

На правах рукописи

Стрельцова Надежда Владимировна

**ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНГИЦИДНЫХ
ПРЕПАРАТОВ, ДЕПОНИРОВАННЫХ В БИОРАЗРУШАЕМУЮ
ОСНОВУ ИЗ ПОЛИ(3-ГИДРОКСИБУТИРАТА)**

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Красноярск - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор биологических наук, доцент
Прудникова Светлана Владиславна

Официальные оппоненты: **Торопова Елена Юрьевна**,
доктор биологических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский государственный
аграрный университет», профессор кафедры
защиты растений

Кузнецова Мария Алексеевна,
кандидат биологических наук, Федеральное
государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский
институт фитопатологии», ведущий научный
сотрудник с совмещением должности зав.
отделом болезней картофеля и овощных культур

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится «12» декабря 2024 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета 99.0.134.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, тел.: +7(391)243-45-12, e-mail: ds99013402@ksc.krasn.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ФИЦ КНЦ СО РАН, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ и на сайтах: <https://ksc.krasn.ru/>, <http://www.kgau.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ульянова
Ольга Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Применение пестицидов – химических средств защиты растений от болезней и вредителей – стало насущной необходимостью в сельском хозяйстве для получения стабильных урожаев. Мировое потребление пестицидов стабильно растёт и составляет до 3,54 миллиона тонн в год (<https://www.statista.com>). Обратной стороной этого процесса является распространение токсикантов различных химических классов в экосистемах, кумулятивное и хроническое воздействие пестицидов на окружающую среду, их биоаккумуляция, что оказывает негативное влияние на микро- и макроорганизмы и ставит под угрозу здоровье человека (Долженко и др., 2023; Carvalho, 2017; Brhich et al., 2022). Низкая селективность химических препаратов приводит к снижению численности и изменению видового состава полезных организмов и нарушает равновесие природных экосистем. Кроме того, среди фитопатогенов и организмов-вредителей развивается резистентность к применяемым препаратам, поэтому их эффективность снижается (Гришечкина, Долженко, 2012; Tsolomyti et al., 2021). Несмотря на научно обоснованный подход к выбору пестицидов и государственный контроль в области безопасного обращения пестицидов и агрохимикатов (№109-ФЗ от 19.07.1997), проблема рационального использования пестицидов до сих пор остается актуальной.

Согласно оценкам Food and Agriculture Organization (FAO), к 2050 году численность населения достигнет 9,8 миллиардов человек, что несомненно будет сопровождаться повышением спроса на сельскохозяйственную продукцию (Nishimoto, 2019). В таких условиях производительность агроэкосистем должна быть увеличена, в том числе за счет повышения эффективности агрохимикатов и применения инновационных технологий для решения проблем продовольственной безопасности (Малюга и др. 2020).

Одна из передовых технологий, направленная на повышение эффективности агрохимикатов, основана на депонировании действующего вещества пестицида в основу из биоразлагаемых полимерных материалов (целлюлоза, крахмал, хитозан, альгинат натрия, полилактид, полигидроксиалканоаты и др.). Благодаря постепенному разрушению основы обеспечивается контролируемый выход пестицида и его пролонгированное действие (Pleuova, 2020; Volova et al., 2018). Депонированные препараты защищены от быстрой инактивации УФ-излучением или ферментами почвенных микроорганизмов; кроме того, они имеют ограниченную подвижность в почве, что снижает риск загрязнения окружающей среды и уменьшает токсичность для биоты (Fraceto et al., 2020). Пролонгированное действие уменьшает количество обработок растений за вегетационных период и снижает объемы применения химикатов (Volova et al., 2021).

При разработке новых форм агропрепаратов решающее значение имеет выбор материалов, которые будут использоваться как основа для пестицидов (Yusoff et al., 2016). Они должны быть совместимые с пестицидами, нетоксичные, биоразлагаемые, но при этом способные сохраняться в почве

достаточное время для обеспечения контролируемого выхода действующего вещества. Этим требованиям полностью соответствуют полигидроксиалканоаты (ПГА) – полимеры, синтезируемые некоторыми видами бактерий в качестве резервных макромолекул. В окружающей среде они разлагаются под действием микробных ферментов до углекислого газа и воды. ПГА легко перерабатываются в изделия разной формы – пленки, гранулы, пеллеты, микрокапсулы, а пониженная скорость биodeградации позволяет длительно и постепенно осуществлять выход пестицида в почву (Grillo et al., 2011; Volova et al., 2018; Koller, 2020; Chen et al., 2021).

Степень разработанности темы. Принципы контролируемой доставки пестицидов были сформулированы D. H. Lewis и D. R. Cowsar (1977) и продолжены в работах L.F. Fraceto, R. Kumar, F. Flores-Céspedes, M. Fernández-Pérez, E.V.R. Campos, N. Chauhan, Y. Liu, J. Kumar, C. Xu. Описаны примеры использования ПГА в качестве основы для доставки агропрепаратов (R. Grillo, G. Chen, L. Savenkova, F.A. Lobo, L. Cao и др.); в России научным коллективом под руководством Т.Г. Воловой достигнут значительный прогресс в этом направлении. Несмотря на высокий потенциал ПГА в качестве основы для депонирования агропрепаратов, остаются пробелы в понимании таких аспектов, как влияние депонированных препаратов на растения и почвенную микрофлору, кинетика высвобождения действующего вещества из основы в природных условиях в агроэкосистемах, а также продолжительность действия депонированных препаратов в течение вегетационного периода. Решение этих вопросов открывает новые направления экологизации сельского хозяйства и снижения пестицидной нагрузки на агроэкосистемы.

Цель работы – оценка эффективности и экологической безопасности фунгицидных препаратов, депонированных в биоразрушаемую основу из поли(3-гидроксибутирата), для борьбы с почвенными фитопатогенными грибами – возбудителями болезней зерновых культур и картофеля.

Основные задачи исследования:

1. Разработать депонированные формы фунгицидных препаратов длительного действия с использованием биоразрушаемой основы из поли(3-гидроксибутирата) и природных материалов (торф, опилки, глина).

2. Исследовать динамику биodeградации депонированных форм фунгицидов и кинетику выхода действующего вещества из биоразрушаемой основы в почву.

3. Исследовать влияние депонированных фунгицидных препаратов на структуру и таксономический состав почвенного микробиоценоза, в том числе фитопатогенных и сапротрофных микроорганизмов.

4. Оценить эффективность применения депонированных фунгицидных препаратов для подавления фитопатогенных грибов в ризосферной почве и корневой системе зерновых культур (пшеница, ячмень) и картофеля.

5. Исследовать влияние депонированных фунгицидов на ростовые показатели, структуру и качество урожая при выращивании растений в лабораторных и полевых условиях.

Научная новизна. Разработано пионерное семейство фунгицидных препаратов, депонированных в биоразрушаемую основу из поли(3-гидроксibuтирата) и природных материалов (торф, опилки, глина). Исследованы свойства препаратов и кинетика их разрушения в почве. Показано пролонгированное фунгицидное действие депонированных препаратов в течение вегетационного периода при однократном внесении их в почву одновременно с посевным материалом. Разработанные формы препаратов ингибируют развитие фитопатогенных микромицетов в ризосферной почве, снижают распространение болезней на растениях и обладают высокой биологической эффективностью – от 60 до 100% для зерновых культур и от 45 до 94% для картофеля. Выявлено, что депонирование в биоразрушаемую основу нивелирует негативное действие фунгицидов на нецелевые объекты – почвенные бактерии.

Теоретическая значимость работы. Результаты исследований вносят вклад в развитие представлений о возможности использования ПГА для разработки долговременных средств защиты растений от фитопатогенов, расширяют знания о разнообразии фитопатогенных грибов – возбудителей болезней зерновых культур и картофеля в Красноярском крае, дополняют сведения о влиянии депонированных фунгицидных препаратов на почвенные бактерии.

Практическая значимость. Выделен комплекс фитопатогенных микромицетов, распространенных в Красноярском крае, включающий виды родов *Alternaria* Nees, *Boeremia* Aveskamp, Gruyter & Verkley, *Fusarium* Link, *Phytophthora* de Bary, *Rhizoctonia* DC., и показана высокая эффективность депонированных фунгицидных препаратов в подавлении роста выделенных фитопатогенов. Выявлено, что депонированные фунгицидные препараты обладают пролонгированным действием, обеспечивающим защитный эффект для корневой системы растений в течение вегетационного периода при однократном внесении в почву с посевным материалом, что позволяет уменьшить количество обработок растений фунгицидами в процессе выращивания, иммобилизовать действующее вещество фунгицида в прикорневой зоне и снизить распространение в окружающей среде. Оздоровляющее действие депонированных форм фунгицидов на корневую систему растений способствует повышению урожайности, а также улучшению качества клубней картофеля и зерна пшеницы и ячменя. Результаты исследований используются в учебном процессе ФГАОУ ВО СФУ; в учебный план подготовки магистров по программе 06.04.01.01 Микробиология и биотехнология (направление 06.04.01 Биология) включена дисциплина «Микология с основами фитопатологии (протокол ученого совета № 5 от 25.05.2021).

Методология и методы исследований. Методологической основой послужил анализ научной литературы отечественных и зарубежных авторов, комплексный подход к планированию и реализации исследования. В работе использованы общепринятые лабораторные и полевые методы исследования, стандартные статистические методы обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные формы фунгицидных препаратов, депонированных в биоразрушаемую основу из поли(3-гидроксibuтирата) и природных материалов, обладают пролонгированным действием в почве, которое обеспечивается за счет постепенной деградации полимерной основы и поступления действующего вещества в прикорневую зону в течение вегетационного периода

2. Депонированные фунгицидные препараты обладают выраженным фунгицидным действием, снижают численность почвенных микромицетов, не оказывают ингибирующего действия на развитие почвенных бактерий, но оказывают селективное влияние на их таксономический состав.

3. Депонированные фунгицидные препараты обладают высокой биологической эффективностью в подавлении возбудителей грибных болезней зерновых культур и картофеля и улучшают качество урожая.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных конференциях: V Всероссийский конгресс по защите растений, Санкт-Петербург, 2024; XIX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив свободный – 2023», Красноярск, 2023; XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный – 2022», Красноярск, 2022; 5-й Съезд микологов России, Москва, 2022; IV Международная научная конференция «Наука будущего – наука молодых», Новосибирск, 2022; IV Международная научная конференция «Биотехнология новых материалов – Окружающая среда – Качество жизни», Красноярск, 2021; XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2021; 58-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2020, Новосибирск, 2020; VIII Международная научно-практическая конференция «Биотехнология: наука и практика», Ялта, 2020; 19th International Multidisciplinary Scientific Geosconference "SGEM-2019", Австрия, Вена, 2019.

По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы и системы цитирования (Scopus), 2 статьи в научных журналах, глава в монографии, а также материалы конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка литературы. Работа изложена на 163 страницах, содержит 37 рисунков, 21 таблицу и 12 приложений (А-Н). Библиография насчитывает 216 источников.

Достоверность результатов исследования обеспечивается достаточным объемом данных, их воспроизводимостью, а также использованием при проведении работы современных методов экспериментального исследования и статистического анализа.

Связь работы с научными программами и собственный вклад автора. Работа является частью исследований, проводимых в рамках реализации мегагранта «Агропрепараты нового поколения: стратегия

конструирования и реализация» по Постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования (VI очередь) (соглашения № 074-02-2018-328 от 12 мая 2019 г. и № 075-15-2021-626 от 08 июня 2021 г.), а также поддержана стипендией компании «Bayer Crop Science Россия» (научная инициатива «БайСтади», 2021 г.).

Автор принимала непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, выборе методов исследования, проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций и докладов на конференциях. Результаты, представленные в разделе 4.2, получены коллективом авторов в рамках мега-гранта «Агропрепараты нового поколения: стратегия конструирования и реализация» (С. Томас, Т.Г. Волова, М.Д. Косенок, К.В. Ноздрина, Е.Д. Посохина, С.В. Прудникова, С.А. Пятина, К.Ю. Сапожникова, В.А. Сапожников, Н.В. Стрельцова, А.Г. Суковатый, Е.И. Шишацкая, О.Н. Шишацкий, С.П. Шулепина, А.А. Шумилова). Фунгицидные гранулы были изготовлены в лаборатории Инновационных препаратов и материалов СФУ (канд. техн. наук, н.с. Е.Г. Киселев, д-р биол. наук, г.н.с. Т.Г. Волова). Агрохимический анализ почвы, оценка структуры урожая зерновых культур и картофеля проводилась на базе ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» (д-р биол. наук, профессор Н.Л. Кураченко, канд. биол. наук, доцент В.Л. Бопп, д-р с.-х. наук, г.н.с. В.Н. Романов). Детектирование фунгицидов в почве выполнено в Институте биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН (канд. биол. наук, с.н.с. Н.О. Жила). Секвенирование фрагментов генов рРНК штаммов деструкторов П(ЗГБ) и фитопатогенных грибов выполнено в Институте химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск).

Автор выражает благодарность коллективу базовой кафедры биотехнологии СФУ и Лаборатории хемоавтотрофного биосинтеза Института биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН за практическую и консультативную помощь и поддержку при выполнении диссертационного исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность работы, цель и задачи, перспективы использования фунгицидных препаратов, депонированных в основу из П(ЗГБ) и природных материалов.

Аналитический обзор. В обзоре рассмотрены аспекты негативного воздействия пестицидов на биосферу и влияния фунгицидов на почвенную микробиту; проанализирована литература о мировых достижениях в разработке систем контролируемой доставки агропрепаратов и перспективы применения ПГА для конструирования таких систем.

Материалы и методы исследований

Объекты исследования – фунгицидные препараты, депонированные в основу из поли(3-гидроксипропирата) [П(ЗГБ)] и доступных природных материалов в качестве наполнителя (глина, торф, березовые опилки). В состав

препарата входил один из фунгицидов – тебуконазол, эпоксиконазол, азоксистробин, дифеноконазол, или смесь азоксистробина с мефеноксамом (1:1). Соотношение компонентов "П(ЗГБ)/наполнитель/фунгицид" в препаратах составляло 50/30/20% или 50/40/10%. Препараты в виде гранул были изготовлены из гомогенных порошковых смесей с применением гранулятора (Fimar, Италия) по оригинальной технологии (патент РФ № 2733295; Kiselev et al., 2022) в лаборатории Инновационных препаратов и материалов СФУ. Определение концентрации фунгицидов в почве проводили с использованием системы высокоэффективной жидкостной хроматографии Agilent 1200 с диодной матрицей (Agilent Technologies, США). Характер деградации депонированных фунгицидов изучали в лабораторных почвенных микрэкосистемах в течение 3 месяцев. В ходе экспозиции фунгицидных гранул в контейнерах с полевой почвой исследовали убыль массы гранул, динамику высвобождения и концентрацию фунгицидов в почве.

Влияние депонированных фунгицидов на почвенный микробиоценоз. Исследование проводили в лабораторных почвенных микрэкосистемах, анализируя численность и таксономический состав доминирующих видов культивируемых бактерий и микромицетов при внесении в почву депонированных форм фунгицидов. Контрольными группами служили образцы почвы, в которую вносили эквивалентное количество соответствующего фунгицида в чистом виде (положительный контроль), и образцы почвы без внесения фунгицидов (отрицательный контроль). Анализ структуры почвенных микробиоценозов и их изменения в ходе лабораторных и полевых экспериментов проводили общепринятыми микробиологическими методами (Нетрусов и др., 2005). Идентификацию бактерий проводили методом матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации с времяпролетной масс-спектрометрией (MALDI-TOF) на масс-спектрометре Bio Type Microflex LT/SH (Bruker, Германия) в КГБУЗ КККЦОМД (Красноярск). Выделение первичных деструкторов П(ЗГБ) из почвы проводили на минеральном агаре с добавлением П(ЗГБ) в качестве источника углерода (метод прозрачных зон); виды идентифицировали по результатам секвенирования фрагментов генов рРНК сравнивая нуклеотидные последовательности с данными банка генов NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>); депонированы под номерами МК300053-МК300061. Виды фитопатогенов определяли путем секвенирования региона ДНК 18S рРНК-ВТС1-5,8S рРНК-ВТС2-28S рРНК; депонированы под номерами MZ424190-MZ424198, ON528756.

Оценка биологической эффективности депонированных фунгицидов в лабораторных условиях. Фунгицидное действие депонированных препаратов в отношении чистых культур фитопатогенных грибов, выделенных из зараженного зерна и пораженных клубней картофеля, оценивали *in vitro*, определяя степень ингибирования роста колоний фитопатогенов на питательной среде под действием фунгицидных гранул.

Исследование фунгицидного действия депонированных препаратов в ризосферной почве сельскохозяйственных культур проводили на тестовых растениях яровой пшеницы сорта Новосибирская 15, ярового ячменя сорта

Биом и картофеля сорта Красноярский ранний. Растения выращивали в пластиковых контейнерах, заполненных полевой почвой, в климатической камере Фитотрон ЛиА-2 (Россия). В камере поддерживали суточный цикл по температуре (10-22 °С) и освещенности (0-300 мкмоль/м²/с), влажность 50%.

При выращивании зерновых культур оценивали фунгицидное действие депонированных форм тебуконазола (ТЕБ) и эпоксиконазола (ЭПОК), гранулы которых вносили в почву при посадке семян. В положительном контроле в почву вносили водные растворы фунгицидов ТЕБ и ЭПОК в аналогичной концентрации; отрицательный контроль – интактные растения без обработки. Анализ ризосферной микробиоты, оценку состояния корневой системы и развития надземной части зерновых культур проводили в динамике в фазы всходов (7-14 сут.), кущения (26-28 сут.), выхода в трубку (40-42 сут.), колошения (50-56 сут.), созревания (80-84 сут.). Инфицированность корневыми гнилями определяли методом влажных камер (ГОСТ 12044-93). Биологическую эффективность фунгицидов (%) рассчитывали по модифицированной формуле Аббота (Попов и др., 2003), учитывая зараженность корневой системы пшеницы и ячменя фитопатогенами при анализе во влажных камерах.

При выращивании картофеля оценивали депонированные формы фунгицидов азоксистробина (АЗК), дифеноконазола (ДИФ) и сочетания азоксистробин + мефеноксам (АЗК+МЕФ); положительный контроль – их коммерческие аналоги, произведенные ООО «Сингента»: Квадрис (АЗК), Скор (ДИФ) и Юниформ (АЗК+МЕФ). Определяли состояние надземной части картофеля, корневой системы и урожайность; степень поражения патогенами оценивали по 9-балльной шкале (Жевора и др., 2019).

Оценка биологической эффективности депонированных фунгицидов в полевых условиях. Исследование проводили на опытных полях учебного хозяйства «Миндерлинское» ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», расположенного в Красноярской лесостепи (56° с.ш., 92° в.д.). В полевой сезон 2020 г. на тестовых растениях пшеницы сорта Новосибирская 15 и ячменя сорта Биом исследовали фунгицидное действие депонированной формы комплексного препарата, содержащего фунгицид тебуконазол (ТЕБ) и гербицид трибенурон-метил. Положительный контроль – протравливание семян фунгицидом Бункер (ТЕБ) в соответствии с рекомендациями производителя (АО «Август»); отрицательный контроль – интактные растения. В полевой сезон 2021 г. проводили оценку эффективности депонированных фунгицидов АЗК, ДИФ и АЗК+МЕФ для подавления болезней картофеля в сравнении с положительным контролем – фунгицидным действием коммерческих аналогов Квадрис (АЗК), Скор (ДИФ) и Юниформ (АЗК+МЕФ). В полевых опытах использовали два сорта картофеля – Красноярский ранний и Леди Клэр. В полевых экспериментах оценивали зараженность зерновых культур и картофеля фитопатогенными грибами в контрольных и экспериментальных группах, изменения в структуре микробного сообщества ризосферной почвы, урожайность и структуру урожая. Биологическую эффективность фунгицидов рассчитывали по результатам корневого анализа зерновых культур и клубневого анализа картофеля.

Статистический анализ результатов проводили с использованием стандартного программного пакета Microsoft Excel для Windows 10.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Конструирование экспериментальных форм депонированных фунгицидных препаратов и их биодеградация в почве. Для исследований отобраны системные фунгицидные препараты разных классов, рекомендованные для защиты от широкого спектра почвенных фитопатогенных грибов: азоксистробин, тебуконазол, эпоксиконазол, дифеноконазол, мефеноксам. Из сухих гомогенных порошков П(ЗГБ), природных материалов (глина, опилки, торф) и фунгицидов сформированы смеси с различным соотношением компонентов и получены фунгицидные формы в виде гранул.

Изучение деградации разработанных форм и динамику выхода фунгицидов в почву проводили в лабораторных почвенных микросистемах. В течение первых 15 суток экспозиции не было отмечено активной деградации форм и значимого уменьшения их массы (рис. 1). Через 30 суток убыль массы составила 7,7-17,5% от исходной, в зависимости от типа фунгицида. Затем убыль массы нарастала и в конце эксперимента (75 суток) остаточная масса гранул составляла от 46,2 до 63,1%.

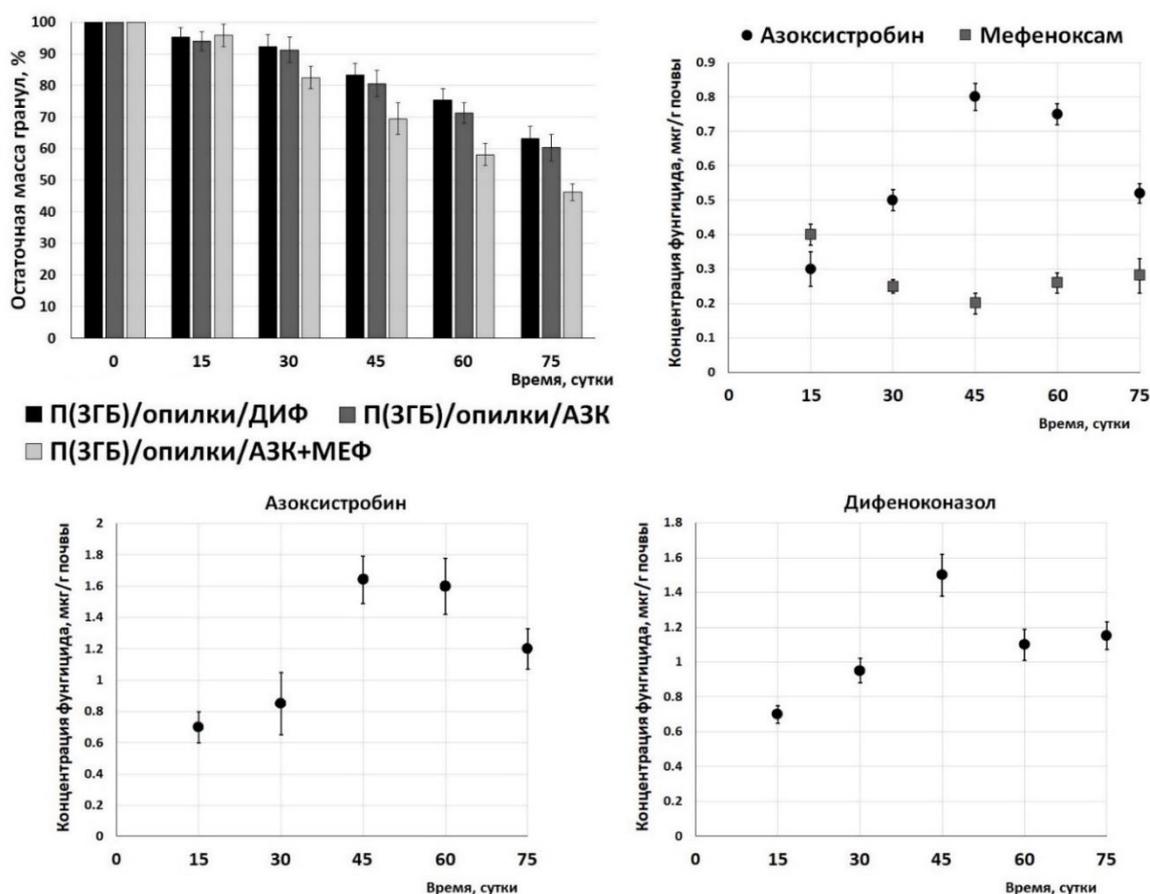


Рисунок 1 - Деградация экспериментальных форм фунгицидов и концентрация активного вещества в почве

Интенсивность деградации форм зависела от растворимости фунгицида. Для препаратов с наиболее растворимым фунгицидом мефеноксамом период полураспада составлял 56-70 суток, тогда как для форм с малорастворимыми азоксистробинном, дифенокназолом, тебуконазолом и эпоксиконазолом – более 80 суток. Динамика накопления препаратов в почве была различной в зависимости от кинетики деградации гранул, растворимости и стабильности фунгицида в почве. Для малорастворимых, но стабильных фунгицидов (АЗК и ДИФ) выход из гранул через 15 суток составлял 0,6-0,7 мкг/г почвы, максимальные концентрации достигались на 45-60 сутки, а затем незначительно снижались. Концентрация более растворимого и менее стабильного мефеноксама была максимальной через 15 суток (0,74 мкг/г), далее к 30-м суткам она снижалась (0,32 мкг/г), а к концу эксперимента возрастала (0,6 мкг/г), что согласуется с активным разрушением гранул в эти сроки.

Использование различных наполнителей (глина, опилки, торф) в составе смесовой основы для депонирования фунгицидов (на примере ТЕБ, ЭПОК и АЗК), не оказало существенного влияния, как на характер деградации гранул, так и на кинетику выхода активного вещества в почву.

Деградация П(ЗГБ) – основы депонируемых фунгицидов - обеспечивается за счет активности ферментов-деполимераз почвенных микроорганизмов. Из почвенных образцов после экспозиции гранул были выделены культуры бактерий и грибов – первичных деструкторов П(ЗГБ), обладающих деполимеразной активностью. Выделенные изоляты были идентифицированы как *Pseudomonas sp.*, *Bacillus cereus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus simplex*, *Pseudarthrobacter sp.*, *Streptomyces sp.*, а также *Penicillium chrysogenum*, *Talaromyces purpureogenus* и *Talaromyces funiculosus*.

Влияние депонированных фунгицидных препаратов на почвенную микробиоту. Высвобождающиеся в почву фунгициды могут оказывать влияние на почвенную микробиоту, причем не только на целевой объект – микромицеты, но и на бактерии. Поэтому важным аспектом эффективного функционирования разработанных форм фунгицидов является состояние почвенного микробиоценоза. Полевая почва, в которой экспонировали образцы разработанных форм препаратов, характеризовалась как тяжелосуглинистый чернозем плотностью 0,80-1,24 г/см³ почвы; слабощелочной (рН 7,3); с низким содержанием нитратного (9,2 мг/кг) и средним аммонийного (35 мг/кг) азота, высоким содержанием фосфора (280 мг/кг) и калия (250 мг/кг); содержание углерода 3,4-4,10 %. Расчет соотношения основных эколого-трофических групп микроорганизмов (копиотрофы, прототрофы, олиготрофы) показал высокие коэффициенты минерализации (4,72) и олиготрофности (6,78), что в совокупности с высокой численностью азотфиксаторов (2,0±1,24) млн. КОЕ/г свидетельствовало о зрелости почв и дефиците легкодоступных форм азота. Доминирующие культивируемые бактерии были представлены актинобактериями *Streptomyces* (17,7%), *Arthrobacter* (4,6%), *Nocardia* (4,5%), *Actynomyces* (2,3%), споровыми палочками *Bacillus* (23,4%), *Paenibacillus* (9,5) и псевдомонадами (8,9%). Среди микромицетов доминировали виды рода *Penicillium* (69%), на втором месте *Fusarium* (8,4%). Суммарно на долю

фитопатогенных микромицетов (*Fusarium*, *Alternaria*, *Phytium* и *Verticillium*) приходилось около 15% выделенных изолятов, что указывало на высокий инфекционный фон агропреобразованной почвы.

Внесение в почву депонированных форм фунгицидов с разными типами наполнителя привело к снижению общей численности микромицетов (в 1,5-7,6 раза по сравнению с контролем), в том числе значительной доли фитопатогенов. Доминирующим родом оставался *Penicillium* (около 80%), доля фузариев снизилась до 1,1%, а представители родов *Alternaria*, *Phytium* и *Verticillium* обнаружены не были. Сравнение с микробиотой контрольных образцов почвы без фунгицидов не выявило ингибирующего действия депонированных форм фунгицидов на почвенные бактерии. Более того, было показано стимулирующее действие экспериментальных форм "полимер/опилки/ЭПОК" и "полимер/опилки/АЗК" на рост копитрофных бактерий. Для фунгицидов, полученных на основе смесей "полимер/глина", выявлена более высокая численность олиготрофных бактерий по сравнению с другими наполнителями. В ходе экспозиции экспериментальных фунгицидных гранул в почве было обнаружено изменение в таксономическом составе бактерий, которое проявилось в увеличении доли протеобактерий, в особенности *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* и *Variovorox*, а также актинобактерий *Pseudarthrobacter*, *Rhodococcus* и *Streptomyces*.

Внесение в почву свободных форм фунгицидов резко снижало общую численность микромицетов – в 20-60 раз по сравнению с контрольной почвой, тем не менее, в почве сохранялись фитопатогенные виды родов *Fusarium* и *Alternaria*. Кроме того, свободные фунгициды ингибировали развитие экологотрофических групп бактерий – копитрофов (1,4-3,3 раза), прототрофов (5,6-13,7 раза) и азотфиксаторов (2,1-3,3 раза). В сообществе культивируемых бактерий доминировал род *Bacillus* (50-70%) и снижалось видовое разнообразие. Таким образом, депонирование фунгицидов в биodeградируемую основу уменьшило их негативное воздействие на нецелевую микробиоту, тогда как свободные пестициды вызывали значительные сдвиги в структуре почвенного микробиоценоза.

Фунгицидное действие депонированных препаратов *in vitro* в отношении возбудителей болезней зерновых культур и картофеля. Для оценки чувствительности фитопатогенов к депонированным фунгицидным препаратам использовали культуры грибов, выделенные из инфицированного зерна и клубней картофеля: *Alternaria alternata*, *A. longipes*, *Boeremia exigua*, *Fusarium equiseti*, *F. fujikuroi*, *F. oxysporum*, *F. redolens*, *F. solani*, *F. vanettenii*, *Rhizoctonia solani*, *Phytophthora infestans*. Разработанные формы, независимо от типа фунгицида и наполнителя (глина, опилки, торф), проявляли выраженное фунгицидное действие и подавляли рост мицелия фитопатогенов на питательной среде. В чашках с экспериментальными формами фунгицидов диаметр колоний уменьшался в 1.2-2.8 раза по сравнению с отрицательным контролем. Эффективность депонированных форм была сопоставима со свободными фунгицидами и их коммерческими аналогами (положительный контроль), следовательно, депонирование препаратов в полимерную основу

сохраняет их фунгицидное действие, в том числе высокую эффективность в отношении наиболее вредоносных патогенов – *F. fujikuroi*, *F. solani*, *P. infestans* и *R. solani*.

Эффективность депонированных форм фунгицидов в подавлении возбудителей корневых гнилей пшеницы и ячменя в лабораторных условиях. Поскольку тип наполнителя не оказывал существенного влияния на разрушаемость гранул в почве, кинетику выхода действующих веществ и фунгицидную активность, для дальнейших исследований с участием тестовых растений отобраны формы в виде гранул состава П(ЗГБ)/опилки/фунгицид, которые обеспечивали постепенную деградацию гранул, стабильный выход препаратов из формы и пролонгированное фунгицидное действие до 3-х и более месяцев.

При выращивании тестовых растений пшеницы и ячменя в условиях фитотрона было показано, что депонированные и свободные формы тебуконазола и эпоксиконазола снижали общую численность микромицетов в ризосферной почве, в то время как в ризосфере интактных растений (отрицательный контроль) она достоверно не изменялась и составляла 30-35 тыс. КОЕ в 1 г почвы (рис. 2). В фазу всходов (7-14 сут.) свободные фунгициды были активнее депонированных форм и снижали численность микромицетов в ризосфере пшеницы в 2,1-3,3 раза и ячменя в 2,1-2,4 раза в сравнении с отрицательным контролем. В фазу кущения и далее фунгицидное действие свободных форм ТЕБ и ЭПОК ослабевало, и численность микромицетов возрастала, тогда как депонированные формы обеспечивали стабильное снижение численности микромицетов в течение всего периода наблюдений: от 1,7 до 2,7 раза в ризосфере пшеницы и от 1,5 до 2,2 раза в ризосфере ячменя.

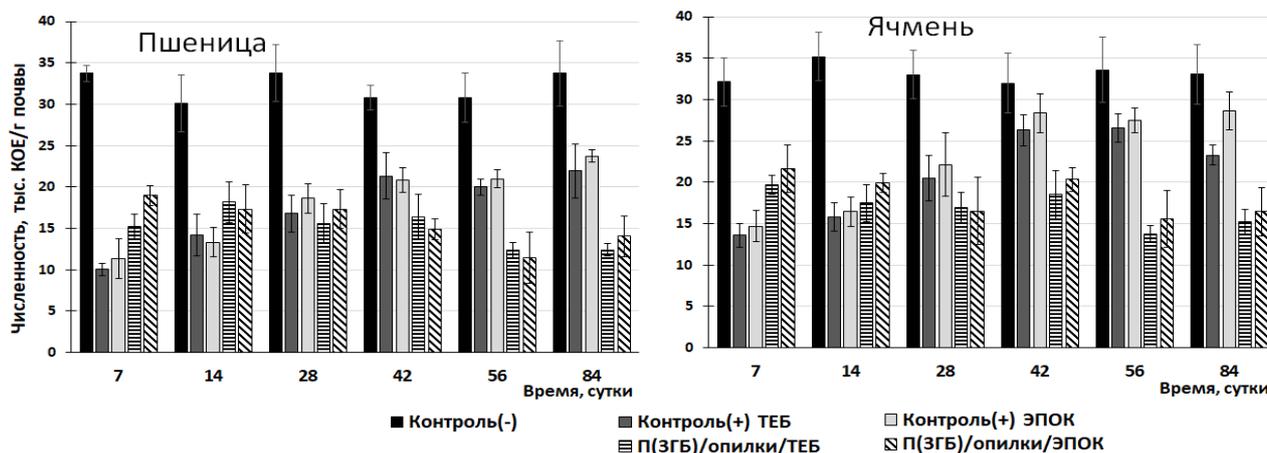


Рисунок 2 – Динамика численности микромицетов в ризосфере пшеницы и ячменя при различных формах доставки фунгицида в лабораторном опыте

Анализ таксономического состава микромицетов показал, что в ризосфере интактных растений в течение всего эксперимента сохранялось доминирование грибов рода *Trichoderma*, доля которых варьировала в разные сроки от 35 до 51 %. Вторым по численности был род *Penicillium*, доля которого составляла от 12 до 25 %. Количество фитопатогенных грибов (*Alternaria* + *Fusarium*) в почве без внесения фунгицидов постепенно

увеличивалась и к концу эксперимента достигла 17% в ризосфере пшеницы и 22% в ризосфере ячменя. Внесение депонированных ТЕБ и ЭПОК эффективно сдерживало рост фитопатогенов *Alternaria* и *Fusarium* в почве в течение всего срока вегетации ниже порога обнаружения. Среди сапротрофных грибов к 84 суткам эксперимента отмечали увеличение доли *Trichoderma* и *Penicillium*. Таксономическое разнообразие сообщества сапротрофных микромицетов также увеличивалось при внесении депонированных ТЕБ и ЭПОК, что указывает на отсутствие токсического действия форм на полезную микробиоту. При внесении свободных ТЕБ и ЭПОК фитопатогенные грибы в начальные сроки не были обнаружены, однако после 42 суток стали выявляться виды рода *Fusarium* от 2 до 5,6%.

Для определения зараженности растений возбудителями корневых гнилей (*Alternaria*, *Fusarium* и *Bipolaris*) проведено обследование корневой системы пшеницы и ячменя и определена доля зараженных растений в выборке (%). На основе этого показателя рассчитана биологическая эффективность фунгицидных препаратов, т.е. подавление корневых гнилей в сравнении с отрицательным контролем (табл. 1).

Таблица 1 – Зараженность корней зерновых культур (Р, %) и биологическая эффективность (С, %) депонированных и свободных форм тебуконазола и эпоксиконазола (лабораторный опыт)

Фазы жж роста	Отрицательный контроль	Свободные фунгициды				Депонированные фунгициды			
		ТЕБ		ЭПОК		П(ЗГБ)/ опилки/ ТЕБ		П(ЗГБ)/ опилки/ ЭПОК	
		<i>P</i>	<i>C</i>	<i>p</i>	<i>C</i>	<i>p</i>	<i>C</i>	<i>p</i>	<i>C</i>
<i>Пшеница</i>									
Всходы	20,8±8,3	10,0±5,3	52,0	12,0±3,6	42,4	16,7±4,2	20,0	20,3±4,1	2,6
Кущение	29,2±3,3	7,8±2,5	73,3	8,5±2,2	70,9	8,3±2,2	71,4	12,6±2,3	56,8
Выход в трубку	29,2±4,2	9,0±2,0	69,1	8,3±3,0	71,4	4,2±1,8	85,7	3,2±1,2	89,0
Колошение	32,0±4,2	9,7±2,3	69,7	11,0±2,6	65,6	5,0±1,6	84,4	4,0±1,3	87,5
Созревание	33,2±5,5	10,3±2,1	69,0	13,0±1,8	60,8	4,0±1,1	88,0	3,0±0,3	91,0
<i>Ячмень</i>									
Всходы	33,3±4,0	12,5±4,2	62,5	12,0±4,2	64,0	16,7±7,0	50,0	16,0±2,3	52,0
Кущение	41,7±4,2	8,3±3,1	80,0	10,0±1,7	76,0	8,3±3,2	80,0	8,3±2,2	80,0
Выход в трубку	41,7±8,3	9,0±2,4	78,4	12,0±2,3	71,2	6,0±2,1	85,6	8,0±1,5	80,8
Колошение	45,0±7,2	11,0±2,0	75,6	13,0±3,1	71,1	6,0±1,2	86,7	7,0±1,6	84,4
Созревание	47,0±7,5	12,0±3,2	75,1	15,0±3,2	69,1	4,0±0,8	92,3	6,5±1,3	86,2
<i>P</i> – уровень зараженности корней в отрицательном контроле; <i>p</i> – уровень заражения корней при использовании свободных или депонированных фунгицидов. Жирным шрифтом обозначены достоверные различия с отрицательным контролем (<i>p</i> < 0,05).									

В отрицательном контроле зараженность корней нарастала в динамике, достигая от 20,8% до 33,2% для пшеницы и от 33,3% до 47% для ячменя. При внесении ТЕБ и ЭПОК в свободном виде фунгицидный эффект проявлялся уже

в фазу всходов; биологическая эффективность ТЕБ составляла 52%, ЭПОК – 42,4%. Фунгицидное действие депонированных форм в этот период было выражено слабее, что связано с постепенным выходом препарата из гранул. Тем не менее, в дальнейшие фазы роста зараженность корней при внесении депонированных форм ТЕБ и ЭПОК была ниже, чем при свободных, а биологическая эффективность также превышала действие свободных форм препаратов, достигая к моменту созревания зерна 88-91% на пшенице и 86,2-96,2% на ячмене. Это свидетельствует об эффективности депонированных препаратов и их пролонгированном действии.

При использовании депонированных форм фунгицидов ТЕБ и ЭПОК получена выраженная положительная динамика оздоровления ризосферной почвы и корневой системы пшеницы и ячменя в течение всего эксперимента. Кроме того, наблюдали увеличение длины корней при внесении депонированного ТЕБ в 1,5 раза по сравнению с группами интактных растений. Таким образом, экспериментальные формы фунгицидов стимулировали развитие корневой системы и надземной части растений. В конце эксперимента биомасса растений при использовании экспериментальных форм ТЕБ и ЭПОК была достоверно выше – на 20-28 % для пшеницы и на 15-18 % для ячменя, чем в группах со свободными формами фунгицидов.

Оценка эффективности депонированных форм фунгицидов в подавлении возбудителей болезней картофеля в лабораторных условиях. В лабораторной культуре исследованы экспериментальные формы фунгицидов и их коммерческие аналоги на тестовых растениях картофеля сорта Красноярский ранний. В состав фунгицидных гранул были включены азоксистробин (П(ЗГБ)/опилки/АЗК), дифеноконазол (П(ЗГБ)/опилки/ДИФ) или смесь азоксистробин+мефеноксам (П(ЗГБ)/опилки/АЗК+МЕФ). Положительный контроль – коммерческие фунгициды Квадрис (АЗК), Скор (ДИФ) и Юниформ (АЗК+МЕФ).

Микробиологический анализ почвы показал, что все депонированные формы фунгицидов снижали общую численность микромицетов на протяжении 60 суток эксперимента. В группах положительного контроля, обработанных препаратами Квадрис и Юниформ, выраженный фунгицидный эффект проявлялся в течение 30 суток, численность микромицетов была ниже в 1,3 раза по сравнению с отрицательным контролем, однако к концу эксперимента достоверных различий с контролем уже не было. Наибольшее фунгицидное действие проявляли коммерческая и депонированная формы дифеноконазола, снижая численность микромицетов в 4,6 и 3,1 раза, соответственно. В то же время препарат Скор оказывал негативное влияние на почвенные бактерии: сначала снижал их общую численность в 2,1 раза по сравнению с депонированной формой ДИФ, а затем увеличивал в 2,3 раза; кроме того, опрыскивание препаратом Скор приводило к доминированию грамотрицательных бактерий (более 83% изолятов) и пигментированных форм (более 65% колоний), что указывает на наличие стрессового фактора, влияющего на почвенную микробиоту. Остальные формы фунгицидов не оказывали значимого влияния на ризосферные бактерии. Можно предположить,

что препарат Скор вносил дисбаланс в ризосферное микробное сообщество, тогда как депонированная форма ДИФ была менее токсичной.

Установлено, что внесение депонированных фунгицидных препаратов положительно влияло на всхожесть, рост и развитие растений картофеля. При внесении депонированных форм фунгицидов зафиксировано более раннее появление всходов (13-е сутки), чем в контролях (18-е сутки). В ходе эксперимента на растениях были обнаружены только симптомы ризоктониоза. В группе интактных растений отмечено наиболее выраженное проявление ризоктониоза (7 баллов); в экспериментальных группах с гранулами АЗК и ДИФ и соответствующих группах положительного контроля Квадрис и Скор растения были поражены ризоктониозом в меньшей степени (8 баллов); в вариантах с депонированными АЗК+МЕФ и коммерческим аналогом Юниформ на растениях симптомы не обнаружены (9 баллов).

При выращивании интактных растений большинство образовавшихся микроклубней имели незначительные поражения ризоктониозом (*Rhizoctonia solani*) и паршой обыкновенной (*Streptomyces scabies*), при этом площадь поражения составляла менее 1%. При использовании препарата Юниформ, а также депонированного комплекса АЗК+МЕФ, поверхностные признаки поражения фитопатогенами отсутствовали. Прибавка урожайности к контролю в этих вариантах составила 47,5 и 71,3% соответственно.

Эффективность депонированных форм фунгицидов в подавлении возбудителей корневых гнилей пшеницы и ячменя в полевых условиях. Высокая эффективность депонированных фунгицидных препаратов в условиях лабораторного эксперимента позволила перейти к полевым испытаниям. На зерновых культурах оценивали эффективность комплексного депонированного препарата, в состав которого входил фунгицид тебуконазол и гербицид трибенурон-метил: П(ЗГБ)/опилки/ТЕБ+ТРИБ. Положительный контроль – обработка коммерческими препаратами Бункер (ТЕБ) и Мортира.

В полевой сезон 2020 г. динамика численности микромицетов в разных вариантах опыта соответствовала сезонным колебаниям. Внесение в почву гранул, содержащих ТЕБ, оказывало стабильное фунгицидное действие в ризосфере пшеницы и ячменя до конца вегетации, численность микромицетов снижалась в 1,3-2 раза по сравнению с ризосферой интактных растений (рис. 3).

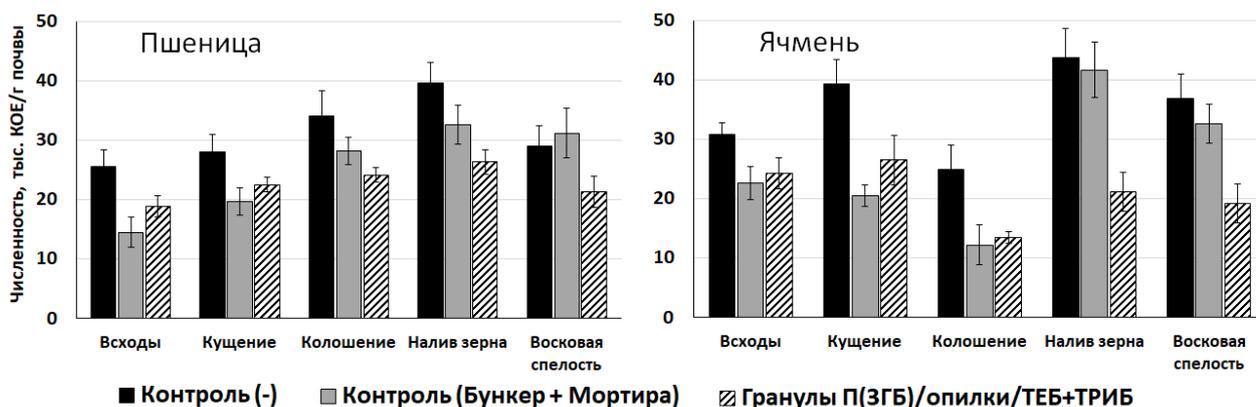


Рисунок 3 – Динамика численности микромицетов в ризосфере пшеницы и ячменя при различных формах доставки фунгицида в полевых условиях

Предпосевное протравливание семян препаратом Бункер подавляло развитие микромицетов в ризосфере растений в первой половине вегетационного периода – в 1,7-2 раза по сравнению с негативным контролем. После фазы колошения фунгицидный эффект ослаблялся, а численность микромицетов достоверно не отличалась от контроля. Депонированный тебуконазол эффективно сдерживал развитие комплекса фитопатогенных грибов в ризосфере растений. *Alternaria spp.* и *Bipolaris sorokiniana* не выявлялись в течение всего периода вегетации; *Fusarium spp.* были обнаружены только в период всходов (3,6-5,6%) а в последующие сроки их количество было ниже порога обнаружения. Доля сапротрофных представителей *Penicillium* и *Trichoderma* при внесении депонированного ТЕБ возрастала, позитивно влияя на состояние ризосферного пространства растений. Протравливание семян препаратом Бункер подавило развитие *Fusarium spp.*, *Alternaria spp.* и *Bipolaris sorokiniana* в ризосфере растений в первые фазы роста. Однако в фазу колошения и последующие сроки суммарная доля этих представителей возрастала до 9,1% популяции микромицетов в ризосфере пшеницы и 10,9% - в ризосфере ячменя.

Показателем биологической эффективности двух форм фунгицида тебуконазола являлось снижение распространения корневых гнилей, возбудителей которых определяли на корнях пшеницы и ячменя во влажных камерах. В отрицательном контроле зараженность корней ячменя и пшеницы в фазу всходов составляла 3,0-3,5%, постепенно нарастая к фазе восковой спелости до 30,6 и 42,4% для пшеницы и ячменя соответственно (табл. 2).

Таблица 2 – Зараженность корней зерновых культур (*P*, %) и биологическая эффективность (*C*, %) депонированных и свободных форм тебуконазола и эпоксиконазола (полевой опыт)

Фазы роста	Отрицательный контроль (без фунгицидов)	Бункер + Мортира		П(ЗГБ)/опилки/ТЕБ+ТРИБ	
	<i>P</i>	<i>p</i>	<i>C</i>	<i>p</i>	<i>C</i>
<i>Пшеница</i>					
Всходы	3,5 ± 1,0	1,0 ± 0,1*	71,4	0,0	100
Кущение	9,4 ± 1,8	2,0 ± 0,5	78,7	2,5 ± 0,8	73,4
Колошение	16,3 ± 2,0	4,8 ± 0,9	70,6	4,0 ± 1,0	75,5
Налив зерна	25,5 ± 3,5	8,8 ± 1,2	65,5	3,5 ± 0,7	86,3
Восковая спелость	30,6 ± 4,2	10,2 ± 3,3	66,7	3,5 ± 1,0	88,6
<i>Ячмень</i>					
Всходы	3,0 ± 0,9	0,0	100	0,0	100
Кущение	12,5 ± 3,6	3,5 ± 1,1	72,0	4,0 ± 1,0	68,0
Колошение	22,3 ± 8,5	5,9 ± 1,6	73,5	4,5 ± 1,1	79,8
Налив зерна	36,7 ± 11,7	12,8 ± 3,2	65,1	5,5 ± 1,3	85,0
Восковая спелость	42,2 ± 12,9	16,4 ± 4,4	61,3	4,0 ± 0,9	90,6
<i>P</i> – уровень зараженности корней в отрицательном контроле; <i>p</i> – уровень заражения корней при использовании свободных или депонированных фунгицидов.					
* Шрифтом выделены достоверные различия с отрицательным контролем (<i>p</i> < 0,05).					

Фунгицидное действие депонированного ТЕБ и протравителя Бункер обеспечило эффективное подавление распространения корневой инфекции. В фазе всходов биологическая эффективность препаратов достигала 71,4-100%. От фазы кущения до фазы колошения уровень зараженности растений корневыми гнилями при разных формах доставки тебуконазола достоверно не различался. В дальнейшем, от фазы колошения до восковой спелости, фунгицидная активность протравителя Бункер постепенно снижалась, тогда как действие депонированного ТЕБ, проявлялось более выражено и в фазу полной спелости достигло 88,6% на пшенице и 90,6% на ячмене, превышая эффективность протравителя Бункер.

Таким образом, в полевых экспериментах в течение полного вегетационного периода от фазы всходов до созревания зерна показано эффективное оздоровление корневой системы пшеницы и ячменя при использовании депонированного комплекса П(ЗГБ)/опилки/ТЕБ+ТРИБ. Обладая системным действием, фунгициды на основе триазолов не только защищают корни, но и проявляют стимулирующую активность, оказывая влияние на физиологические процессы в растениях - активируют биосинтез хлорофиллов, повышают содержание CO_2 в клетках и пролонгируют фотосинтетическую активность, что положительно сказывается на урожайности (Зубко, Долженко, 2023). Учет структуры урожая зерновых культур показал, что защита растений от болезней способствовала увеличению урожайности и улучшению качества зерна. Применение средств защиты растений на посевах пшеницы и ячменя обеспечило повышение качества зерна до 1 класса, а также способствовало повышению формирования белкового компонента.

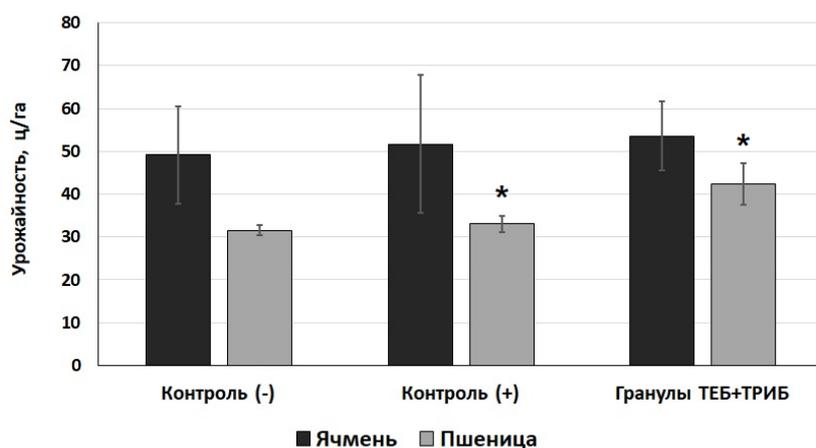


Рисунок 4 – Урожайность ячменя и пшеницы;
* - достоверные различия с отрицательным контролем

Не выявлено достоверного влияния формы внесения фунгицидного препарата на урожайность ячменя по причине высокой вариации этого показателя, хотя отмечена тенденция к увеличению в сравнении с отрицательным контролем (рис. 4). В то же время урожайность пшеницы при использовании экспериментальной формы тебуконазола достоверно увеличилась – на 9,2 ц/га по сравнению с положительным контролем и на 10,8 ц/га по сравнению с отрицательным контролем.

Оценка эффективности депонированных форм фунгицидов в подавлении возбудителей болезней картофеля в полевых условиях.

Следующим этапом исследования была оценка эффективности депонированных фунгицидных препаратов в полевом эксперименте на двух сортах картофеля – Красноярский ранний и Леди Клэр. Полевой сезон 2021 года в целом для производства картофеля в России сложился как неблагоприятный. Июнь был достаточно холодным с неравномерным количеством осадков: в первые две декады выпало мало осадков, а третьей декаде – 100 мм. Июль характеризовался резким подъемом температуры воздуха, практически полным отсутствием осадков в первой декаде и незначительным количеством в двух последующих (50-60% от среднеголетних значений). Август был жарким, температура воздуха превышала среднеголетний показатель на 3 °С, осадков выпало 43 мм, что ниже среднеголетнего уровня. Погодные условия повлияли на активность почвенной микробиоты как главного фактора деструкции полимерной основы, а также на развитие фитопатогенных грибов и поражение картофеля возбудителями.

В фазу полных всходов (июнь) численность микромицетов во всех вариантах достоверно не отличалась от отрицательного контроля (рис. 5). В июле (начало фазы цветения) в ризосфере интактных растений численность микромицетов не изменилась по сравнению с предыдущим месяцем.

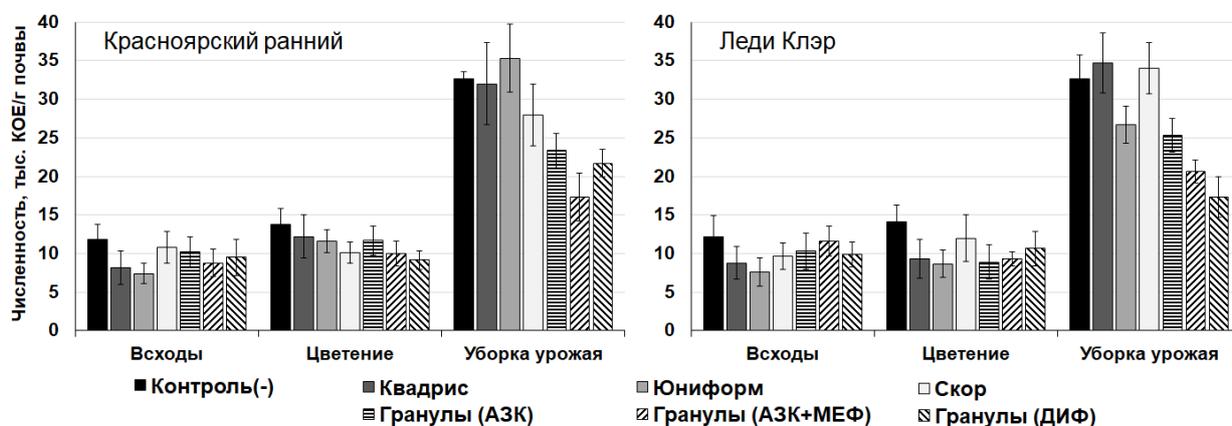


Рисунок 5 – Динамика численности микромицетов в ризосфере картофеля при различных формах доставки фунгицидов

Применение депонированной и свободной формы фунгицидов, содержащих дифеноконазол, снизило численность микромицетов в ризосфере картофеля Красноярский ранний в 1,5 раза по сравнению с отрицательным контролем. В ризосфере сорта Леди Клэр более эффективно снижали численность микромицетов препараты, содержащие азоксистробин и мефеноксам. В теплое и влажное лето (конец фазы цветения) отмечен резкий рост количества микромицетов в ризосфере интактных растений и в вариантах с обработкой коммерческими препаратами. В почве с депонированными формами фунгицидов численность микромицетов была достоверно ниже по сравнению с отрицательным и соответствующими положительными контролями. Такая динамика указывает на активное

поступление в почву фунгицидных препаратов из депонированных форм в августе. Анализ таксономического состава микромицетов почвы показал, что депонированные формы фунгицидов эффективно снижали численность *Fusarium* и *Alternaria*. Если в отрицательном контроле их доля составляла 12% от общего числа микромицетов для сорта Красноярский ранний и 17% для сорта Леди Клэр, то в вариантах с внесением депонированных форм представители данных родов обнаружены не были. В вариантах с использованием свободных форм их доля составляла 6-8% для сорта Красноярский ранний и 4-6% для сорта Леди Клэр.

Оценка состояния надземной части растений в течение вегетации выявила низкую зараженность интактных растений альтернариозом: 2% для сорта Леди Клэр и 2,5% - Красноярский ранний. Все депонированные формы фунгицидов сдерживали поражение картофеля альтернариозом: от 29 до 95% на сорте Красноярский ранний и от 51 до 67% на сорте Леди Клэр. Однако максимальный защитный эффект был получен при трехкратном опрыскивании растений препаратом Скор (специализированный фунгицид против альтернариоза): зараженность снизилась на 94-98%.

Развитие фитофтороза в посадках обоих сортов картофеля во второй половине августа носило взрывной характер. Степень поражения интактных растений обоих сортов составляла более 30%. Большинство примененных фунгицидных препаратов, независимо от формы доставки, не оказали сдерживающего эффекта на распространение фитофтороза у сорта Леди Клэр. Такой эффект связан с очень низкой устойчивостью ультрараннего сорта Леди Клэр к фитофторозу, особенно с увеличением возраста растений. В посадках картофеля сорта Красноярский ранний максимальный защитный эффект получен от применения депонированной формы комплекса двух фунгицидов АЗК+МЕФ и его коммерческого аналога Юниформ, зараженность растений фитофторозом в этих вариантах снизилась на 60%.

Защитный эффект фунгицидов в большей степени проявлялся на клубнях картофеля, чем на надземной части вегетирующих растений. Клубневой анализ урожая показал наличие симптомов ризоктониоза и фитофтороза. Степень поражения клубней сорта Красноярский ранний была значительно меньше, чем сорта Леди Клэр: в группах отрицательного контроля распространенность ризоктониоза была ниже в 2 раза, а фитофтороза – в 8 раз (табл. 4).

Для сорта Красноярский ранний все типы фунгицидов обеспечили полную защиту от фитофтороза. Для сорта Леди Клэр в группах применения депонированных фунгицидов распространенность фитофтороза не превышала 2%. Распространенность ризоктониоза на клубнях Красноярского раннего максимально снижалась при внесении гранул с азоксистробиним и комплексом азоксистробина и мефеноксама: биологическая эффективность достигала 94,4%. Из коммерческих препаратов эффективную защиту обеспечил Юниформ с показателем 92,8%. На картофеле сорта Леди Клэр биологическая эффективность всех депонированных форм фунгицидов превышала их коммерческие аналоги. Максимальное значение также было отмечено для комплексных гранул АЗК+МЕФ (84,6%).

Таблица 4 – Распространенность заболеваний на клубнях картофеля (%) и биологическая эффективность (С) при различных способах доставки фунгицидов

Форма препарата	Красноярский ранний			Леди Клэр		
	Ризоктониоз	Фитофтороз	С, %	Ризоктониоз	Фитофтороз	С, %
Контроль (-)	16	2	-	32	16	-
Квадрис	5,4	0	70,0	27	2	39,6
Юниформ	1,3	0	92,8	22	6	41,7
Скор	7	0	61,1	40	4	8,3
Гранулы (АЗК)	1	0	94,4	24	2	45,8
Гранулы (АЗК+МЕФ)	1	0	94,4	5,4	2	84,6
Гранулы (ДИФ)	5	0	72,2	20	2	54,2

Стробилурины (в т.ч. азоксистробин) оказывают влияние на регуляцию метаболизма растений: ингибируют биосинтез этилена и образование активных форм кислорода, замедляя старение листьев; активизируют нитратредуктазу, улучшая азотное питание; оказывают иммуностимулирующее действие на растения (Зубко, Долженко, 2023; Kuznetsova et al., 2009). Сочетание высокой биологической активности фунгицидов и их физиологического действия обеспечило получение качественных клубней картофеля и прибавку к урожаю. Урожайность сорта Красноярский ранний была выше по сравнению с сортом Леди Клэр по всем вариантам опыта. В группе отрицательного контроля у сорта Леди Клэр урожайность составила $(11,3 \pm 1,1)$ т/га, у сорта Красноярский ранний – $(14,4 \pm 2,2)$ т/га. Наибольшая прибавка урожая относительно отрицательного контроля у сорта Красноярский ранний отмечена при внесении гранул азоксистробина (61,8%) и в варианте применения комплексных гранул с АЗК+МЕФ (56,3 %); в группе с гранулами ДИФ показатели были статистически не значимыми. Сорт Леди Клэр на фоне пониженной урожайности позитивно реагировал на применение фунгицидов. При этом самая высокая прибавка урожая (32,7 %) получена в экспериментальном варианте с применением комплекса двух депонированных фунгицидов; эффект отдельного применения гранул азоксистробина или дифеноконазола значительно уступал. В целом, применение депонированных фунгицидов в большинстве вариантов опыта значительно повышало урожайность по сравнению с интактными растениями; при этом статистически значимо в случае применения депонированного азоксистробина или комплекса азоксистробин + мефеноксам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение были сделаны следующие выводы:

1. С использованием трехкомпонентных смесей П(ЗГБ)/наполнитель/фунгицид разработаны экспериментальные формы фунгицидных препаратов эпоксиконазола, азоксистробина, тебуконазола,

дифеноконазола и мефеноксама в виде гранул, обеспечивающих пролонгированное действие фунгицидов в почве до конца вегетационного периода.

2. Интенсивность деградации экспериментальных форм и кинетика высвобождения действующего вещества зависела от растворимости фунгицида и не изменялась существенно при использовании различных наполнителей. Период полураспада для гранул с более растворимым мефеноксамом составлял от 56-70 суток, для гранул с малорастворимыми фунгицидами – более 80 суток.

3. Депонированные фунгицидные препараты снижали численность почвенных микромицетов в 1,2-4,4 раза, подавляя рост *Alternaria spp.*, *Fusarium spp.* и *Bipolaris sorokiniana*. Сапротрофные микромицеты были слабо чувствительны к депонированным формам препаратов и сохраняли видовое разнообразие. Внесение депонированных фунгицидов в почву не оказывало ингибирующего действия на развитие почвенных бактерий, но приводило к изменению соотношения таксонов доминирующих культивируемых бактерий в сторону увеличения доли протеобактерий и актинобактерий.

4. Экспериментальные формы фунгицидных препаратов подавляли рост мицелия фитопатогенных грибов *in vitro*, уменьшая диаметр колоний в 1,2-2,8 раза по сравнению с контрольной группой без фунгицидов; эффективность депонированных форм была сопоставима со свободными фунгицидами и их коммерческими аналогами.

5. В лабораторных условиях применение депонированных форм фунгицидов снижало распространение болезней корневой системы зерновых культур и увеличивало продукцию биомассы надземной части. Биологическая эффективность депонированных форм тебуконазола и эпоксиконазола достигала 88,0-91,0% для пшеницы и 92,3-86,2% - для ячменя, что превышало эффективность свободных форм фунгицидов. При выращивании картофеля экспериментальный комплексный препарат с двумя фунгицидами азоксистробин+мефеноксам обеспечивал эффективную защиту от ризоктониоза и увеличил продукцию микроклубней в 1,7 раза по сравнению с интактными растениями.

6. Депонированные фунгицидные препараты показали высокую биологическую эффективность и пролонгированное защитное действие при выращивании зерновых культур и картофеля в полевых условиях. Для пшеницы биологическая эффективность составила 88,6%, для ячменя – 90,6%. На растениях картофеля сорта Красноярский ранний наибольшая биологическая эффективность отмечена для комплексного препарата, содержащего азоксистробин и мефеноксам – 94,5%. Для сорта Леди Клэр биологическая эффективность всех депонированных препаратов была сопоставимой. Использование депонированных фунгицидов повышало урожайность, улучшало качество зерна пшеницы и ячменя и увеличивало долю товарного картофеля.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в международные реферативные базы и системы цитирования

1. Prudnikova, S. The effect of the pesticide delivery method on the microbial community of field soil / S. Prudnikova, **N. Streltsova**, T. Volova // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – Т. 28. – С. 8681-8697. DOI: 10.1007/s11356-020-11228-7
2. Kiselev, E. G. Effectiveness of slow-release fungicide formulations for suppressing potato pathogens / E. G. Kiselev, S. V. Prudnikova, **N. V. Streltsova**, T. G. Volova // Pest Management Science. – 2022. – Т. 78. – №. 12. – С. 5444-5455. DOI: 10.1002/ps.7167
3. Prudnikova, S.V. Fungicidal activity of slow-release formulations of tebuconazole and epoxiconazole to control root rot pathogens of cereal crops / S.V. Prudnikova, N.G. Menzianova, S.A. Pyatina, **N. V. Streltsova**, S. Thomas, T.G. Volova // Physiological and Molecular Plant Pathology. – 2023. – Vol. 128. – 102166. DOI: 10.1016/j.pmp.2023.102166

Статьи в научных журналах

4. Прудникова, С.В. Оценка микробиологических показателей агрочерноземов опытных хозяйств Красноярской лесостепи / С.В. Прудникова, **Н.В. Стрельцова**, В.Н. Романов, Н.Л. Кураченко // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2021. – №. 9 (174). – С. 16-23.
5. **Стрельцова, Н.В.** Влияние депонированной формы комплексного пестицидного препарата на структуру урожая зерновых культур и заболеваемость корневыми гнилями [Электронный ресурс]/ **Н.В. Стрельцова**, С.В. Прудникова, Н.Л. Кураченко, В.Л. Бопп // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. - №1 (55). – Режим доступа: https://agroecoinfo.ru/STASTA/2023/1/st_126.pdf

Глава в коллективной монографии

6. Kiselev, E.G. Degradable polymers for the development of effectiveness of slow-release fungicide formulations for suppressing potato pathogens/ E.G. Kiselev, S.V. Prudnikova, **N.V. Streltsova**, T.G. Volova, S. Thomas / In: L.S. Torre, J.C. Contreras-Esquivel, A.R. Abraham, A.K. Naghi (Eds.) Bioresources and Bioprocess in Biotechnology for a Sustainable Future (1st ed.). – New York: Apple Academic Press, 2024. – 354 p. <https://doi.org/10.1201/9781003410041>

Тезисы докладов и материалы конференций

7. Prudnikova S. The development of slow-released fungicide preparations based on biodegradable poly(3-hydroxybutyrate) to suppress root-rot pathogenic fungi / S. Prudnikova, **N. Streltsova**, T. Volova // 19th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM. – 2019. - №19. – P. 213-220.
8. **Стрельцова Н. В.** Эффективность депонированных форм фунгицидов в борьбе с корневыми гнилями зерновых культур / **Стрельцова Н. В.** // Сб. тез. 58-й Международной научной студенческой конференции (МНСК-2020), Новосибирск, 10-13 апреля 2020. – С. 21.

9. **Стрельцова Н. В.** Эффективность пролонгированных препаратов фунгицидного действия на основе поли(3-гидроксипропирата) в борьбе с корневыми гнилями зерновых культур / **Н. В. Стрельцова** // Актуальная биотехнология. – 2020. - №3 (34). – С. 184-186.
10. **Стрельцова Н. В.** Влияние депонированных форм фунгицидов на почвенный микробиом в лабораторных условиях / **Н. В. Стрельцова**, Д. А. Демьянчук // Мат. IV Международной научной конференции «Биотехнология новых материалов - окружающая среда - качество жизни». Красноярск, 10-13 октября 2021. - С. 99-101.
11. **Стрельцова Н. В.** Влияние депонированных фунгицидов на почвенную микрофлору / **Н. В. Стрельцова** // Материалы Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021», 12-23 апреля 2021, Москва. С. 1-2.
12. **Стрельцова Н. В.** Эффективность депонированных форм фунгицидных препаратов в подавлении возбудителей болезней картофеля в полевых условиях / **Н. В. Стрельцова**, С. В. Прудникова // Мат. XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны - 2022», Красноярск, 25-30 апреля 2022. – С. 812-815.
13. **Стрельцова Н. В.** Эффективность фунгицидных препаратов длительного действия относительно возбудителей грибковых инфекций ячменя / **Н. В. Стрельцова** // Сб. тез. VII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – Наука молодых», 23-26 августа 2022, Новосибирск. – С. 30.
14. Прудникова С.В., **Стрельцова Н.В.** Фунгицидные препараты, депонированные в биоразрушаемую полимерную основу, для борьбы с фитопатогенами сельскохозяйственных культур / С.В. Прудникова, **Н.В. Стрельцова** // Современная микология в России. – Т. 9. Материалы 5 Съезда микологов России. М.: Национальная академия микологии, 2022. – С. 356-358.
15. **Стрельцова Н.В.** Биологическая эффективность длительного действия фунгицидных препаратов, депонированных в основу из биополимера / **Н.В. Стрельцова**, С.В. Прудникова // V Всероссийский конгресс по защите растений. Сборник тезисов докладов. СПб.: ФГБНУ ВИЗР, 2024. – С. 340.