

На правах рукописи



АБДУРАШИТОВА ЭЛЬВИНА РАСИМОВНА

**КОМПЛЕКСНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ БИОАГЕНТОВ
МИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ SORGHUM BICOLOR (L.)
MOENCH В СТЕПНОЙ ЗОНЕ КРЫМА**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма».

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор сельскохозяйственных наук
Паштецкий Владимир Степанович

Официальные оппоненты: **Гоголев Юрий Викторович**
доктор биологических наук, профессор, Казанский институт биохимии и биофизики - структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», лаборатория молекулярной биологии, заведующий;

Сизенцов Алексей Николаевич,
кандидат биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко», кафедра биохимии и микробиологии, доцент.

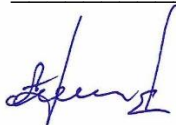
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова».

Защита состоится 17 декабря 2026 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13, ауд. 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко» по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д.13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5595/asp/264>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аринжанов Азамат Ерсайнович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние 30 лет в Крыму наблюдается усиление засухи (Ергина и др., 2018). Если в США погодные условия определяют урожайность на 15%, то в РФ – до 60% (Мерзликин, 2010), в частности в Крыму до 80% (Ергина и др., 2018). При этом лимитирующими факторами служит сумма осадков и величина гидротермического коэффициента (Тимаков и др., 2019; Губанова и Губанов, 2021; Кривошеев и др., 2024), со снижением которых происходят существенные изменения почвенных процессов и физиологическая перестройка растений. В связи с изменениями климата в 50-летнем периоде наблюдений по данным метеостанции Клепинино показано, что нет ни одного года-аналога по засушливости вегетационных периодов (влагообеспеченности) (Попович, 2018).

Почвенная микробиота играет ключевую роль в возникающих обратных связях между растениями и почвой (Venturi, Keel, 2016). Микробное сообщество является одним из наиболее чувствительных экологических индикаторов, которое первым реагирует на изменения окружающей среды, и маркер различных стадий почвовосстановления, поскольку способно в короткие сроки адаптироваться к изменяющимся условиям, максимально осваивая все доступные экологические ниши (Андронов и др., 2015; Дубинина, Лыхман, 2019; Bulgarelli et al., 2013; Kichko et al., 2023). Микробиом почвы чувствителен к воздействию различных факторов, включая и системы земледелия, определяющие активность и направленность биологических процессов в агроценозах (Свиридова и др., 2016; Чирак и др., 2013; Tikhonovich, Provorov, 2011; Mathew et al., 2012; Choudhary et al., 2018; Schmidt et al., 2018). Расширить знания о таксономической структуре микробиомов различных экологических ниш, включая почву, позволяет применение способа высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК (Fierer et al., 2012; Feng et al., 2018).

В настоящее время поиск биопрепаратов комплексного действия на основе эффективных штаммов бактерий, повышающих продуктивность – улучшая азотное и фосфорное питание растений (Черемисин, Кумпан, 2017; Достижения и перспективы, 2023; Иванистов и др., 2023), а также устойчивость растения к стрессовым воздействиям различных экологических факторов (Злотников, 2012; Chen, 2025) является проблемой при интенсификации сельского хозяйства, не только как конкурентноспособного средством химических препаратов, но и избирательного к растениям (Влияние инокуляции, 2020; Овсянников, 2024).

Опыт ведения земледелия показывает, что агроэкосистема, в которой почва не возделывается – прямой посев (no-till) может эффективно использоваться в сельскохозяйственном производстве (Экологическая оценка..., 2018). Агроэкосистема прямого посева лучше реализуется на богарных полях в засушливом климате, при этом урожайность зачастую равна или выше, чем при системе с обработкой почвы, и, вместе с этим, способствует повышению плодородия почвы (Büchi et al., 2017; Obour et al., 2021). Выбор культуры является важным фактором, влияющим на общую реакцию урожайности при нулевой обработке почвы (Pittelkow et al., 2015). Одна из культур, которую выращивают в ресурсосберегающих агроэкосистемах в засушливых условиях – это *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Оно занимает в мировом земледелии 39–41 млн га (6–7-е место среди всех культур), 25–30 % из которых это площади под no-till (FAO).

Исследования физиологических процессов у растений под влиянием микробных комплексов (штаммов бактерий и эндомикоризных грибов) как в оптимальных

условиях произрастания, так и в экстремальных, представляют научную значимость для обоснования перспектив выращивания сорго. Основными достоинствами сорго зернового являются: исключительная засухоустойчивость, солевыносливость, высокая продуктивность, хорошие кормовые достоинства, способность снижать засоренность полей и предохранять их от эрозии (Кибальник и др, 2019; Dugas et al., 2011). В результате нарушений водного режима, в растениях изменяются физиолого-биохимические процессы: особенно резко снижается фотосинтез, активизируются ферменты оксидоредуктаз и увеличивается содержание пролина, выполняющего антиоксидантную, сигнально-регуляторную и осмопротекторную функции, используемые растениями для повышения устойчивости к биотическому и абиотическому стрессу (Маевская, Николаева, 2013; Колупаев и др., 2014; Курьянчик, 2023; Thalooth et al., 2006).

В связи с этим в современных условиях требуется комплексная экологическая оценка при выращивании сорго зернового с применением биоагентов микробных препаратов, основанного на методах биохимии, экологии, биотехнологии, агротехнологии и генетики. Поскольку в России увеличиваются площади выращивания сорго, исследования по изучению доминантов направленности биологической активности почвы, отражающих состояние биохимических процессов и физиологического статуса растения в условиях недостаточного водообеспечения, являются актуальными и важными для выработки стратегии ведения сельского хозяйства, направленной на сохранение плодородия почв и стабилизацию агроэкосистем.

Степень разработанности. Доказана эффективность ризобактерий для повышения продуктивности и стрессоустойчивости злаков (Роль бактерий, 2021; Prathap, Ranjitha, 2015; Li et al., 2019; Chandra et al., 2018; Hafez et al., 2020; Chen et al. 2022), в том числе у сорго в засушливых регионах (Африка, Индия, США) (Chaturvedi et al., 2022; Birhanu, Negussie, 2024). Разработаны российские биопрепараты на основе ризобактерий для зерновых культур (Завалин, 2005; Злотников А.К., Злотников К.М., 2007; Новые технологии, 2010; патент RU 2661815 C2, 2018; Каменева и др., 2019; Патент RU 2676926 C1, 2019; Melnichuk et al., 2020,). Изучено их влияние на физиологию растений и плодородие почв (Проворов и Тихонович, 2022; Биопрепарат на основе, 2023; Влияние штаммов, 2024; Патент № 2823059 C1, 2024). Применение микробных препаратов приводит к снижению химической нагрузки на почвы и повышает биоразнообразие микробного сообщества (Ассоциативные микроорганизмы, 2021; Чернов и Семенов, 2021; Биотехнологический потенциал, 2024; Есикова и др., 2025). Однако штаммы-симбионты растений совместно с грибами арбускулярной микоризы для *Sorghum bicolor* изучены не были, также не проводилась комплексная экологическая оценка растений и микробиоты ресурсосберегающей агроэкосистемы при длительном применении биопрепаратов.

Цель исследования – провести комплексную оценку биологической активности чернозема южного и адаптационного потенциала растений *Sorghum bicolor* под влиянием комплекса микроорганизмов при изменении условий его выращивания в степной зоне.

Поставлены следующие **задачи**:

1. Установить влияние традиционной и ресурсосберегающей агроэкосистем на основе *Sorghum bicolor* и комплекса полезных микроорганизмов на таксономическое

разнообразие и функциональную активность микробиоценоза ризосферы в условиях чернозема южного.

2. Оценить адаптационную способность растений сорго зернового под действием двух агроэкосистем и комплекса микроорганизмов при его выращивании в черноземе южном.

3. Провести сравнительный анализ биологической продуктивности сорго зернового в агроэкосистемах прямого посева и традиционной для определения закономерности устойчивого развития растений.

Научная новизна исследований. Впервые в черноземе южном степного Крыма определена таксономическая структура микробиома с доминированием 10 фил прокариот, наиболее представлены *Actinobacteria* (35,4 %) и *Proteobacteria* (23,1 %). Впервые проведен анализ факторов влияния (погодно-климатические и обработка комплексом микроорганизмов) на изменения показателей биологической активности чернозема южного ризосферы *Sorghum bicolor* и на продуктивность. Впервые установлена связь физиологического статуса растений и микробиоценоза почвы с погодно-климатическими факторами. В 2019 г. биомасса зерна коррелировала с активностью каталаз ризосферы $r=-0,89$ и пероксидаз растений $r=0,85$, численностью олиготрофов $r=-0,75$ и педотрофов $r=0,75$ ризосферы; а в 2018 г. и 2020 г. с активностью пероксидаз ризосферы $r = -0,74$ и $r = -0,67$ соответственно.

Теоретическая и практическая значимость работы. Оценены адаптационные механизмы сорго зернового и структура почвенного микробиоценоза для выработки стратегии ведения сельского хозяйства с использованием потенциала растительно-микробного взаимодействия, направленного на сохранение плодородия почв. Результаты исследований полевого эксперимента о микробном обилии и ферментативной активности почвы могут стать основой формирования базы данных характеристики чернозема южного для получения информации о структуре и закономерностях функционирования агроэкосистем. Полученные данные о физиологическом состоянии растений и биологической активности почвы необходимы для определения факторов, влияющих на продуктивность и устойчивость растений к различным условиям среды. Научно-обоснованный способ выращивания сорго зернового при применении комплекса микроорганизмов предлагается использовать в засушливых условиях степной зоны, прибавка биомассы зерна при этом составит 15,6 – 45,9 %.

Результаты исследований включены в курсы лекций по дисциплинам: «Почвенная микробиология» для программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» (06.06.01 Биологические науки), «Экологическая метогеномика и генотипирование организмов» для магистров факультета биологии и химии ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского.

Методология и методы исследования. В работе использовали классические и современные методы биомониторинга: микробиологические (эколого-трофические группы микроорганизмов); молекулярно-генетические (метабаркодинг по гену 16S рРНК); биохимические (титриметрия, спектрофотометрия, газометрия); физические (водный дефицит); статистические и полевого эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые дана комплексная метагеномная характеристика таксономического состава прокариотного биома чернозема южного степной зоны Крыма, включая

определение доминирующих фил, семейств, родов и выявление коровых и уникальных таксонов, а также выявлено, что агроэкосистемы приводят к специфическим изменениям в его составе и увеличению выравненности микробиома при прямом посеве на 15% по сравнению с традиционной системой.

2. Предпосевная инокуляция семян сорго зернового комплексом микроорганизмов (КМ) совместно с агроэкосистемой прямого посева регулирует структуру функциональных групп почвенной микробиоты ризосферы, обеспечивая ее толерантность к погодно-климатическим факторам, а также существенно снижает зависимость ферментативной активности от внешних условий и улучшает биологическое состояние чернозема южного (увеличение интегрального показателя).

3. Применение комплексного подхода, включающего прямой посев и инокуляцию КМ, значительно повышает физиологическую устойчивость растений сорго зернового к засушливым условиям, что проявляется в снижении в листьях накопления пролина и активности пероксидаз.

4. Установлены значимые корреляционные связи между показателями микробиологической и ферментативной активности ризосферы и биомассой зерна сорго зернового в засушливых условиях, подтверждающие, что предпосевная инокуляция семян КМ является эффективным биотехнологическим приемом для управления продуктивностью агроэкосистемы и повышения его экологической целесообразности в условиях степи Крыма.

Личный вклад соискателя. Соискателем сформулированы и поставлены цели и задачи исследований, проанализирована научная литература, подобраны методики, выполнены лабораторные исследования образцов полевого эксперимента, статистическая обработка полученных результатов, их обобщение и сравнительный анализ с литературными данными, а также подготовлены материалы к публикации.

Соответствие темы диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.5.15 «Экология»:

П. 1. Закономерности влияния абиотических и биотических факторов на организмы. Экофизиология (факториальная экология). Адаптации организмов к различным факторам среды. Жизненные формы и адаптивные типы. Изменение организмами среды обитания.

П. 4. Экология сообществ, биоценология. Состав, структура, динамика, факторы формирования и регуляции сообществ. Экологические ниши.

П. 10. Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу.

П. 11. Научное обоснование технологий, замещающих функции природных экосистем. Разработка принципов создания искусственных экосистем и управления их устойчивым функционированием.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты обработаны с применением методов вариационной статистики. Выводы значимы при принятом уровне вероятности $p \leq 0.05$. Кроме стандартных методов по обработке результатов исследований также использовались: биоинформатическая обработка данных NGS, с

диаграммой Венна включительно, доля влияния различных факторов и ИПБС, теплокарта численности микроорганизмов, корреляционный анализ. Результаты полевого эксперимента (поставленного в 3-х кратной повторности) доложены и утверждены на ученом совете ФГБУН «НИИСХ Крыма».

Основные результаты исследований по теме диссертации доложены на Международной научно-практической интернет-конференции «Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования» (с. Соленое займище, 2017); 21-й Международной Пущинской школы-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI века» (г. Пущино, 17 - 21 апреля 2017 г.); III Международной научной конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки» (г. Ялта, 24 сентября 2018 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Аграрная наука - сельскому хозяйству» (г. Барнаул, 07–08 февраля 2019 г.); IV Международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки» (г. Симферополь, 09–13 сентября 2019 г.); IX съезде общества физиологов растений России (г. Казань, 18–24 сентября 2019 г.); 6th International conference on agriproducts processing and farming (г. Воронеж, 17–18 октября 2019 года); Международной научно-практической конференции «Рациональное использование природных ресурсов в агроценозах» (г. Симферополь, 12–13 октября 2020 г.); 2-ой Международной научной конференции PLAMIC2020 (г. Саратов, 5-9 октября 2020 г.); Международной научной экологической конференции «Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения» (г. Краснодар, 29–31 марта 2021 г.); online meeting of Society for In Vitro Biology 2021 (Norfolk, June 5 - 9, 2021); 3-ей Международной научной конференции PLAMIC2022 (г. Санкт-Петербург, 3-8 октября 2022 г.)

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 научных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ и 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация общим объемом 161 страниц состоит из введения, обзора литературы, описания методов исследования. Результаты исследования и их обсуждение описаны в 4 разделе и заключении. Список цитируемой литературы включает 297 источника, из них 158 отечественных и 139 иностранных авторов. Диссертация содержит 35 рисунков, 20 таблиц, 20 приложений.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках государственного задания № 0834-2015-0004 «Экологическое обоснование альтернативных способов улучшения плодородия почвы при разных системах земледелия» и поддержана грантом РФФИ 18-416-910009 p_a «Исследование микробиома чернозема южного при влиянии микробных препаратов и систем земледелия (традиционной и no-till)».

Благодарности. Выражаю благодарность научному руководителю д.с.-х.н. Паштецкому В.С. за помощь в организации исследовательской работы; д.с.-х.н. с.н.с. Мельничук Т.Н. за советы и ценные замечания в диссертационной работе; сотрудникам лаборатории земледелия ФГБУН «НИИСХ Крыма» за содействие в проведении полевых исследований и предоставление погодных данных; сотрудникам Центра коллективного пользования «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ, а также всем сотрудникам отдела сельскохозяйственной

микробиологии за бесценные методические рекомендации в работе и получение опыта в сфере сельскохозяйственной микробиологии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы дано представление: о биолого-экологических особенностях растений *Sorghum bicolor* (L.) Moench; приведена информация о штаммах бактерий и применении агроэкосистемы прямого посева как экологически безопасного пути решения проблем адаптивности сельского хозяйства в степной зоне; рассмотрены подходы к оценке изучения биологической активности почвы под воздействием антропогенных факторов; представлены сведения о физиолого-биологических характеристиках, как индикаторах состояния растений.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе диссертационной работы лежат исследования двух агроэкосистем: традиционной (ТС) для условий Крыма и ресурсосберегающей – прямой посев (ПП) в стационарном опыте (аттестат длительного опыта № 170), заложенном в 2015 году на опытном поле ФГБУН «НИИСХ Крыма» (с. Клепинино, Красногвардейского района, 45°31'48.5"N 34°11'47.9"E) на площади 3,8 га.

Почва – чернозем южный слабогумусный на лессовидных легких глинах. Мощность гумусового горизонта до 40 см. Классификация изучаемой почвы (Драган, 2004): тип-черноземы, подтип южные, род мицелярно-карбонатные, мощность гумусового слоя – маломощные, вид слабогумусированные. В пахотном слое горизонта А (24-36 см) гумуса определенное по методу Тюрина содержится 2,4–2,6% (Половицкий, Гусев, 1987). Обеспеченность элементами питания по методу Мачигина легкогидролизуемого азота составляет 3,0–6,1, а подвижного фосфора и калия соответственно 1,0–2,5 и 18–28 мг/100 г почвы (Драган, 2004). Доступный для растений запас продуктивной влаги колеблется 160–180 мм (Гусев, Колесниченко, 1955), что составляет менее половины от её возможного – 383 мм (Половицкий, Гусев, 1987).

Растения *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Сорго зерновое сорта Крымбел (селекция КФУ им. В.И. Вернадского) представляет собой однолетнее самоопыляющееся растение.

Биоагенты микробных препаратов, включают в себя комплекс микроорганизмов (КМ) полезного действия: *Paenibacillus polymyxa* П – защита от фитопатогенов, *Lelliottia nimipressuralis* 32-3 – ростстимуляция и фосфатмобилизация, *Agrobacterium radiobacter* 204 – улучшение азотного питания растений, а также ассоциация грибов арбускулярной микоризы *Rhizophagus* sp. P3, предоставлены лабораторией физиологии и экологии микроорганизмов ФГБУН «НИИСХ Крыма (<http://ckp-rf.ru/usu/507484/>).

Погодно-климатические условия. Гидротермический коэффициент (ГТК) в 2018 году за вегетационный период (апрель-август) составил 0,65, что соответствует интенсивности засухи – слабая (Страшная и др., 2013), 2019 году ГТК - 0,78 установили отсутствие засухи, 2020 году - засуха средней интенсивности (ГТК 0,59).

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Полевой эксперимент

Особенности формирования урожайности сорго зернового сорта Крымбел под влиянием систем обработки почвы и предпосевной инокуляции семян комплексом микроорганизмов (КМ) изучали в условиях полевого опыта по следующей схеме: 1. Прямой посев (ПП) – контроль (без обработки); 2. ПП + обработка семян КМ; 3. Традиционная система (ТС) – контроль (без обработки); 4. ТС + обработка семян КМ. Предшественник – озимый ячмень. Отбор образцов ризосферной почвы, прилегающей к растению (0-5 мм), проводили по методу конверта в трехкратной повторности в фазу выметывания растений (конец июня – середина июля).

3.2 Микробиологические методы

В ризосфере сорго зернового определяли численность микроорганизмов основных эколого-трофических групп: азотфиксаторы, аммонификаторы, амилалитики, микромицеты, целлюлозолитики, педотрофы, олиготрофы (Теппер и др., 2005). Численность микроорганизмов учитывали в колониеобразующих единицах (КОЕ) в перерасчете на грамм абсолютно сухой почвы. Инокуляцию семян сорго бактериальными препаратами проводили по рекомендациям производителя из расчета 1% рабочего раствора от массы семян с инокуляционной нагрузкой 1 млн КОЕ/семя. Внесение ассоциации эндомикоризных грибов осуществляли совместно с посевом семян в борозду с нагрузкой 50 инокуляционных единиц на семя.

3.3 Физико-химические и биохимические методы

Определение активности ферментов ризосферы сорго зернового проводили методами, описанными у Грицаенко с соавторами (2003), в перерасчете на абсолютно сухую почву. Эмиссию CO₂ ризосферы определяли титриметрическим методом в модифик (Методические рекомендации, 1981). Интегральный показатель биологического состояния почвы рассчитывали по методике Казеева и Колесникова (2012). Содержание свободного пролина – по модифицированной методике Шихалеевой и др. (2014).

3.4 Анализ таксономической структуры микробиома почвы

ДНК из почвенных образцов выделена с помощью набора PowerSoil DNA IsolationKit (MoBio, США). Она использована как матрицы при создании ампликонных библиотек гена 16S рРНК по вариабельному участку V4 (Bates et al., 2010). Библиотеки секвенировали с помощью MiSeq (Illumina, США) на базе ЦКП «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» при ФГБНУ ВНИИСХМ (Санкт-Петербург-Пушкин). Таксономический и статистический анализ полученных результатов проведен с использованием пакетов программ Bioconda (Grüning et al., 2018), QIIME (Caporaso et al., 2010), PAST Paleo (Hammer et al., 2001) и базы данных Ribosomal Database Project (RDP).

3.5 Статистические методы

Для обработки данных использованы методы двухфакторного дисперсионного анализа (Доспехов, 1985; Стукач, 2011г.) и представлены в виде среднего арифметического $\pm$ стандартной ошибки средней ($\bar{x} \pm S\bar{x}$). За факторы при выращивании сорго зернового принимали: погодно-климатический (год исследования) и инокуляцию семян КМ. Визуализацию данных численности эколого-трофических групп осуществляли при помощи метода теплокарты (heatmap). Данные представлены в виде значений logN (где N – количество микроорганизмов определенной эколого-трофической группы КОЕ/г почвы), нормализованных по принципу Z-трансформации

(Никитин и др., 2020 г.). Взаимосвязь изученных показателей оценена корреляционным анализом Пирсона. Значения статистически значимого коэффициента корреляции оценивали при $p < 0,05$.

Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

4.1. Экологическое состояние биологической активности чернозема южного под влиянием интродуцированных микроорганизмов при выращивании сорго в засушливых условиях.

4.1.1 Изучение таксономической структуры микробиома чернозема южного.

Таксономический анализ структуры чернозема южного показал доминирование представителей 10 фил прокариот, доля которых составила более 1 %: *Crenarchaeota* из домена *Archaea* и *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia* из домена *Bacteria*. Наиболее распространенная фила в черноземе южном *Actinobacteria* максимально представлена в целинной почве (35,4 %). Относительное обилие их в условиях ТС составила 27,9 % и увеличивалась до 30,4 % при внесении КМ. Такое доминирование её представителей может быть связано с их приспособленностью к засушливым условиям (Pajares et al., 2018; Manucharova et al., 2011).

В ходе исследования выявлено 823 операционных таксономических единиц (ОТЕ) на уровне рода. Количество детектированных ОТЕ в агроэкосистемах варьировало в пределах 487–502 и достоверно не отличалось от целинного контроля. В засушливых условиях 2018 года в почве под прямым посевом было зафиксировано более высокое альфа-разнообразие, характеризующее увеличение богатства видового состава ($H_{\text{Шеннона}}$) и выравненность (мера Бузаса-Гибсона) на уровне родов на 1,5-3,6 % и 9,1-17,4 % соответственно по сравнению с традиционной системой и целиной (таблица 1). Повышенные значения этих индексов, находящихся в обратной зависимости от уровня доминирования различных ОТЕ, в ресурсосберегающей системе связаны со значительным увеличением доли многочисленных представителей прокариот из группы РББ (разреженной бактериальной биосферой – разнообразие прокариот, которые специфически представлены популяциями малого размера).

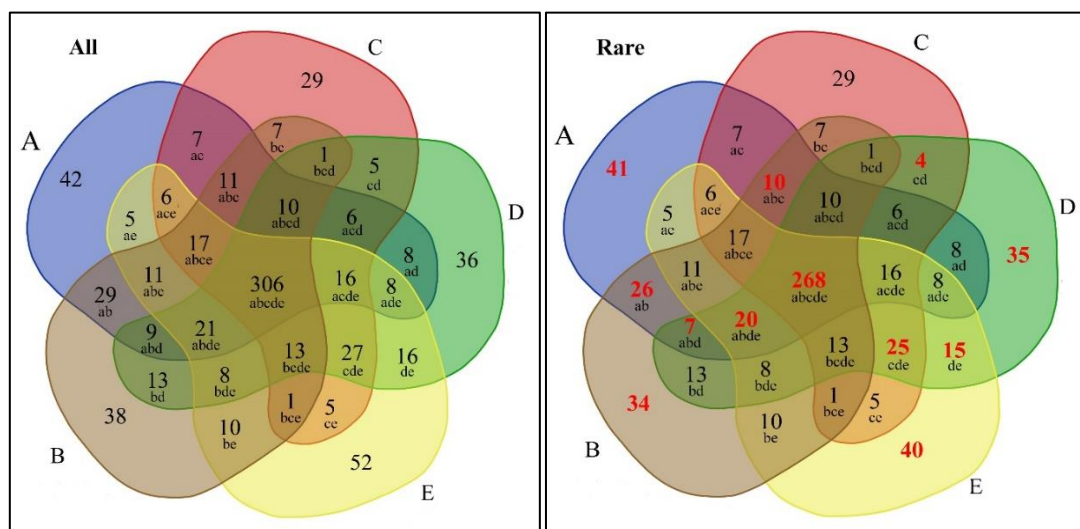
Таблица 1 – Индексы разнообразия прокариот в черноземе южном под влиянием комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (2018 г.)

Индексы	ПП	ПП с КМ	ТС	ТС с КМ	Целина
Количество ОТЕ	501,0±23,1	500,0±1,7	487,0±1,2	495,5±14,7	502,0±22,5
Видовое богатство ($H_{\text{Шеннона}}$)	4,73±0,04	4,68±0,07	4,57±0,04	4,56±0,01	4,61±0,04
Выравненность (мера Бузаса-Гибсона)	0,23±0,00	0,22±0,01	0,20±0,01	0,19±0,00	0,20±0,00

Примечания: ПП – прямой посев, ТС – традиционная система

Данные по представленности ОТЕ на уровне рода условно разделены согласно Ду с соавторами (2020) на обильно представленных микроорганизмов со значением выше 0,5 % и разреженных – ниже 0,1 %. Оценка микробиомов показала, что при таком разделении в учет вошли только 773 ОТЕ из 823, так как отсеялись многие таксоны с долями более 0,1 %, но менее 0,5 (рисунок 1). Рассмотренные диаграммы Венна

подтверждают влияние на структуру микробиома чернозема южного систем земледелия по сравнению с целиной. Небольшим изменениям он подвержен и при применении КМ, что видно из распределения одних микроорганизмов то в обильные таксоны, то в разреженные.



Примечания: А – прямой посев, В – прямой посев с комплексом микроорганизмов (КМ), С – традиционная система, D – традиционная система с КМ, Е – целина; красным отмечена численность ОТЕ, которая изменилась от общего числа к разреженной.

Рисунок 1 – Структура прокариотного сообщества по уникальным и коровым таксонам в черноземе южном в агроэкосистемах и целине при условной границе обильных подсообществ выше 0,5 %, а разреженных – менее 0,1 %. All – общая численность ОТЕ, Rare – численность ОТЕ разреженной части микробиомов (2018 г.)

Например, *Steroidobacter* (область на рисунке 1 Rare: de), NA_232 из семейства *Cytophagaceae* (область на рисунке 1 Rare: abde) и других, доля которых в ТС с КМ значительно увеличивается по сравнению с вариантом без обработки, а также появляются ранее не детектируемые в библиотеках: *Edaphobacter*, *Janibacter*, *Fluviicola*, *Frankia* (область на рисунке 1 Rare: abde и abd) и другие, присутствующие в данной почве в целине и прямом посеве. Согласно анализу главных компонент, выявлено 8 доминирующих родов с известной таксономией: *Candidatus Nitrososphaera*, *Rubrobacter*, *Flavisolibacter*, *Segetibacter*, *Bacillus*, *Balneimonas*, *Skermanella*. Микроорганизмы из родов *Erwinia* и *Xanthomonas* фитопатогенными свойствами обнаружены с минимальной долей в сообществах от 0,003 % до 0,014 % и 0–0,005 % соответственно. В черноземе южном отмечено низкий уровень представленности целлюлозоразлагающих бактерий рода *Cellulomonas*. Наибольшая доля представителей этого рода была отмечена в целинной почве (0,55 %). В агроэкосистемах доля их снизилась: в 1,6 раза — при прямом посеве (ПП) и в 1,3 раза — при традиционной системе земледелия (ТС).

Таким образом, установлены изменения таксономической структуры микробиома чернозема южного под влиянием биоагентов микробных препаратов в условиях традиционной системы земледелия и прямого посева.

4.1.2 Оценка численности эколого-трофических групп ризосферы сорго зернового

Анализ эколого-трофических групп микроорганизмов ризосферы сорго зернового показал увеличение численности амилोलитиков, олиготрофов, азотфиксаторов, микромицетов до 1,4 раз в прямом посеве до 5,9 раз в традиционной системе с применением КМ в сравнении с вариантом его без обработки в 2018 г. В засушливом 2020 году применение предпосевной инокуляции КМ способствовало повышению численности аммонификаторов, амилोलитиков, олиготрофов, азотфиксаторов, микромицетов в 1,3–4,0 раза прямом посеве, а в традиционной системе КМ выявлено возрастание численности только целлюлозолитиков в 1,6 раз.

Согласно численности эколого-трофических групп микроорганизмов, нормализованных по принципу Z-трансформации (Никитин и др. 2020), выявлено резистентность некоторых групп микроорганизмов к засушливым условиям (2018 и 2020 гг.) в ризосфере сорго (рисунок 2). Целлюлозолитики доминировали в микробном сообществе в черноземе южном в агроэкосистеме ПП. Отмечена минимальная численность амилोलитиков и педотрофов в ризосфере сорго в ПП, что свидетельствует об обеднённости почвы доступными азотсодержащими веществами. Наиболее многочисленной группой являлись микромицеты и олиготрофы в варианте ПП с обработкой семян КМ, что возможно связано с их устойчивостью к почвенно-климатическим условиям и увеличением растительных остатков (Буянтуева и др., 2017; Кутовая и др. 2019). Стратегия развития азотфиксаторов значительно не изменялась в соотношении с другими микроорганизмами год от года, применяемых агроэкосистем и предпосевной обработки КМ. Применение предпосевной инокуляции КМ в стационаре возможно способствовало к 2020 году исследований устойчивому повышению нормализованного количества всех эколого-трофических групп микроорганизмов, исключение – актинобактерии в ПП. Это отличает агроэкосистемы ПП от ТС, при которой численные изменения всех групп микроорганизмов имеют разнонаправленный характер не зависимо от года исследований и применения микроорганизмов.

По результатам численности микроорганизмов провели двухфакторный дисперсионный анализ, который выявил более 90 % влияние погодно-климатических условий года на численность азотфиксаторов и олиготрофов; наибольшее влияние при применении КМ на развитие амонификаторов и амилोलитиков 7,2–10,5 % в агроэкосистемах ПП и ТС. На рисунке 3 приведен пример распределение доли влияния изучаемых факторов на численность амилोलитиков в ризосфере сорго зернового.

По степени толерантности к погодно-климатическим факторам представители почвенной микробиоты ризосферы сорго зернового распределились следующим образом (от самых устойчивым к наименее):

- в прямом посеве – аммонификаторы > педотрофы > амилолитики > целлюлозолитики > микромицеты > азотфиксаторы > олиготрофы;
- в традиционной системе земледелия – амилолитики > аммонификаторы > педотрофы > микромицеты > целлюлозолитики > азотфиксаторы > олиготрофы.

Таким образом, построение теплокарты позволило сравнить широкий спектр числовых значений, что содействовало выявлению адаптивных микроорганизмов и подвергшихся неблагоприятным внешним воздействиям. Установлено, что длительное сельскохозяйственное использование почв при традиционной агроэкосистеме способствует нестабильности функционирования микробоценоза и может привести к нарушению экологического состояния почвы.

А)

Вариант опыта	Азотфиксаторы	Аммонификаторы	Амилолитики	Олиготрофы	Педотрофы	Микромицеты	Актинобактерии	Целлюлозолитики
Прямой посев (ПП)								
ПП с КМ								
Традиционная система (ТС)								
ТС с КМ								

Б)

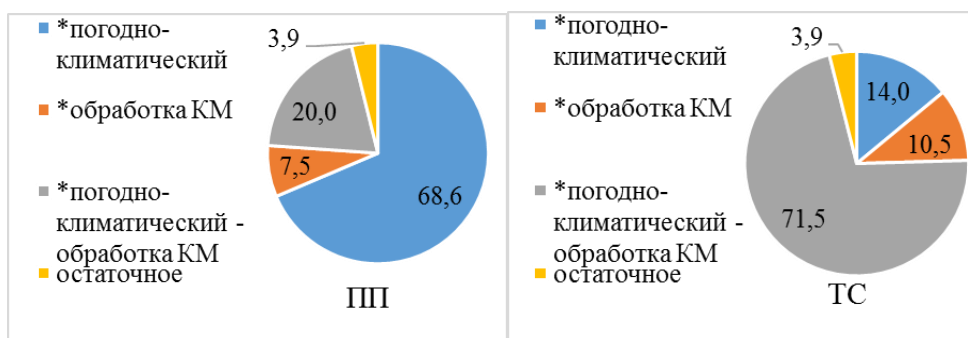
Вариант опыта	Азотфиксаторы	Аммонификаторы	Амилолитики	Олиготрофы	Педотрофы	Микромицеты	Актинобактерии	Целлюлозолитики
Прямой посев (ПП)								
ПП с КМ								
Традиционная система (ТС)								
ТС с КМ								

В)

Вариант опыта	Азотфиксаторы	Аммонификаторы	Амилолитики	Олиготрофы	Педотрофы	Микромицеты	Актинобактерии	Целлюлозолитики
Прямой посев (ПП)								
ПП с КМ								
Традиционная система (ТС)								
ТС с КМ								



Рисунок 2 – Теплокарта влияния комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на развитие эколого-трофических групп микроорганизмов в ризосфере *S. bicolor*. Данные представлены в виде значений $\log N$ (где N – количество КОЕ/г почвы микроорганизмов определенной эколого-трофической группы), нормализованных по принципу Z-трансформации: А-2018 год; Б-2019 год; В-2020 год (чернозем южный)



Примечание к рисунку. * – различия достоверны при $p \leq 0,05$.

Рисунок 3 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности амилолитиков в ризосфере при выращивании сорго зернового в агроэкосистеме прямого посева (ПП) и традиционной системы (ТС) совместно с комплексом микроорганизмов (КМ) (чернозем южный, 2018-2020 года).

4.1.3 Ферментативная активность ризосферы сорго как интегральный показатель биологического состояния и направленности процессов трансформации органического вещества.

В агроэкосистеме ТС в 2018 году отметили тенденцию, а в 2019 году значимое снижение активности каталаз на 20 % по сравнению с ПП. Экспериментально установлено, что в условиях 2019 года, активность каталазы возрастала в 1,2–1,6 раза по сравнению с 2018 и 2020 гг. Этот факт коррелирует с литературными данными о чувствительной перестройке микробных сообществ и связанных с ними биохимических процессов при колебаниях влажности в черноземах (Турусов и др., 2019).

Важную роль в образовании гумусовых веществ выполняют полифенолоксидазы (ПФО). Так, активность ПФО в ПП ниже в 5,7 раза в 2019 году и в 2,0 раза – в 2020 году в сравнении с ТС (таблица 2). Установлено, что инокуляция КМ при ПП значительно увеличила активность этого фермента в 4,7 раза в 2019 году, в 2,4 раза – в 2020 году. Известно, что прямой посев способствует обилию растительной мульчи содержащая трудноразлагаемые лигнины, на которых преобладают микроскопические грибы (Никитин и др. 2021), что возможно способствует увеличению активности ПФО в наших исследованиях. При ТС выявлено угнетение активности данного фермента в 3,3 раза в 2019 и в 2 раза – в 2020 году с обработкой.

Таблица 2 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной) на активность полифенолоксидаз в ризосфере сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Вариант опыта	Активность полифенолоксидаз, мл К ₂ О ₃ / 100 г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	1,16±0,07	0,83±0,07	0,73±0,00
ПП с КМ	1,31±0,00	3,89±0,29	1,75±0,08
Традиционная система (ТС)	1,14±0,07	4,72±0,27	1,44±0,00
ТС с КМ	1,07±0,00	1,45±0,14	0,72±0,00

В засушливый период 2020 г. применение КМ оказало неоднозначное влияние на активность пероксидаз: стимулирующий эффект в агроэкосистеме ПП (+91,7%) и ингибирующим влиянием в ТС (-58,0%). Возможно, это связано с проявлением устойчивости к засухе и быстрой регенерации при незначительных осадках у растений, имеющих С4-фотосинтез (Alvarez et al., 2019), к которым относится *S. bicolor*.

Мониторинг почвенного дыхания (2018-2020 гг.), отражающего активность микробоценозов и потери органического вещества при их трансформации (Пуртова и др., 2013), выявил, что в агроэкосистеме ПП применение КМ выступало ключевым фактором, снижающим эмиссию СО₂ из ризосферы сорго.

Дисперсионный анализ показал, что для каталазы и эмиссии СО₂ доминирующим остаётся погодно-климатический фактор с долей влияния 75,1–92,4 % (таблица 3). Бактеризация семян сорго КМ способствует снижению воздействия погодно-климатического фактора на активность полифенолоксидаз и пероксидаз на 14,4 – 68,6 % в изучаемых агроэкосистемах.

Таблица 3 – Доля влияния факторов (%) на ферментативную активность и эмиссию углекислого газа в ризосфере при выращивании сорго зернового в агроэкосистеме прямого посева (ПП) и традиционной системы (ТС) совместно с комплексом микроорганизмов (КМ) (чернозем южный, 2018-2020 года)

	Каталаза		Пероксидаза		Полифенолоксидаза		Эмиссия CO ₂	
	ПП	ТС	ПП	ТС	ПП	ТС	ПП	ТС
Погодно-климатический	*92,4	*86,9	*29,3	*60,7	*23,8	*47,7	*75,1	*91,7
КМ	0,1	2,0	*2,0	*13,19	*41,9	*24,7	*11,3	0,6
Погодно-климатический+КМ	2,8	3,1	*68,2	*26,08	*31,6	*25,8	1,0	1,2
остаточное	4,7	8	0,5	0,03	2,7	1,8	12,6	6,5

Примечание к таблице. * – различия достоверны при $p \leq 0,05$.

По данным ферментативной активности оксидоредуктаз – пероксидаз и полифенолоксидаз рассчитан коэффициент гумификации, показывающих направленность трансформации органического вещества. За период проведения исследований 2018-2020 гг. условный коэффициент гумификации показал преобладание минерализационных процессов, исключение составили варианты ПП с КМ и ТС в более благоприятных условиях 2019 года.

По данным ферментативной диагностики (каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза) и эмиссии углекислого газа ризосферы сорго зернового рассчитали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы (рисунок 4). На основании сравнительного анализа ИПБС опытных вариантов исследований, проводимых на протяжении 2018-2020 годов, установлена линейная закономерность ее снижения при прямом посеве и стабильность данного показателя с применением предпосевной бактериализации. Спад показателя ИПБС свидетельствует о замедлении биологических процессов.

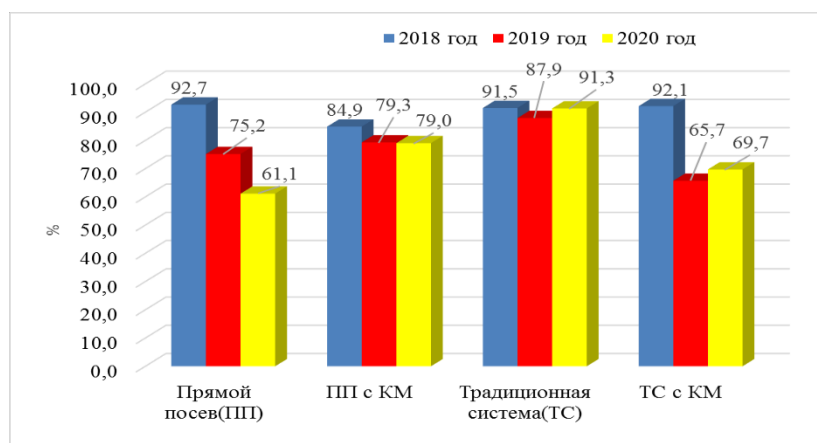


Рисунок 4 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) в агроэкосистемах (прямого посева и традиционной) на ИПБС ризосферы сорго в фазу выметывания (чернозем южный, 2018-2020 года)

Таким образом, инокуляция семян приводит к стабилизации биохимических процессов ризосферы сорго зернового в прямом посеве, что позволяет снизить антропогенное воздействие на систему «почва – растение». В целом смена

антропогенного воздействия – с применения вспашки (с 2015 года) к прямому посеву – в нашем эксперименте может привести к изменениям сукцессионного типа во всей ресурсосберегающей агроэкосистеме.

4.2. Оценка устойчивости растений сорго зернового под влиянием комплекса микроорганизмов в засушливых условиях

Экспериментальные данные двух крайних лет исследований показали статистически значимое снижение активности пероксидаз в 1,8–1,9 раза при прямом посеве по сравнению с традиционной системой (рисунок 5). Применение инокуляции семян КМ способствовало повышению ферментативной активности в 1,5 раза в условиях прямого посева в 2019 году. Известно, что рост активности пероксидаз растений является одним из индикаторов устойчивости их к водному дефициту (Zoz et al., 2013).

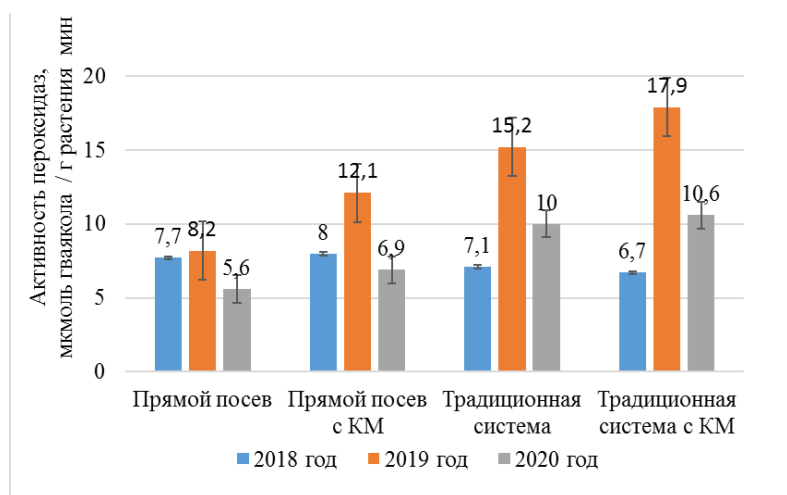


Рисунок 5 – Активность пероксидаз растений *S. bicolor* при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Известно, что повышение содержание пролина, как осмолита и антиоксиданта позволяет растению снижать негативное воздействие водного дефицита (Ибрагимова и др., 2010). Согласно полученным данным в 2018 г. отмечено, что выращивание культуры сорго зернового в агроэкосистеме ТС способствовало аккумуляции свободного пролина в листьях с увеличением на 160 % по сравнению с ПП (рисунок 6). Применение комплекса микроорганизмов с *S. bicolor* содействовало повышению содержания концентрации пролина на 38,2 % (2018 г.) и снижению – на 49,8 % на фоне благоприятных погодных условий (2019 г.) в сравнении с ПП без предпосевной инокуляции. В 2020 году исследований интенсивность образования свободного пролина резко возросла во всех вариантах опыта, тем не менее, и в этом случае КМ показали свою функциональную роль в снижении негативного фактора. Под влиянием КМ установлено снижение концентрации пролина в 1,3–2,0 раза в обеих агроэкосистемах.

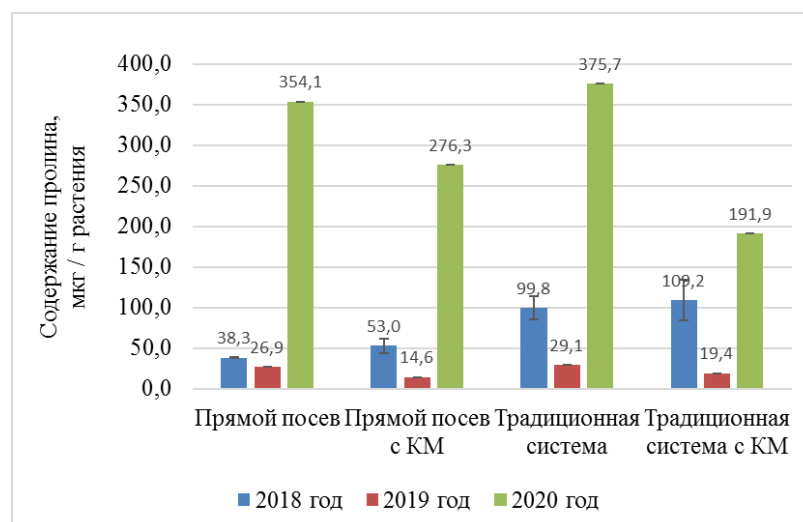


Рисунок 6 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на содержание пролина в растениях *S. bicolor* ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный; 2018–2020 года)

Таким образом, положительное воздействие биоагентов микробных препаратов на некоторые элементы физиологического статуса сорго зернового в прямом посеве указывает на адаптацию растений к условиям степи, где высокие температуры и недостаток осадков сменялся незначительными или усиленными дождями с последующей засухой.

4.3. Биомасса зерна в диагностике устойчивости растений сорго при неблагоприятных условиях окружающей среды

В условиях 2018 года биомасса сорго зернового под воздействием КМ в агроэкосистеме ПП увеличилась на 0,6 т/га или 40 % по сравнению с контролем (ПП) (рисунок 7).

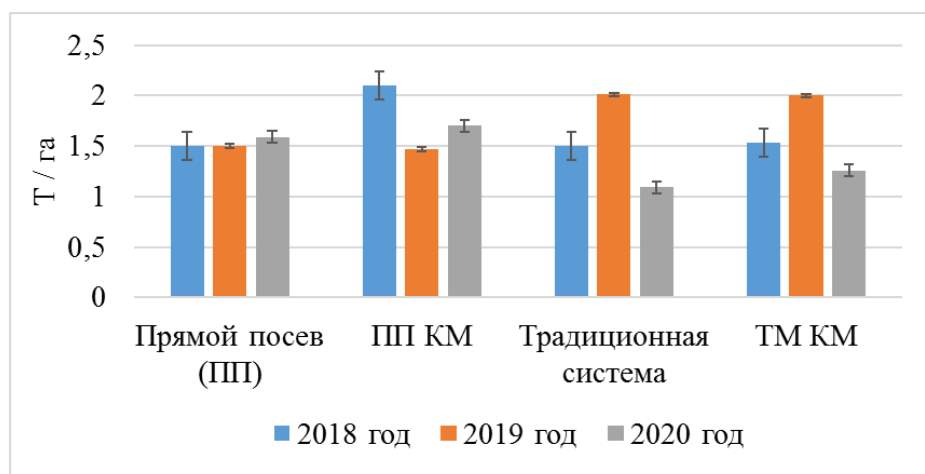
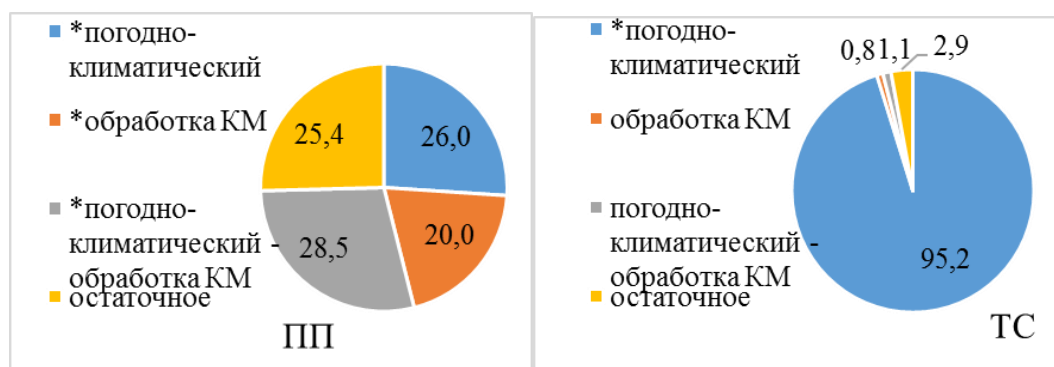


Рисунок 7 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на биомассу зерна *S. bicolor* (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

В тоже время разницы в этот год между агроэкосистемами при выращивании культуры не обнаружено. Под воздействием значительных осадков в активную фазу развития растений 2019 года биомасса зерна при агроэкосистеме ТС увеличилась на

0,51 т / га (25,4 %) в сравнении с ПП. В засушливых условиях 2020 г. под воздействием КМ установили повышение биомассы зерна при традиционной системе на 0,17 т/га (15,6 %) в сравнении с контролем без обработки. Агроэкосистемы в этом году обеспечили существенные отличия по биомассе зерна сорго зернового: при прямом посеве без инокуляции выше на 0,5 т/га (45,9 %) в сравнении с традиционной.

Факторный анализ биомассы зерна сорго зернового выявил значимое влияние в прямом посеве всех изучаемых факторов (рисунок 8). Результаты подтвердили, что агро- и биотехнологии влияют на адаптацию растений сорго к погодно-климатическим условиям. Известно, что резкая смена засухи на увлажнение приводит к нарушению осмотических свойств клеток и ферментативного равновесия, которое полностью не восстанавливается (Храмченкова, 2016). Как уже отмечалось наиболее адаптированы к недостатку влаги растения, семена которых на стадии закладки полевого эксперимента были обработаны КМ. Таким образом, установлено, что нестабильность погодно-климатических условий в зоне сухой степи Крыма при выращивании сорго зернового, один из основных факторов, влияющих на биомассу зерна растений. Нивелирование негативных экологических факторов окружающей среды возможно при использовании альтернативной традиционной системе, агроэкосистемы прямого посева, с применением комплекса микроорганизмов в предпосевной обработке семян *S. bicolor*.



Примечание к рисунку. * – различия достоверны при $p \leq 0,05$.

Рисунок 8 – Доля влияния факторов (%) агроэкосистем и обработки комплекса микроорганизмов (КМ) на биомассу зерна сорго зернового (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

4.4 Выявление корреляционной зависимости показателей состояния ризосферы с биомассой зерна сорго зернового

Корреляционный анализ изученных параметров в активную фазу роста растений показал схожие связи между погодно-климатическими условиями 2018 и 2020 годов. Повышение биомассы зерна отрицательно коррелировало с активностью пероксидаз ризосферы $r = -0,74$ и $r = -0,67$ соответственно в 2018 и 2020 годах. Установлена положительная корреляция биомассы зерна сорго зернового с численностью микромицетов $r=0,84$, аммонификаторов $r=0,63$, целлюлозолитиков $r=0,70$ и отрицательная с дыханием почвы $r= -0,88$ в полевом эксперименте 2020 года (рисунок 10). Установленные связи указывают на то, что применение КМ содействует активной работе ризосферных микроорганизмов, повышая биологическую активность почвы и адаптации растений к стрессовым условиям засухи. При регидратации почвы,

подвергшейся засухе, минерализуется органическое вещество, что приводит к резкому увеличению бактериальной популяции по сравнению с почвами, которые не были подвержены стрессу (Denef et al., 2001). Есть подтверждение, что устойчивые к засухе микроорганизмы секретируют смеси растворенных веществ, которые используются для защиты как своей клетки, так и эукариотической (Julca et al., 2012). Полученные нами результаты подтверждают приведенные выше литературные данные прямыми корреляционными связями. Таким образом, анализ полученных результатов указывает на функциональную зависимость почвенного микробоценоза и физиологического статуса растений от применения комплекса микроорганизмов и агроэкосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены комплексные исследования биологической активности почвы чернозема южного и адаптационного потенциала растений *Sorghum bicolor* под влиянием комплекса микроорганизмов при изменении условий его выращивания в степной зоне Крыма.

По итогам сформулированы следующие выводы:

1. Установлено доминирование 10 фил прокариот (*Crenarchaeota*, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia*) в черноземе южном степной зоны Крыма. Показано, что ресурсосберегающая агроэкосистема (прямой посев) способствует увеличению выравненности микробиома на 9,1–17,4% по сравнению с традиционной свидетельствующее о формировании более устойчивой микробной структуры за счет большего количества обильных подсообществ.

2. Зафиксирована логарифмически равновесная численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов (согласно методу теплокарты) в ризосфере *Sorghum bicolor* при применении комплекса микроорганизмов в агроэкосистеме прямого посева к третьему году исследований.

3. Факторный анализ выявил увеличение доли воздействия применения комплекса микроорганизмов и ее совместного влияния с погодно-климатическими условиями на антиоксидантные ферменты (пероксидазы и полифенолоксидазы) в ризосфере сорго в прямом посеве на 17,2 % и до 42,1 % соответственно по сравнению с традиционной агроэкосистемой. Установлено, что в прямом посеве в сравнении с традиционной доля влияния погодно-климатического фактора на активность пероксидаз снизилась с 60,7 % до 29,3 %, полифенолоксидаз – с 47,7 % до 23,8 % и эмиссии CO₂ – с 91,7 % до 75,1 %.

4. Определено повышение биологической активности чернозема южного под влиянием комплекса микроорганизмов в ризосфере сорго зернового в прямом посеве, что подтверждается увеличением его ИПБС (интегральный показатель биологического состояния) на 4,1 и 17,9 % в более благоприятных и стрессовых для растений погодных условиях (2019, 2020 гг.).

5. Выявлено снижение уровня оксидативного стресса в растениях сорго зернового, что подтверждается снижением содержания в растениях пролина в 1,3-2,0 раза под влиянием предпосевной инокуляции семян комплексом микроорганизмов в изучаемых агроэкосистемах, а активности пероксидаз в 1,8-1,9 раза в прямом посеве по сравнению с традиционной в 2019 - 2020 гг.

6. Установлено зависимость продуктивности от влияния биотехнологического фактора, который снижает с 95,2 до 26,0 % погодно-климатическое воздействие в агроэкосистеме прямого посева относительно традиционной. Применение комплекса

микроорганизмов способствует повышению биомассы зерна сорго зерновое при прямом посеве на 0,23 т/га (15%) и традиционной системе 0,07 т/га (4,6%) в среднем за три года исследований.

7. Выявлены значимые корреляционные связи биомассы зерна с активностью пероксидаз ризосферы ($r=-0,67$), численностью микромицетов ($r=0,84$), аммонификаторов ($r=0,63$), целлюлозолитиков ($r=0,70$) и дыхания почвы ($r=-0,88$) к третьему году исследований, показали связь величины биологической активности почвы в системе «растения *S. bicolor* – микроорганизмы – почва».

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании полученных данных по применению комплекса микроорганизмов при возделывании сорго зернового в агроэкосистемах прямого посева и традиционного (в условиях степи Крыма) сельскохозяйственному производству рекомендуется:

1. С целью сдерживания снижения плодородия почвы, поддержания экологического равновесия микробоценоза ризосферной зоны в агроэкосистемах прямого и традиционного посева, а также повышения биомассы зерна на 15,6–45,9%, рекомендуется применять предпосевную инокуляцию комплексом микроорганизмов. В состав комплекса входят: бактерии полезного действия: *Paenibacillus polymyxa* П, *Lelliottia nimipressuralis* 32-3, *Agrobacterium radiobacter* 204; ассоциация арбускулярных микоризных грибов *Rhizophagus* sp. РЗ. Способ применения: Инокуляция семян проводится в день посева с нагрузкой 1×10^6 КОЕ каждого бактериального штамма на семя. Эндомикоризные грибы вносятся вместе с семенами из расчёта 20 колонизирующих единиц на семя.

2. Систематическое применение биологических методов для: формирования сбалансированного функционирования эколого-трофических групп микроорганизмов в почве; снижения негативного влияния погодно-климатических факторов; контроля антропогенного воздействия при выращивании сорго зернового.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в обосновании и создании биологизированной ресурсосберегающей системы возделывания *Sorghum bicolor* на черноземных почвах, базирующейся на комплексном применении прямого посева (No-till) и микробных препаратов. Приоритетным направлением является углубленное изучение системы «почва – ризосфера – растение» с применением метагеномного анализа ключевых таксонов микроорганизмов, ответственных за формирование численности эколого-трофических групп способных к функционированию при неблагоприятных погодно-климатических условиях и повышение буферности агроэкосистемы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание синтетических микробных консорциумов с заданными функциями (биоконтроль, азотфиксация, фосфатмобилизация), обеспечивающих не только стабилизацию ферментативной активности чернозема южного и снижение стрессовых нагрузок (пролин, пероксидазы) в условиях учащающихся засух, но и устойчивое увеличение биомассы зерна (от 15% и выше) за счет управления трофическими связями и микробиологической активностью почвы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки

1. **Абдурашитова Э. Р.**, Мельничук Т. Н., Абдурашитов С. Ф. Оценка биологической активности ризосферы *Sorghum bicolor* (L.) Moench под влиянием микробных препаратов в условиях прямого посева в степной зоне Крыма / Экосистемы. – 2021. – № 26. – С. 116-123.
2. **Абдурашитова Э. Р.**, Абдурашитов С. Ф., Паштецкий В. С. Оценка эффективности применения комплекса микроорганизмов при выращивании *Sorghum bicolor* (L.) в агросистемах прямого посева и традиционной системы / Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия». - 2025. - Том 11 (77), № 2. – С. 3-16.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

4. Melnichuk T., Andronov E., Abdurashytov S., Egovtseva A., **Abdurashytova E.**, Kameneva I, Radchenko L., Pashtetskiy V. Changes in prokaryote communities of southern chernozem under the influence of different farming systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental. – 2019. – Vol.341. – p.012007; doi:10.1088/1755-1315/341/1/012007
5. T.N. Melnichuk, S.F. Abdurashytov, E.E. Andronov, **E.R. Abdurashytova**, A.Yu. Egovtseva, A.A. Gongalo, E.N. Turin and V.S. Pashtetskiy. The taxonomic structure of southern chernozem at the genus level influenced by microbial preparations and farming systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming 17–18 October 2019, Voronezh. – 2020. – Vol. 422. – 012101. doi:10.1088/1755-1315/422/1/012101
6. **Abdurashytova E.**, Melnichuk T., Abdurashytov S., Egovtseva A. Influence of Bacterial Strains on the Peroxidase Activity of *Sorghum bicolor* (L.) Moench Under Conditions of Moisture Deficit // IN VITRO CELLULAR & DEVELOPMENTAL BIOLOGY-ANIMAL. – 2021. –Vol. 57. (SUPPL 1). –P. S56-S56.

Прочие публикации

7. Мельничук Т.Н., Абдурашитов С.Ф., Андронов Е.Е., Еговцева А.Ю., **Абдурашитова Э.Р.**, Гонгало А. А., Турин Е.Н., Зубоченко А.А. Изменение состава микробиома чернозёма южного при влиянии систем земледелия и микробных препаратов // Таврический вестник аграрной науки. – №4. – 2018. – С.76-87. DOI.10.25637/TVAN 2018.04.08.
8. **Абдурашитова Э. Р.**, Мельничук Т. Н., Абдурашитов С. Ф., Еговцева А. Ю., Турин Е. Н., Гонгало А. А. Адаптивность микробоценоза ризосферы *Sorghum bicolor* под влиянием микробных агентов в условиях чернозёма южного / Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – №2. – С. 67-72. – DOI 10.31857/S2500262722020132.
9. Абдурашитов С.Ф., **Абдурашитова Э.Р.**, Мельничук Т.Н., Еговцева А.Ю., Андронов Е.Е., Кичко А.А. Таксономическая структура чернозема южного при применении биопрепаратов в различных системах земледелия // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» 7-8 февраля 2019 г. Барнаул, Кн.1.-2019. – С. 289-290.
10. **Абдурашитова Э.Р.**, Абдурашитов С.Ф., Мельничук Т.Н. Активность ферментов оксидоредуктаз растений и ризосферы *Sorghum bicolor* в условиях Степи //

Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы IV международной научно-практической конференции. Научный редактор В.С. Паштецкий. – 2019. – С. 247-248.

11. **Абдурашитова Э.Р.**, Абдурашитов С.Ф., Мельничук Т.Н. Активность ферментов каталаз и пероксидаз *Sorghum bicolor*, выращиваемого в условиях Степи // IX съезд общества физиологов растений России «Физиология растений – основа создания растений будущего» Казань, 18-24 сентября 2019. – С. 32.

12. **Абдурашитова Э.Р.**, Мельничук Т.Н., Абдурашитов С.Ф., Еговцева А.Ю. Изменение интегрального показателя биологического состояния ризосферы *Sorghum bicolor* L. под влиянием систем земледелия и микробных препаратов // Рациональное использование природных ресурсов в агроценозах: материалы международной научно-практической конференции / Науч. ред. В.С. Паштецкий. Симферополь, 12-13 октября 2020 г. – С. 12-13. DOI 10.33952/2542-0720-15.05.2020.05

13. **Абдурашитова Э.Р.**, Абдурашитов С.Ф., Турин Е.Е. Влияние биопрепаратов на содержание пролина и хлорофилла в *Sorghum bicolor* L., выращенного по агроэкосистеме прямого посева / Материалы 2-ой Международной научной конференции PLAMIC2020 «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» 5-9 октября 2020 г., Саратов / отв. ред. И.А. Тихонович – 2020. – С. 6

14. **Абдурашитова Э. Р.**, Абдурашитов С. Ф., Еговцева А. Ю., Турин Е. Н., Гонгало А. А. Влияние биопрепаратов на адаптацию сорго зернового в условиях дефицита влагообеспеченности / Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции, посвященной Году науки и технологий «Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения». Краснодар. 29–31 марта 2021 г. – С. 127-129

15. **Абдурашитова Э.Р.**, Мельничук Т.Н., Абдурашитов С.Ф. Биологическая активность ризосферы *Sorghum bicolor* при взаимодействии комплекса микроорганизмов с растениями в условиях степи / Материалы 3-ей международной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» (PLAMIC2022). 3 - 8 октября 2022, Санкт-Петербурге / отв. ред. И.А. Тихонович – 2022. – С. 12.

Подписано в печать 28.09.2026 г.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Объем – 1,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Напечатано с оригинал-макета заказчика в типографии ИП Гальцовой Н.А.

Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь,

пгт. Аграрное, ул. Парковая, 7, кв. 908.

E-mail: nisfo@mail.ru Тел.: +7 (978) 781-38-81