017. С. 154-157.

34. Фалалеева А.Л. Влияние доз азотной подкормки на продуктивность одновидовых и смешанных посевов озимого тритикале и озимой вики на дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почве / А.Л. Фалалеева, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2017: технологии и инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, 2017. С. 214-216.

35. **Алёшин М.А.** Оценка действия биологического азота гороха на фоне последействия азотных удобрений на овсе, возделываемом на дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почве / **М.А. Алёшин** // Агроэкологические и экономические аспекты применения средств химизации в условиях биологизации и экологизации сельскохозяйственного производства: материалы 52-й междунар. очно-заочной науч. конф. молодых учёных, специалистов-агрохимиков и экологов. – М: ВНИИА, 2018. С. 11-14.

36. Сычёва Е.Ю. Оценка последействия доз азота на яровом овсе, возделываемом на дерново-мелкоподзолистой среднесуглинистой почве / Е.Ю. Сычёва, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2019: технологии и инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2019. С. 237-240.

37. Лебедева А.М. Влияние предшественника и последействия азотной подкормки на качество зерна яровой пшеницы / А.М. Лебедева, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Современному АПК – эффективные технологии: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2019. С. 263-266.

38. Лебедева А.М. Влияние типа предшественника и последействие азотной подкормки на хлебопекарные свойства муки яровой пшеницы / А.М. Лебедева, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Молодежная наука 2019: технологии и инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2019. С. 198-201.

39. **Алёшин М.А.** Увеличение урожайности яровой пшеницы за счёт использования в севообороте биологического потенциала зернобобовых культур / М.А. Алёшин, Л.А. Михайлова // Проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах: сб. материалов междунар. науч. конф. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2020. С. 155-159.

40. **Алёшин М.А.** Реакция микробного сообщества дерново-подзолистой почвы на разложение пожнивно-корневых остатков / М.А. Алёшин, А.М. Смолин // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: материалы междунар. науч. экол. конф. – Краснодар: КубГАУ, 2020. С. 169-171.

41. **Алёшин М.А.** Реализация биологического потенциала посевного гороха при использовании азотных удобрений / **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Роль агрономической науки в оптимизации технологий возделывания сельскохозяйственных культур: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. – Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2020. С. 224-228.

42. Лобанов А.Н. Бактерии *Rhizobium leguminosarum* продуценты экзополисахаридов / А.Н. Лобанов, **М.А. Алёшин**, Т.В. Полюдова // Биология – наука XXI века: сб. тезисов 24-й междунар. Пушкинской школы-конф. молодых учёных. – Пушкино: ФИЦ ПНЦБИ РАН, 2020. С. 346-347.

43. Бражкина П.С. Динамика минеральных форм азота и ферментов при разложении пожнивно-корневых остатков пшеницы и гороха / П.С. Бражкина, **М.А. Алёшин** // Молодёжная наука 2020: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2020. С. 181-186.

44. Мещурова А.С. Влияние состава пожнивно-корневых остатков на целлюлозолитическую микробную активность дерново-подзолистой почвы / А.С. Мещурова, **М.А. Алёшин** // Молодежная наука 2020: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь: Изд-во ИПЦ «Прокрость», 2020. С. 248-250.

45. Жуланова М.Н. Оценка действия биологического азота гороха на фоне последействия азотного удобрения на элементы структуры урожайности ярового овса / М.Н. Жуланова, **М.А. Алёшин**, Л.А. Михайлова // Сортовую агротехнику полевых культур – в производство: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2020. С. 40-42.

46. Бражкина П.С. Реакция микробного сообщества почвы на разложение пожнивно-корневых остатков сельскохозяйственных культур / П.С. Бражкина, **М.А. Алёшин**, К.С. Ткачук // Симбиоз-Россия 2020: материалы XII всерос. конгресса молодых учёных-биологов. – Пермь: Издательский центр ПГНИУ, 2020. С. 59-64.
47. Кузнецова А.В. Возделывание гороха посевного в Пермском крае / А.В. Кузнецова, **М.А. Алёшин** // Сортовую агротехнику полевых культур – в производство: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Пермь: ИПЦ «Прокрост», 2020. С. 100-103.
48. **Alyoshin M.A.** The effect of fertilizers on the formation of the symbiotic apparatus and the productivity of sowing peas / In: Bogoviz A.V. (eds) // The challenge of sustainability in agricultural systems. Lecture notes in networks and systems, 2021. Vol. 206. pp. 819-831.
49. **Алёшин М.А.** Оценка действия биологического азота озимой вики на фоне последствия азотного удобрения на яровой пшенице / М.А. Алёшин // Роль вузовской науки в развитии агропромышленного комплекса: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Н. Новгород: Нижегородская ГСХА, 2021. С. 193-198.
50. **Alyoshin M.A.** The effectiveness of the use of nitrogen fertilizer in combination with pre-sowing with the treatment of pea seeds / М.А. Alyoshin // German International Journal of Modern Science, 2021. №18 pp. 5-7.
51. **Алёшин М.А.** Влияние азотного удобрения на развитие гороха посевного и урожайность смешанных агроценозов / М.А. Алёшин // Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии и инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Пермь: Прокрост, 2021. С. 59-62.
52. Zavalin A.A. Nitrogen removal by crops, soil nutrient balance, and efficiency of nitrogen use by cereals in heterogenous and homogenous agrocenosis / A.A. Zavalin, **М.А. Alyoshin** // Russian Agricultural Sciences., 2021. Vol. 47. pp. 1-8.
53. Ботин А.И. Микробные биоплёнки / А.И. Ботин, Ю.А. Коломина, **М.А. Алёшин** // Молодёжная наука 2022: технологии, инновации: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, аспирантов и обучающихся. – Пермь: Прокрост, 2022. С. 185-189.
54. **Alyoshin M.A.** Evaluation of the effect of biological nitrogen of winter vetch on the background of the aftereffect of nitrogen fertilizer on spring wheat / М.А. Alyoshin // German International Journal of Modern Science, 2022. №26 pp. 6-8.
55. **Алёшин М.А.** Эффективность применения азотного удобрения в сочетании с предпосевной с обработкой семян гороха / М.А. Алёшин // E-Scio, 2022. №1 (64). С. 57-63.
56. **Alyoshin M.A.** The effect of the dose of nitrogen fertilization on the development and formation of elements of productivity of varieties of peas sown in a mixed agrocenoses with winter wheat / М.А. Alyoshin // German International Journal of Modern Science, 2022. №26 pp. 8-10.
57. **Алёшин М.А.** Развитие симбиотического аппарата гороха при использовании N-удобрения и биопрепарата Ризоторфин / М.А. Алёшин // Современные проблемы агрохимии, агропочвоведения и агроэкологии: материалы всерос. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2023. С. 11-17.