

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

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

Симферополь – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	13
1.1 Биолого-экологические особенности сорго зернового	13
1.2 Биопрепараты и прямой посев как экологически безопасный путь решения проблем адаптивности сельского хозяйства в степной зоне	16
1.3 Биологическая активность почвы под воздействием антропогенных факторов	22
1.4 Физиологический статус как индикатор состояния растений при неблагоприятных условиях окружающей среды	28
ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	32
ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	38
3.1 Полевой эксперимент	38
3.2 Микробиологические методы	39
3.3 Физико-химические и биохимические методы	41
3.3.1 Определение ферментативной активности ризосферы и интегрального показателя биологического состояния почвы	41
3.3.2 Определение суммы хлорофиллов ($\alpha + \beta$) в листьях и водного дефицита растений	44
3.3.3 Определение активностей пероксидаз и содержания свободного пролина в листьях растений	45
3.4 Анализ таксономической структуры микробиома почвы	46
3.5 Статистические методы	46
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	48

4.1 Экологическое состояние биологической активности чернозема южного под влиянием интродуцированных микроорганизмов при выращивании сорго в засушливых условиях	48
4.1.1 Изучение таксономической структуры микробиома чернозема южного	48
4.1.2 Оценка численности эколого-трофических групп ризосферы сорго зернового.....	61
4.1.3 Ферментативная активность ризосферы сорго как интегральный показатель биологического состояния и направленности процессов трансформации органического вещества	78
4.2 Оценка устойчивости растений сорго зернового под влиянием комплекса микроорганизмов в засушливых условиях.....	89
4.3 Биомасса зерна в диагностике устойчивости растений сорго при неблагоприятных условиях окружающей среды	95
4.4 Выявление корреляционной зависимости показателей состояния ризосферы с биомассой зерна растений сорго зернового	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ	106
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	108
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	109
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	111
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	150

ВВЕДЕНИЕ

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 средства 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 микробоценоза 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 агроэкоценоза 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 р_а «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.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Биолого-экологические особенности сорго зернового

В конце 1990-х годов, Всемирная комиссия по охраняемым территориям Международного союза охраны природы (МСОП) констатировала, что степи — наиболее нарушенный и наиболее угрожаемый, а вместе с тем наименее защищенный биом среди всех 15 основных биомов суши. Только с зерном из этих ландшафтов поступает ежегодно в другие экосистемы мира 8 миллионов тонн азота, 160 миллионов тонн углерода. Определяющим поступление в экосистему биологического круговорота — энергии и ее главных носителей: воды и воздуха является климат (Мордкович, 2014).

В степной зоне растения, отличающиеся способностью переносить засуху и перепады с повышенной влажностью, являются необходимым условием для жизнеобеспечения живых существ. Высокотемпературные воздействия и дефицит влаги в почве 2018 года привели в Республике Крым к потере урожая зерновых на 42 % по сравнению с 2017 г. (Ергина и др., 2018).

Sorghum bicolor (L.) Moench, занимая пятое место в мире по объемам возделывания (70–75 млн га), играет важнейшую роль в обеспечении устойчивости агроэкосистем в условиях нарастающей аридизации климата. Его выращивают в тропических, субтропических и умеренных регионах Африки, Азии, Океании и Америки. В мировом масштабе (за 2018 год) в десятку крупнейших производителей сорго входят: США (9271 тыс. т), Нигерия (6862 тыс. т), Судан (4953 тыс. т), Эфиопия (4932 тыс. т), Индия (4800 тыс. т), Мексика (4531 тыс. т), Бразилия (2273 тыс. т), Китай (2194 тыс. т), Нигер (2100 тыс. т) и Буркина-Фасо (1930 тыс. т) (Tonari et al., 2020). Средний показатель урожайности сорго в мире составляет 1,28 т/га (Wittwer, 1980; Food and Agricultural, 2001; Rooney, 2004). Как источник ценных фитонутриентов (антоцианы, каротиноиды, фенольные соединения) сорго превосходит традиционные злаковые культуры, что определяет его важную роль в устойчивых агроэкосистемах. (Awika, Rooney.,

2004). Используется для различных промышленных и пищевых целей как в развитых, так и в развивающихся странах (Sorghum in the, 2020). Возможные продукты ферментации сладкого сорго: этанол, ацетон, бутанол, различные липиды, молочная кислота, водород, метан, воски, белки. Целлюлозу растения используют для производства бумаги. Идентифицирован из растений сорго биогербицид сорголеон, подавляющий рост сорняков (Whitfield et al., 2012), который позволит уменьшить зависимость производителей продовольственных культур от синтетических гербицидов. Экстракт отрубей сорго с высоким содержанием фенола способствует подавлению пролиферации в клетках рака толстой кишки человека (Awika, Rooney, 2004; Lee et al., 2020). Противораковые свойства сорго зернового связаны с высокими концентрациями флавоноидов и танинов в зерне (Yang et al., 2009). Зерно сорго с высоким содержанием дубильных веществ также показал потенциал для снижения ожирения у лабораторных животных. Сорго обладает очень высокой засухо-, жаро- и солеустойчивостью, а также образует обильную биомассу и урожай и является перспективной культурой для зоны рискованного земледелия.

Селекционеры во всем мире в первую очередь уделяют внимание урожайности, адаптации и качеству. Определенные биохимические маркеры являются полезными индикаторами для выбора разновидностей сорго по пищевым и агрономическим свойствам (Dicko et al., 2005). Биотическими стрессами, влияющими на подавление ростовых процессов сорго, является: зерновая плесень, антракноз и угольная гниль. Среди различных абиотических стрессов, ограничивающих производство сорго, засуха и температурный стресс имеют первостепенное значение. Стресс-факторы окружающей среды являются критическим ограничивающим элементом для нормального протекания биохимических процессов в фенофазах развития растений (Маевская, Николаева, 2013).

Урожайность зерна можно определить, как результат использования ресурсов. Водный дефицит является ключевым ограничением урожайности сорго во всем мире (Borrell et al., 2014). Прогресс в улучшении урожая в

неблагоприятных условиях окружающей среды возможен при комбинировании селективных генотипов растения и методов выращивания сорго с учетом ограниченных ресурсов почвы (Hammer et al., 2010). Изучен транскриптом сорго зернового в ответ на осмотический стресс и абсцизовую кислоту, в следствие чего выявлены гены чувствительные к засухе (Максимов и др., 2011). Сорго благодаря C-4 пути фотосинтеза может адаптироваться к неблагоприятным условиям, что делает его перспективным среди других зерновых культур.

Стадии развития растений сорго включает: всходы, третий лист, кущение, выход в трубку, выметывание, цветение, молочная, восковая и полная спелость. Фаза выметывания очень важна в фенологии развития растения, поскольку определяет общее количество листьев, инициированное на главном побеге, и, следовательно, время цветения (Sorghum in the, 2020). У растений мочковатая корневая система, которая может проникать в почвенный профиль на глубину до 2 м. Листья сорго сильно различаются по длине и ширине, могут достигать 90 см в длину и 12 см в ширину. Соцветия развиваются из конечной точки роста, формы метелки варьируются от открытого до компактного типа и могут достигать 40 см в длину и 20 см в ширину. Цветы и семена (после опыления) развиваются на колосках внутри метелки растения.

Сорго – растения короткого светового дня и пороговой температурой его роста до цветения является 11 °C и 38 °C. Реакция сорго на фотопериод и температуру определяет его адаптацию к окружающей среде (Craufurd et al., 1999). Пороговые температуры после цветения существенно отличаются от тех, что были до цветения, и зафиксированы в пределах 5,7 °C и 23,5 °C (Hammer, Muchow, 1994). Абиотические стрессы, такие как засуха, могут задерживать цветение из-за снижения скорости развития, что снижает скорость появления листьев (Craufurd et al., 1993; van Oosterom et al., 2010). Эти эффекты являются временными, и после снятия стресса показатели имеют значения как при благоприятном развитии растений (Craufurd et al., 1993).

В условиях засухи растения могут быстро стареть, чтобы еще больше уменьшить площадь листа, соответственно ограниченному запасу воды

осуществлять рост (George-Jaeggli et al., 2017). Важно, что доля биомассы, которая выделяется на урожай зерна, зависит от количества воды, доступной после цветения (Turner, 2004). Повышение доступности воды после цветения без увеличения общего количества влагообеспеченности может достигаться путем ограничения использования его перед цветением: агрономическими (Whish et al., 2005), либо генетическими методами. Генетические методы включают селекцию на раннее цветение, которая обычно увеличивает урожай зерна в условиях стресса от засухи (Hammer et al., 2014), а также устойчивость растений сорго к болезням и насекомым (Thakur et al., 1997).

Выращивание сорго при нулевой обработке почвы имеет экологические и экономические преимущества по сравнению с традиционной обработкой почвы. Достоинство применения прямого посева для культуры сорго является повышение биологической активности почвы и органического углерода в ней, уменьшение ее эрозии и сохранение влаги (West, Post, 2002).

Изучение воздействий на физиологические процессы, механизмы, связанные с толерантностью растений и поиск эффективных агротехнических приемов возделывания, поможет повысить устойчивость сорго к абиотическому стрессу и возможность управления его продуктивностью.

1.2 Биопрепараты и прямой посев как экологически безопасный путь решения проблем адаптивности сельского хозяйства в степной зоне

Почва является резервом для живой части экосистемы, которая по мере надобности может черпать находящиеся в доступной форме исходные ресурсы. В случае резких климатических или геоморфологических изменений в биосфере именно почва является буфером между сообществом живых организмов и внешней средой. Для степи характерна смена погоды от сильно засушливых условий к выпадению повышенных осадков.

Из различных типов почв черноземов, южный относятся к засушливому агроклиматическому району с годовым количеством осадков 350–450 мм, в

теплый период 250–300 мм, суммой активных температур 3200–3500° (Куприченков, Антонова, 2010).

Почвы с засушливыми условиями окружающей среды требуют мероприятий по решению проблем с орошением. Так, членами ООН принята Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года (A/RES/70/1-резолюция, 2015), содержащая 17 целей, одной из которых является управление климатическими рисками в целях устойчивого развития сельского хозяйства (Национальный доклад, 2018). Глобальный ущерб сельскохозяйственной продукции оказывают сильные и обширные засухи, потеря урожаев доходит до 60% (Фролов, Страшная 2011; Павлова, Сиротенко, 2012; Национальный доклад, 2018). Так, в результате засушливых условий 2018 г. в Крыму, приблизительно пострадало свыше 100 тыс. га зерновых культур (Ергина и др., 2018).

Интенсивное использование химико-технологических систем земледелия не только не разрешило, но и усугубило процессы неадаптивной интенсификации в сельском хозяйстве, сделав их глобальными по масштабам и катастрофическими по экологическим последствиям (Жученко, 2009). Лестер Браун (цитируется Kaiser 2004) подсчитано, что деятельность человека является причиной потери 26 миллиардов тонн верхнего слоя почвы в год, что 2,6 раза больше естественной нормы (Verhulst et al., 2010). Пахота почв приводит к разрушению степной экосистемы (Стахурлова и др., 2007). Это механическое нарушение сложения, структуры и функционирования почв. Одним из мероприятий сохранения степей является экологизация степного сельского хозяйства. Мероприятия по экологической реставрации направлены на восстановление естественных экосистем, способствующее созданию специфического типа их природного функционирования (Тишков, 2000).

За последние 100 лет произошло несколько революций это механизация сельского хозяйства, внедрение гибридных и генетически модифицированных культур, более широкое использование удобрений, развитие химических протравителей для борьбы с вредителями и статистическое управление данными. Разработка оптимизированных методов ведения сельского хозяйства является

многоплановой задачей для получения высоких урожаев с минимальными экономическими затратами и сохранением плодородия почв (Гатаулина и др., 2017; Бастаубаева, Агеенко, 2020; Nunes et al., 2018; Afshar et al., 2019; de Cárcer et al., 2019)

Для повышения стабильности производства и эффективности внедряемых агротехнических мероприятий необходимо учитывать особенности погоды предстоящего сезона (Сандакова, Елисеев, 2017). В последние годы активно используется в земледелии ресурсосберегающая агроэкосистема прямого посева (Triplett et al., 2008). Технология прямого посева (no-till) направлена на восстановление почвенной экосистемы. Это обеспечивает формирование благоприятного водного режима для растений периоды вегетационного цикла культур. Одновременно ресурсосберегающая технология создает условия для аккумуляции гумуса, минимизирует зависимость агроценоза от энергоемких механических обработок. (Корчагин и др., 2015; Кочмина, Чекаев, 2016; Мокриков и др., 2018; Dick et al., 1991; Jacinthe et al., 2002; Huang et al., 2015; Page et al., 2020; Sokolowski et al., 2020). Расчеты экономической эффективности выращивания пшеницы в Среднем Предкавказье показали, что уровень рентабельности при использовании технологии no-till повышался на 68-72 %, а при вспашке снижался на 25-30 % (Tshovrebov et al., 2020). В настоящее время отведено 12,5% мировых пахотных площадей для технологии no-till, свидетельствует о возрастании перехода агросектора к более устойчивым практикам. (Горянин и др., 2019; Kassam et al., 2019). Прямой посев выступает инструментом экологической интенсификации, одновременно противостоя деградации земель и сокращая эмиссию углекислого газа сельского хозяйства. (Горянин и др., 2019; Awada et al., 2014; Dang et al., 2020). Исследования показали, что длительное применение технологии no-till способствует постепенному запуску механизмов восстановления почвенных агрегатов, изменению питательного режима почвы по горизонтам и ее микробиологическая активность приближается к целинным показателям данного региона (Дрепа, Голубь, 2014; Власенко и др., 2019; Jat et al., 2012). Сдерживающим фактором no-till является

потенциальное ухудшение фитосанитарного фона, которое провоцирует замедление почвенных процессов и снижает рентабельность агросистемы. (Железова, 2019; Nichols et al., 2015). Так, например, накопление гумуса в обедненных почвах при прямом посеве способствует снижению интенсивности минерализации азота, что необходимо для получения высоких урожаев (Rice et al., 1986; Page et al., 2019). Еще одна проблема в условиях прямого посева – обеспечение растений доступными формами фосфора и калия. При недостатке этих элементов необходимо применение удобрений на их основе с заделкой комбинированными агрегатами на глубину 10-12 см (Кирюшин, 2013). Производительность no-till в регионах с умеренным климатом может быть улучшена за счет дополнительных методов, таких как севооборот и др. (Nunes et al., 2018). Для получения стабильной продукции по ресурсосберегающей агроэкосистеме прямого посева требуется длительный срок адаптации к условиям (Pittelkow et al., 2015).

Сущность биологической коррекции агрофитоценозов заключается в управлении питательным режимом системы «почва–растение» через стимуляцию естественных биохимических процессов с целью получения стабильной и экологически сбалансированной продуктивности в разнообразных почвенно-климатических условиях (Hafez et al., 2020). Функция микроорганизмов в биологическом круговороте – синтез физиологически активных соединений, гумусообразование и полная минерализация органических остатков. Микроорганизмы, образуя различные типы взаимодействия – симбиотические, симбиотрофные, биоконтрольные, пищевых цепей, сигнальные и др., сопровождают растения на протяжении всего последующего цикла их развития (Борисов и др., 2007; Проворов, Воробьев, 2012; Минаева и др., 2018; Afonin et al., 2020). В прикорневой зоне (ризосфере) формируется функциональная взаимосвязь между растением-хозяином, почвой и ассоциативными микроорганизмами (PGPR). Штаммы PGPR могут способствовать стимуляции роста растений прямо или косвенно. При прямой стимуляции роста растений, бактерии производят фитогормоны, сидерофоры; они могут солубилизировать малорастворимые

органические и неорганические фосфаты, проявлять способность фиксировать атмосферный азот, способствовать улучшению состояния питательных веществ в растениях; снижению токсического действия химических удобрений, пестицидов, тяжелых металлов, разлагая ксенобиотики. Косвенная стимуляция в основном связана с биоконтролем, включая производство антибиотиков, хелатирование доступных форм Fe в ризосфере, синтез внеклеточных ферментов для гидролиза стенки грибковой клетки и конкуренцию за ниши внутри ризосферы (Haghighi et al., 2011; Bhattacharyya, Jha, 2012; Prathap, Ranjitha, 2015).

Существуют различные рода ассоциативных бактерий, стимулирующие рост растений, некоторые из них: *Flavobacterium*, *Acetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Chromobacterium*, *Agrobacterium*, *Erwinia*, *Burkholderia*, *Hypomicrobium*, *Xanthomonas*, *Klebsiella*. Исследована потенциальная роль PGPR в придании устойчивости к водному стрессу (Heidari, Golpayegani, 2012; Kumar et al., 2014) и действию тяжелых металлов (Sayyed et al., 2016). Применения PGPR увеличивали азотфиксацию клубеньковых бактерий сои. Растения тщательно регулируют состав и активность ассоциированного с ними бактериального сообщества. Ассоциативные бактерии способны оказывать благотворное влияние на многие растения, такие как пшеница (Cortivo et al., 2017) соя (Moretti et al., 2019) и другие колонизируя ризосферу (Backer et al., 2018).

Микробные препараты обеспечивают защиту растения от фитопатогенов и других стресс-факторов, а также доминирование в почве полезных групп микроорганизмов (Бровко и др., 2015; 90; Минаева и др., 2018; Патент 2692655 С2, 2019; Chojnaska, 2015). С помощью применения биопрепаратов на основе ростостимулирующих ризобактерий (PGPR) улучшается статус питательных веществ растений-хозяев за счет биологической фиксации N₂, что вызывает увеличение площади поверхности корня, а также стимулирование других полезных симбиозов хозяина (Vessey, 2003; Li et al., 2019). Показана эффективность применения биопрепаратов «Альбит» на растениях по преодолению следующих стрессовых факторов: повышенная и пониженная

температура, также при ее колебаниях, отсутствие влаги; химический стресс при обработке пестицидами; загрязнение почвы различными ксенобиотиками (Злотников А.К., Злотников К.М., 2007; Волобуева и др., 2010). Использование биопрепаратов требует подбора эффективных штаммов микроорганизмов с учетом сортовых, и почвенно-климатических особенностей. Так, Всероссийским научно-исследовательским институтом сельскохозяйственной микробиологии РАН разработан ряд биопрепаратов на основе активных штаммов ризосферных микроорганизмов: Ризоторфин – для инокуляции семян бобовых культур, насыщающий почву азотом; Агрофил – создан на основе штамма рода *Agrobacterium*, повышает устойчивость к инфекционным заболеваниям и увеличивает урожайность овощных культур и др.; Флавобактерин - на основе штамма, относящегося к роду *Flavobacterium*, стимулятор роста, продуцирует фитогормоны, улучшает минеральное питание, водный обмен и активизирует другие физиологические процессы растений; Экстрасол - создан на основе *Pseudomonas*, эффективен при выращивании многих сельскохозяйственных культур, а также Ризоагрин, который повышает содержание протеина в зерне, Биоплант-К. - содержит бактерии способные фиксировать атмосферный азот, синтезировать витамины и ростовые вещества (Завалин, 2005). С учетом климатических факторов, сортовых особенностей и видов культур в «Научно-исследовательском институте сельского хозяйства Крыма» показана эффективность разработанных в отделе сельскохозяйственной микробиологии биопрепаратов в вегетационных и полевых условиях.

Ризобифит – биопрепарат на основе высокоэффективных азотфиксирующих штаммов клубеньковых бактерий сои, нута, гороха, фасоли, чины, чечевицы, вики, люцерны, эспарцета, и других бобовых культур повышает урожайность бобовых культур на 10-40 % (патент RU 2661815 C2, 2018). Диазофит, Ризоэнтерин, Азотобактерин - биопрепараты на основе азотфиксирующих микроорганизмов, улучшают азотное питание растений, повышают азотфиксирующий потенциал, устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессовым факторам (Каменева и др., 2019; Melnichuk et al., 2020).

Фосфоэнтерин - на основе микроорганизмов, мобилизующих трудно-доступные фосфаты (Патент RU 2676926 С1, 2019; Фосфатмобилизующие бактерии, 2018; Баранская и др., 2020). Биополицид, Аурилл, Экобацил – на основе микроорганизмов, подавляющих рост фитопатогенных грибов и бактерий, применяется для защиты растений. Эндомикоризные грибы формируют в почве обширную симбиотическую сеть с растениями, которым поставляют ключевые макроэлементы азота, фосфора и калия из почвенного резерва. Это выливается не только в экономию удобрений, но и в устойчивое повышение урожайности на 10–20% (Абдурашитов, 2017).

Применение биоудобрения Бармил при выращивании растений способствует активизации почвенной микрофлоры, увеличивает интенсивность минерализационных процессов и синтез гумуса, иммобилизации С и N в микробной биомассе, что ведет к росту почвенного плодородия (Научные основы, 2005). Однако, не смотря на ряд преимуществ биопрепаратов, характеризующих их высокую степень экологической безопасности, их эффективность не всегда соизмерима с результативной деятельностью химических пестицидов в связи с большей зависимостью от температуры, влажности, инсоляции (Штерншис, 2012). В связи с этим для решения специфичности применения биопрепаратов необходимо вести подбор живых культур микроорганизмов с учетом их взаимодействия как с растением, так и с окружающей средой.

1.3 Биологическая активность почвы под воздействием антропогенных факторов

Начало изучения биологии почв связано с известными учеными в области почвенной микробиологии, такими как: П.А. Костычев, С.Н. Виноградский, Н.А. Красильников, Е.Н. Мишустин, Т.В. Аристовская, Д.Г. Звягинцев и др.; в области почвенной энзимологии: В.Ф. Купревич, Т.А. Щербакова, А.Ш. Галстян, Ф.Х. Хазиев и др.

В концепции здоровья почвы есть мнение, что это функции экологической устойчивости (Семенов, Соколов, 2016): сбалансированное и адаптированное (к экоресурсам) биоразнообразие педоценоза, самоочищение почвы от загрязняющих веществ путем сорбции и/или биотрансформации, супрессию аборигенными почвенными микроорганизмами вредной биоты. Основу биодиагностики почв составляет мониторинг ключевых параметров, отражающих экологические, биохимические, агрохимические и биологические процессы. На основе отобранных высокочувствительных показателей рассчитывается интегральный показатель эколого-биологическое состояние почвы (Казеев, Колесников, 2012; Нечаева и др., 2016; Азаренко (Мясникова) и др., 2020).

В книге «Биодиагностика почв: методология и методы исследований» предложена методология изучения и оценки биологической активности почв (Казеев, Колесников, 2012), которая включает:

- комплексный подход совместного и одновременного изучения биологических объектов, их почвенных производных и абиотической среды;
- определение ряда наиболее информативных экологических и биологических показателей и последующее нахождение интегрального показателя биологического состояния почвы;
- профильно-генетический и сравнительно-географический подходы к оценке состояния почвы;
- учет пространственной и временной вариабельности свойств почвы;
- единообразие методик и методов исследования.

Плодородие почвы зависит не только от ее химического состава, но также от состава и распределения различных функциональных групп почвенных микроорганизмов в ней. Именно почвенные микроорганизмы выполняют системообразующие функции в таких процессах, как почвообразование, разложение почвенного органического вещества, стимуляция роста и обеспечение защиты растений от патогенной микрофлоры (Андронов и др., 2015; Condron et al., 2010; Schulz et al., 2013; Lareen et al., 2016). Изменение целого или конкретного микробного сообщества почвы может быть чувствительным

индикатором изменения условий качества почвы (Першина и др., 2012; Visser, Parkinson, 1992; Chernov et al. 2017; Muratova et al., 2020). Наиболее распространенные в почве бактерии относятся к родам *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Clostridium*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Corynebacterium*, *Sarcina*, *Azospirillum* и *Mycobacteria*. Сапрофитные грибы превращают мертвые органические вещества в биомассу грибов (т.е. их собственные тела), углекислый газ и органические кислоты. Они необходимы для разложения твердых древесных органических веществ. Грибы играют важную роль в иммобилизации и удержании питательных веществ в почве. В почвах встречаются грибы отдела *Basidiomycota* и *Ascomycota* (Wojcik et al., 2019).

Нестабильная экологическая обстановка делают необходимым применение генетических методов и мониторинга (Биологический контроль, 2010). Анализ таксономического и функционального разнообразия микробиоты почв открывает возможности для мониторинга состояния экосистем, что позволяет не только оценивать риски воздействия стрессоров, но и разрабатывать научно обоснованные подходы к оптимизации и биологизации систем земледелия (Чирак и др., 2013; Свиридова и др., 2016).

Первичное органическое вещество трансформируется в гумус не всегда (Кононова, 1963), а только при определенных физико-химических условиях, когда микробиота перестраивается в соответствующую генно-метаболическую сеть (ГМС) (Колчанов и др., 2000; Лихошвай и др., 2001) – организованное сообщество, возникающее вследствие межорганизменного сигналинга и последовательной экспрессии генов, входящих в метагеном этого сообщества (Воробьев и др., 2011). Молекулярный подход (изучение метагенома) позволяет проводить структурно-функциональный анализ почвенных микробных сообществ и выявлять некультивируемые формы (более 90%) микроорганизмов (Тихонович, Проворов, 2011). Одновременное использование генетических и традиционных методов тестирования позволяет установить связи между разнообразием микроорганизмов и их функцией в экосистеме (Prosser, 2002). Исследование экспрессии метагенома дает возможность выяснить функциональное состояние

микробоценоза, позволяет оценить эколого-генетические последствия биоинженерных трансформаций сельскохозяйственных организмов (Тихонович, Проворов, 2011). Исследования почвенных микробиомов показали, что растения способны формировать свой микробиом ризосферы, о чем свидетельствует тот факт, что разные виды растений на одной и той же почве являются хозяевами специфических микробных сообществ (Berendsen et al., 2012).

Численность эколого-трофических групп микроорганизмов в почве является показателем направленности трансформации органических веществ почвенной экосистемы под влиянием различных воздействий (Тонха и др., 2014). По данным микробиологического исследования от целины к пашне уменьшается нитрификационная способность почв и количество углерода физиологически активной микробной биомассы, что связано со снижением сохранности естественного растительного ценоза (Кутузова и др., 2009).

Исследователями нашей страны, а также ближнего и дальнего зарубежья показана максимальная эффективность диагностики и мониторинга почв биохимическими методами, в частности, с помощью показателей ферментативной активности почв (Щур и др., 2016; Кондакова, 2019; Dick, 1994). Ферментативный потенциал почвы, формируемый микробиотой, выступает маркером её экологической стабильности и плодородия (Хазиев, 2005). Ферменты являются катализаторами трансформатора веществ и энергии, находящихся в биогеоценозе или поступающих в него. Многофункциональная роль ферментов в почве показана их способностью в преобразовании углеводов, азот- и фосфорсодержащих органических соединений, а также повторное использование питательных веществ и участие в различных видах биоремедиации загрязненной почвы (Shukla, Varma, 2011). Ферменты-оксидоредуктазы играют ключевую роль в почвообразовании, катализируя процессы минерализации органического вещества и синтеза гумуса. Их активность служит интегральным индикатором, отражающим типологические особенности почв, уровень гумусированности и характер антропогенной нагрузки при сельскохозяйственном использовании (Куприченков, Антонова, 2010).

Нарушение баланса биохимических реакций в почве приводит к увеличению потоков углекислого газа в атмосферу. В каждом типе почвы складывается характерный, определенный для нее качественный и количественный состав ферментов. Поступление ферментов в почву их иммобилизация и активность обусловлена экологическими факторами – это свойство самой почвы, гидротермические режимы, физико-географические условия, разнообразие растительности, антропогенные воздействия и др. (Пилецкая, Прокопчук, 2014; Хазиев, 2018). Активность почвенных ферментов часто используется в качестве показателей роста и активности микроорганизмов в почве. Установлено, что полифенолоксидазы (ПФО) способствуют разложению органических веществ почвы и растений и участвуют в превращении их в гумус. Снижение активности этого фермента в почве свидетельствует об ухудшении условий для гумусообразования. Диагностическим показателем содержания органического вещества почвы служит активность ПФО и пероксидаз (ПО). Так, в вариантах без механической обработки почвы отмечено увеличение содержания органического вещества по сравнению со вспашкой и рыхлением в условиях Самарской области (Коваленко, Марковская, 2013).

Общая изменчивость активности ферментов в слоях почвы 0–50 см из разных загрязненных участков (углеводороды, бытовые отходы, стоки завода по производству пальмового масла) характеризовалась закономерностью увеличения активности ферментов пероксидаз, дегидрогеназ в сравнении с контрольной почвой (незагрязненной) и могут служить биомаркерами в оценке загрязнения почвы (Ezirim et al., 2017).

Наиболее информативными для оценки последствий влияния сельскохозяйственного использования на биологическую активность почв являются активность дегидрогеназы и инвертазы (Даденко и др., 2013).

Выявлены сопряженные изменения активности ферментов: инвертаза, каталаза, фосфатаза между собой, а также с содержанием гумуса и гигроскопической влажностью в черноземах естественных биоценозов степной зоны и лесостепного пояса центрального Кавказа (Хежева и др., 2010).

Различный эффект влияния температуры на две группы исследованных оксидаз (полифенолоксидаз и полифенолпероксидаз) и возможность “замещения” активности одного типа ферментов другим в современной и погребенной серой лесной почвы при изменении условий аэрации, может служить диагностическим показателем при прогнозировании эффекта потепления (Якушев и др., 2014).

Выявлена специфичность активности каталаз к воздействию тяжелых металлов (кадмия и свинца) вносимых в аллювиально-луговой насыщенной среднесуглинистой почвы (гумус – 6,9%; pH H₂O 6,5) и чернозёма обыкновенного среднесуглинистого (гумус – 8,6%; pH H₂O 7,8) в годовой динамике. Ферменты каталаз для данных поллютантов могут служить биоиндикаторами загрязнения почвы, и как показатель токсичности для живых объектов на молекулярном уровне, активность которых снижается с увеличением доз (Новоселова, Волкова, 2017). Активность протеаз и инвертаз (снижение более 30 %) можно использовать в качестве индикаторов при загрязнении тяжелыми металлами светло-каштановых почв города Алматы (Казахстан) (Мынбаева, Медведева, 2011).

В качестве диагностического показателя функционально-экологического состояния почв при длительном воздействии удобрений N₄₀P₄₀K₄₀ на высоком фоне в черноземе обыкновенном уреазная активность является наиболее чувствительным биохимическим показателем, а наименее – инвертазная и каталазная (Воронин и др., 2006).

Биологическая активность чернозема выщелоченного при совместной обработке соломы и семян биопрепаратом Байкал М1 показала незначительное варьирование активности каталаз относительно не обработанных почв; повышение фосфатазной активности (отвечающий за минерализацию органического фосфора); незначительное увеличение инвертазной активности, которая отражает содержание в почве легкогидролизуемых углеводов (способные расщеплять ди-, три- и полисахариды по гликозидным связям до мономеров) и иммобилизацию микробоценоза в почве (Селявин и др., 2015).

При оценке биологической активности почв чернозема обыкновенного под бинарные посевы подсолнечника с бобовыми культурами наиболее

информативными являются активность ферментов дегидрогеназ (повышение по сравнению с монопосевами на 11-111 %) и протеаз (увеличение до 7,6 раза) (Минникова и др., 2017).

Таким образом, задачи преодоления абиотических стрессов у растений, среди которых и засуха, увеличивают важность и актуальность понимания того, как микробиомы могут быть использованы для регулирования функционального потенциала ферментативного аппарата почвы через агро- и биотехнологии, что позволит решать проблемы сохранения агроэкосистем и обеспечения здоровой продукцией населения.

1.4 Физиологический статус как индикатор состояния растений при неблагоприятных условиях окружающей среды

В связи с изменениями климата наблюдается увеличение среднегодовых температур и засушливых периодов, а также уменьшение доступности пресных водных ресурсов. Потеря урожая при длительном водном дефиците связана со снижением функциональной активности фотосинтетического аппарата вследствие закрытия устьиц и уменьшение проводимости листьями углекислого газа, нарушением синтеза хлорофиллов, изменений в фотохимических реакциях и реакциях восстановления CO_2 , нарушения структуры хлоропластов, задержки оттока ассимилятов из листьев (Чернова, Былова, 2004; Физиология устойчивости, 2006; Чернышенко и др., 2017; Дымова и др., 2018; Рахманкулова и др., 2020; Azam et al., 2015). Стресс в растительной клетке увеличивает концентрацию ионов в цитоплазме, которые вызывают нарушения в структуре и функциях биополимеров (Физиология устойчивости, 2006). Изменения физиолого-биохимических процессов в растении также проявляются в активизации ферментов оксидоредуктаз и увеличением содержания пролина, выполняющего антиоксидантную, сигнально-регуляторную и осмопротекторную функции, используемые растениями для повышения устойчивости к биотическому и абиотическому стрессу (Сергеева и др., 2011; Маевская, Николаева, 2013; Колупаев и др., 2014; Thalooth et al., 2006; Meena et al., 2019).

Аминокислота пролин обладает способностью предотвращать образование агрегатов белковых молекул при стрессовых условиях (Samuel et al., 2000). Ряд новых направлений исследований показывают, что в регуляции активности и экспрессии генов антиоксидантных ферментов растений *Salvia officinalis* L. под действием УФ-В облучения участвует аминокислота пролин (Шакурова, 2009; Радюкина и др., 2011). Применение экзогенного L-пролина усиливает ферментативную активность APX (аскорбатпероксидаза), MDHAR (моногоидроаскорбатредуктаза) и DHAR (дигидроаскорбатредуктаза) в культурах табака, которые подвергались стрессу засоления (Chitara et al., 2017). Также влияние экзогенного пролина в стрессовых условиях выявлено в работе антиоксидантных ферментов и на других растениях, например, нута (Kaushal et al., 2011), сахарного тростника (Patade et al., 2014), чечевицы (Molla et al., 2014), дыни (Yan et al., 2011) и др.

Основатель российской биохимии академик А.Н. Бах, работы которого получили всемирное признание в конце 19 начале 20 века совместно с Р. Шордой, сформулировали и экспериментально доказали перекисную теорию биологического окисления (Газарян и др., 2006). В частности, ферменты каталаз и пероксидаз, являются важнейшим звеном в антиоксидантной защите клеток, служат показателем адаптации растений в ответ на стрессовые воздействия тяжелых металлов, засухи (Хайрулина и др., 2010; Курамшина и др., 2014; Михайлова, 2019; Sofo et al., 2015; Hafeza, Seleiman, 2017). Предполагается, что взаимодействующие с полисахаридами изопероксидазы обеспечивают направленное отложение лигнина в клеточных стенках растений, который, в свою очередь, одновременно является эффективным укрепляющим материалом и защищает растения от патогенных микроорганизмов (Максимов и др., 2011). Известны работы по изучению инфицированных (ХВК, ВТМ) растений-хозяев картофеля, дурмана, табака, в которых рассматривается вопрос о возможности использования изоэнзимов пероксидаз в качестве маркера в селекционной работе при выведении сортов растений устойчивых к вирусным заболеваниям (Фермент пероксидаза, 1988). Выделенные из корней и корневых экссудатов люцерны

посевной пероксидазы участвуют в пероксидажном окислении в очищенной форме, что является убедительным доказательством их участия и микробных метаболитов в деградации ПАУ в ризосфере люцерны (Дубровская и др., 2017). Эти данные указывают на сопряжение процессов растительной и микробной деградации поллютантов в ризосферной зоне.

Выявлено, что содержание хлорофилла, начальной флуоресценции, первичный выход фотохимии фотосистемы II (F_v / F_o) и максимальный квантовый выход фотосистемы II (F_v / F_m) можно рассматривать как надежные индикаторы при скрининге зародыша плазмы ячменя на засухоустойчивость (Rong-hua et al., 2006; Zhuang et al., 2020). В стрессовых условиях от засухи выявлено снижение фотосинтеза и устьичной проводимости от 38 до 60 % в генотипах пшеницы (Sharifi, Mohammadkhani, 2016). Использование грибов арбускулярной микоризы и бактериальных биоудобрений (смесь бактерий *Azospirillum* и *Azotobacter*) при изучении симбиотического влияния на растения сорго при стрессе засухи показали смягчение внешних условий достигнутое синергетическим действием бактерий и грибов, которые способствовали увеличению количества фотосинтетических пигментов, растворимых белков и осмотической регуляции, а также уменьшению утечки электролитов и повышению урожайности зерна на 27 % в сравнении с вариантом без обработки (Kamali, Mehraban, 2020).

Таким образом, анализ литературных источников показал, что физиологические параметры у растений являются показателями их статуса и функционирования защитных механизмов при действии различных негативных факторов. Применение эффективных штаммов микроорганизмов способствует поддержанию водного баланса у растений и позволяет снижать их стрессовое состояние в условиях засухи. Комплексный подход в изучении доминантов направленности биологической активности почвы, отражающих состояние биохимических процессов и физиологического статуса растения в условиях недостаточного водообеспечения, является важным при создании агроэкосистем и

управлении их функционированием и направлен на сохранение плодородия почв и стабилизацию агроэкосистем.

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе диссертационной работы лежат исследования двух систем земледелия: традиционной (ТС) для условий Крыма и ресурсосберегающей – по технологии прямого посева (ПП) в стационарном опыте (аттестат длительного опыта № 170, приложение А1), 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 (рисунок 2.1).

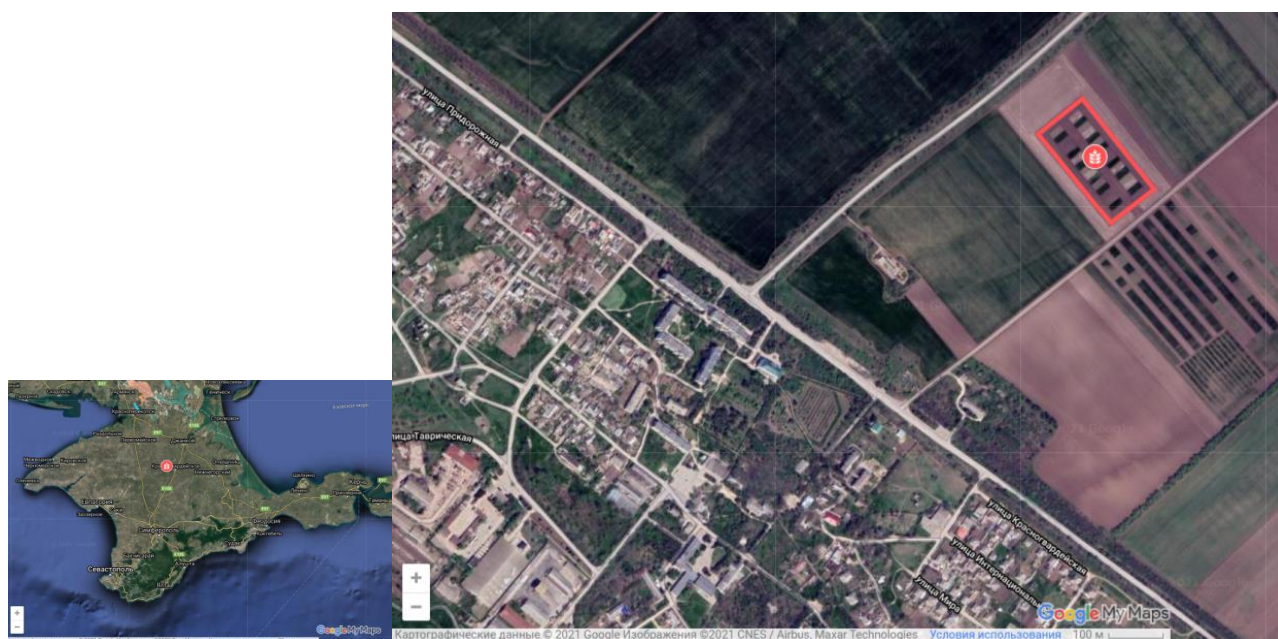


Рисунок 2.1 – Место расположения стационарного опыта по изучению систем земледелия

Почва – чернозем южный малогумусный на лессовидных легких глинах. Мощность гумусового горизонта до 40 см, всего гумусового слоя – до 70 см (Гусев, Колесниченко, 1955; Драган, 2004). Классификация изучаемой почвы (Драган, 2004):

- Тип – черноземы
- Подтип – южные
- Род – мицелярно-карбонатные, мощность гумусового слоя – маломощные (40-25 см гумусовый горизонт)

○ Вид – слабогумусированные

Черноземы южные характеризуются крупно легкоглинистым пылевато-иловатым гранулометрическим составом. 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). Структурные показатели почвы: водостойкие агрегаты размером $>0,25$ мм составляет до 77%; агрономически ценные 1-10 мм – 72–77 %. Общая пористость верхних горизонтов составляет 50,2%. 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). Плотность сложения (объемная масса) в пахотном слое 1,14–1,28, а в подпахотном – 1,33–1,48 г/см³.

Растения *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Сорго зерновое сорта Крымбел (селекция КФУ им. В.И. Вернадского) представляет собой однолетнее самоопыляющееся растение, у которого фотосинтез эффективно протекает по пути С₄, благодаря чему растение хорошо себя проявляет в условиях высокой температуры и засухи. По содержанию фитокомпонентов (антоцианы, каротиноиды, фенольные кислоты, танины) сорго превосходит другие злаки, превышая 6% от массы растения.

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. Климат степной зоны засушливый, гидротермический коэффициент (ГТК) составляет 0,74, умеренно жаркий, с умеренно мягкой зимой. Среднегодовая температура воздуха 9,7–10,5 °С. В июле,

в полдень, температура повышается до 28,9–30,2 °С, а в некоторые годы – до 40–42 °С. Средний минимум годовых температур находится в пределах от -19 до -23 °С. Зимой возможно понижение температуры до -31 °С. Вегетационная оттепель возможна в 35 % зим. Период без заморозков – 171 день. Сумма температур выше 10 °С достигает 3280 °С. Годовая сумма осадков – 435 мм, из них в период активной вегетации выпадает 285 мм. Годовая испаряемость – 843 мм. Преобладают восточные (22 %) и северо-восточные (20 %) ветры. Сильный ветер бывает 28–30 дней в году. Количество дней с суховеями – 10–19. Вероятность засух для большей части территории составляет 40–50 % лет (Паштецкий, 2015).

За два месяца до посева сорго зернового количество осадков выпало меньше на 114,7 % (2018 год), 66,2 % (2019 год) и 134,4 % (2020 год) в сравнении со среднемноголетними показателями (приложение А2, А3, А4). После посева сорго в течение месяца также отмечен дефицит влаги в 39,8–65,7 % в годы исследования, что отрицательно отразилось на всходах культуры. В фазу выметывания растений (период отбора образцов для анализа) в 2018 году также наблюдали явления засухи, тогда как в последующие годы выпадение осадков превышало среднемноголетние показатели на 103,4 и 43,4 % соответственно. После отбора в 2018 и 2019 годах количество осадков колебалось по месяцам: то превышало среднемноголетние значения более чем на 50 %, то снижались до 90 %, а в 2020 году установлено снижение на 84,2 %.

2018 год (приложение А2 и А5). Погодные условия 2018 года отличались значительными погодными аномалиями: зимой – дефицитом осадков, а с весны и до середины лето высокой температурой (рисунок 2.2 и 2.3). Во второй декаде апреля почва прогрелась до 15 °С. Критический дефицит осадков (в 2,4 раза ниже нормы) привёл к возникновению почвенной засухи в конце весеннего периода. Число дней с относительной влажностью воздуха 30 % и меньше выросло до 31. Уже в первой декаде мая температура в течение четырех-пяти дней равнялась 30–32 °С. Хозяйственно-полезные дожди отсутствовали в течение 1,5 месяца. Гидротермический коэффициент за вегетационный период (апрель–август) составил 0,65, что соответствует интенсивности засухи – слабая (Страшная и др.,

2013). Запасы продуктивной влаги к середине лета в пахотном и метровом слоях почвы понизились до критических значений. Несмотря на изреженные всходы сорго, обусловленные посевом в полусухую почву, обильные осадки в июле (136,8 мм) стимулировали его кущение и выравнивание посевов, что обеспечило нормальную густоту стояния к уборке.

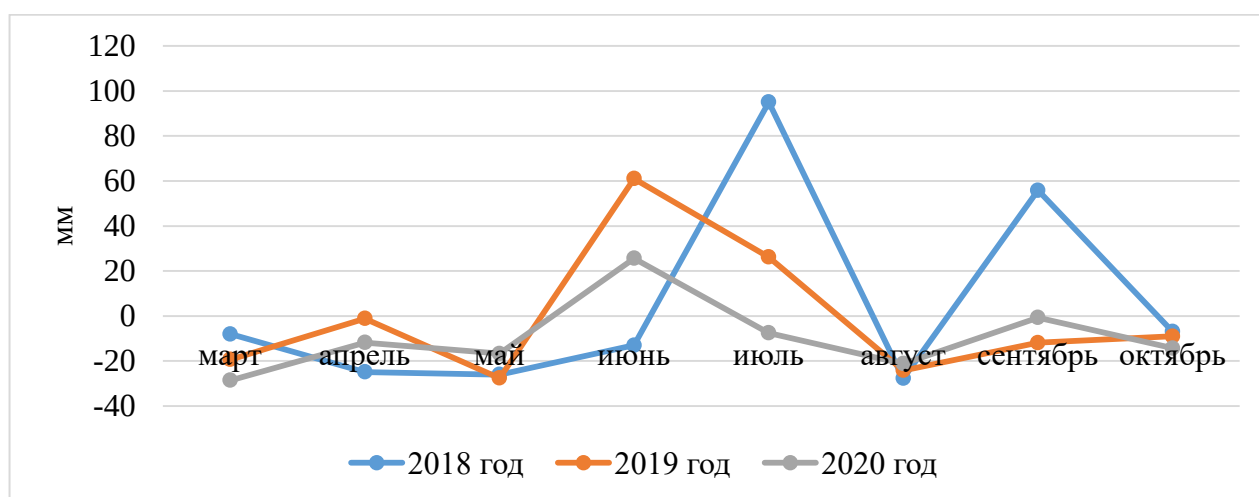


Рисунок 2.2 – Отклонение количества атмосферных осадков от среднеемноголетних показателей

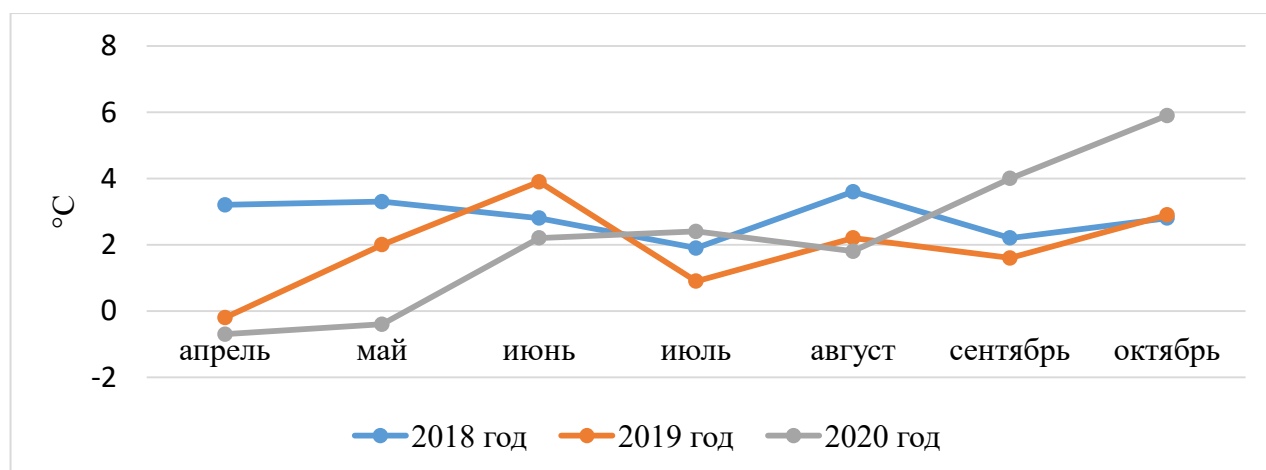


Рисунок 2.3 – Отклонение температуры воздуха от среднеемноголетних показателей

В 2019 году количество продуктивной влаги пополнилось за счет осадков в ноябре–январе (приложение А6), сумма осадков составила 183,6 мм, что на 79,6 мм больше средней многолетней (рисунок 2.2). Начиная с февраля до июня, кроме апреля месяца, выпадение осадков ниже средней многолетней нормы в 1,4 – 2,9 раза. В апреле месяце для посадки сорго зернового сложились более благоприятные обстоятельства для его посадки, выпадение осадков почти на уровне среднемноголетних данных. При посеве сорго зернового почва прогрелась до оптимального уровня – 14 °С (на глубине 10 см). В период активного роста растений июнь – июль осадков выпало выше на 61,0 и 26,2 мм среднемноголетней. Наблюдалось неравномерное выпадение осадков по месяцам, но, тем не менее, они обеспечили растения влагой. Температура воздуха за период вегетации сорго зернового повысилась на 0,9 – 3,9 °С в сравнение с среднемноголетними значениями (рисунок 2.3; приложение А3). В период вегетации сорго зернового наблюдалось отсутствие засухи (ГТК 0,78).

В степной зоне Крыма **2020 года** погода характеризовалась резкими аномальными отклонениями (рисунок 2.2 и 2.3; приложение А4 и А7). Осадки в январе и феврале значительно меньше среднемноголетних показателей. Доминирование острозасушливых условий весной (сумма осадков 44 мм) достигло пика в марте, когда положительная температурная аномалия составила 2.6-кратное превышение нормы на фоне 12.9-кратного дефицита осадков. Условия апреля и мая были ближе к среднемноголетним, однако дефицит влаги сохранялся. В июне температура превышала норму на 2,2 °С, прошли обильные осадки 84,6 мм, полезные для сорго зернового, которое к тому времени находилось в фазе формирования метелки. Весь вегетационный период отмечен засухой средней интенсивности (ГТК 0,59). Далее, до уборки сорго сохранялись высокие температуры (август-сентябрь) при значительном недостатке на 21,2 мм хозяйственно-полезных осадков в августе.

Таким образом, условия выращивания сорго зернового значительно отличались по влагообеспеченности и температурным показателям в зависимости

от года исследований: погодные условия 2018 и 2020 гг. характеризовались засухой слабой и средней интенсивности, 2019 год – ее отсутствием.

ГЛАВА 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Полевой эксперимент

Постановку полевого опыта проводили по методике Доспехова (1985). Особенности формирования урожайности сорго зернового сорта Крымбел под влиянием систем обработки почвы и комплекса микроорганизмов (КМ) изучали в условиях полевого опыта по следующим **вариантам**: 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. Все исследования проводились в двух севооборотах со следующим чередованием культур сорго зерновое - озимая пшеница – лен масличный – озимый ячмень (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Схема проведения полевого эксперимента

№	Прямой посев		Традиционная система	
	Контроль (без применения КМ)	обработка семян КМ	Контроль (без применения КМ)	обработка семян КМ
1	Чистый пар		Горох посевной	
2	Озимая пшеница		Озимая пшеница	
3	Лен масличный		Лен масличный	
4	Озимый ячмень		Озимый ячмень	
5	Сорго зерновое		Сорго зерновое	

Обработка почвы: согласно плану исследований по традиционной системе мелкая на 10–12 см, 8–10 см; по прямому посеву без механической обработки 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. Сорго сеяли с шириной междурядья: прямой посев – 17,5 см (сеялка Gerardi-G117), традиционный – 70 см (сеялка Клен). Повторность опыта трехразовая с площадью учетной делянки 300 м². Уход за посевами: обработка пестицидами при учете ЭПВ. Уборка урожая комбайном Сампо-500.

Отбор проб. 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

Численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов (таблица 3.2) в ризосфере зернового сорго исследовали стандартными методами почвенной микробиологии (Теппер и др., 2005). Почвенную суспензию (1г почвы в 9 мл дистиллированной воды) после соответствующих разведений высевали на агаризованную селективную среду. Питательные среды готовили согласно практикуму по микробиологии (Теппер и др., 2005). Бактерии выращивали при 28-30°C в чашках Петри. Объем суспензии для посева 100 мкл.

Для оценки направленности биологических процессов в трансформации органического вещества рассчитывали индексы педотрофности Никитина (соотношение количества педотрофов к аммонификаторам), олиготрофности Аристовской (олиготрофы / аммонификаторы), олигонитрофильности (олигонитрофилы / аммонификаторы), а также коэффициент минерализации (амилолитики / аммонификаторы) (Титова, Козлов, 2012). Численность микроорганизмов учитывали в колониеобразующих единицах (КОЕ) в перерасчете на грамм абсолютно сухой почвы. Влажность почвы определяли гравиметрическим методом (Вадюнина, Корчагина, 1961).

Таблица 3.2 – Состав питательных сред эколого-трофических групп микроорганизмов

Название группы микроорганизмов	Состав питательной среды на 1000 мл H ₂ O	Разведение почвенной суспензии	Сроки учета, сутки
Азотфиксаторы	Виноградского (без азота) : K ₂ HPO ₄ – 0.5 г; MgSO ₄ – 0.5 г; глюкоза – 15 г; NaCl – следы; FeSO ₄ – следы; MnSO ₄ – следы; агар – 20 г	5	5
Аммонификаторы	Мясопептонный агар: пептон сухой ферментированный – 10.0 г; экстракт мясной – 11.0 г; NaCl – 5.0 г; агар – 15.0 г.	5	5
Амилолитики	Крахмало-аммиачная: K ₂ HPO ₄ – 1.0 г; (NH ₄) ₂ SO ₄ – 2.0 г; MgSO ₄ – 1.0 г; NaCl – 1.0 г; CaCO ₃ – 3 г; растворимый крахмал – 10; агар – 20 г	5	5
Актинобактерии		5	10
Микромицеты	Чапека: KH ₂ PO ₄ – 1.0 г; MgSO ₄ – 0.5 г; NaNO ₃ – 2.0 г; KCl – 0.5 г; сахароза – 20 г; CaCO ₃ – 3 г; агар – 20 г	3	3
Целлюлозолитики	Гетчинсона: K ₂ HPO ₄ – 1.0 г; CaCl ₂ – 0.1 г; MgSO ₄ – 0.3 г; NaCl – 0.1 г; FeCl ₃ – 0.01 г; NaNO ₃ – 2.50 г; агар – 20 г. Источник целлюлозы-стерильная фильтровальная бумага	2	14
Педотрофы	Почвенный агар: почва 1 кг; агар – 20 г	5	5
Олиготрофы	Голодный агар – 20 г	5	5

3.3 Физико-химические и биохимические методы

3.3.1 Определение ферментативной активности ризосферы и интегрального показателя биологического состояния почвы

Определение активности ферментов каталаз ризосферы. Активность каталаз основывается на измерении скорости распада перекиси водорода при взаимодействии ее с почвой по объему выделяющегося кислорода. Активность каталазы измеряли по методике Галстяна (Галстян, 1978) газометрическим методом: навеска почвы – 1 г, субстрат H_2O_2 – 5 мл 5% и CaCO_3 – 0,5 г, время инкубации – 1 мин, температура инкубации – 30 °С, активность выражали в мл O_2 /мин/г почвы.

Определение активности ферментов пероксидаз ризосферы. Активность пероксидаз основывается на способности окислять перекись водорода под действием гваякола до тетрагваяколхинона, который окрашивается в красно-коричневый цвет (Грицаенко, 2003). Активность пероксидаз почв определяли фотоэлектроколориметрическим методом: к навеске пробы – 50 г вливали 100 мл 0,5 Н NH_4NO_3 , затем встряхивали 30 мин и фильтровали через фильтр «Синяя лента». К 10 мл фильтрата добавляли 1мл 0,3% гваякола и 1 мл $\text{H}_2\text{O}_2(0.5\text{Н})$. Перемешивали и инкубировали 1 час в термостате, а после измеряли на зеленом светофильтре. Активность пероксидаз выражали через формулу 3.1.

$$A = \frac{C * 2,53 * 100}{H}, \quad (3.1)$$

где А – активность пероксидаз, мкмоль $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}_2$ / 100 г почвы

С – концентрация Аg вычисленная по калибровочной кривой

Н – аликвотная проба, г

2,53 – перерасчет в мкмоль гваякола

Определение активности ферментов полифенолоксидаз ризосферы. Определение активности полифенолоксидаз строится на их способности

катализировать реакции окисления дифенолов (пирокатехин) кислородом воздуха в 0-хинон. Во время ферментативной реакции 0-хинон восстанавливается аскорбиновой кислотой. Количество окисленной аскорбиновой кислоты определяют йодометрическим методом, описанным у Грицаенко с соавторами (2003): к навеске пробы – 50 г вливали 100 мл 0,5 Н раствор NH_4NO_3 , затем встряхивали 30 мин и фильтровали через фильтр «Синяя лента». К 20 мл фильтрата добавляли 1мл фосфатного буфера 6,4 рН, 2 мл 0,4 % аскорбиновой кислоты, 3 мл 0,2 % пирокатехина. Раствор перемешивали и инкубировали в термостате 1 час при 30 °С затем добавляли 5 мл 5 % H_3PO_4 , 1 мл 0,5 % крахмала и титруют 0,01 Н раствором KJO_3 . В контрольном варианте (без почвы) с раствором выполняли все те же операции. Активность полифенолоксидаз вычисляли по формуле 3.2.

$$A = \frac{(a-b) \cdot 100}{H}, \quad (3.2)$$

где А – активность полифенолоксидаз, мл KJO_3 / 100 г почвы

α – объем 0.01Н раствора KJO_3 , израсходованный на титрование контрольного варианта, мл;

b – объем 0.01Н раствора KJO_3 , израсходованный на титрование исследуемого варианта, мл;

H – навеска почвы, г.

Отношение активностей полифенолоксидаз к пероксидазам показывает интенсивность гумификации и выражается коэффициентом гумификации ($K_{\text{гум}}$).

Определение эмиссии CO_2 ризосферы. Дыхание почвы определяли по интенсивности выделения углекислого газа (мг/г в сутки) титриметрическим методом в модификации Макарова (Методические рекомендации, 1981). Стаканчик с 25 г почвы помещали в герметично закрытый флакон, в который залито 20 мл раствора 0,1 Н NaOH , затем инкубировали 5 суток в термостате. После компостирования к раствору щелочи флаконов добавляли 2 мл 50 % раствора BaCl_2 , 2-3 капли 0,1 % спиртового р-ра фенолфталеина и титровали 0,1 Н

раствором HCl. Контрольный вариант не содержал почву. Дыхание почвы вычисляли по формуле 3.3.

$$CO_2 = \frac{(V_1 - V_2) * 2,2}{m * t} \quad (3.3)$$

V_1 – объем 0,1 Н раствора HCl, израсходованный на титрование контрольного варианта (исходного 0,1 Н раствора NaOH), мл.

V_2 – объем кислоты, израсходованный на титрование исследуемого варианта, мл.

m – навеска почвы, г; t – время экспозиции, сутки.

Определение интегрального показателя биологического состояния почвы. Для определения активности ризосферы выбран интегральный показатель биологического состояния (ИПБС), который рассчитывали по методике, описанной в работе К.Ш. Казеева и С.И. Колесникова (Казеев, Колесников, 2012). В ИПБС включили широкий набор высокочувствительных показателей: активность каталаз, пероксидаз, полифенолоксидаз и эмиссию углекислого газа. Для этого в выборке максимальное значение каждого из показателей принимается за 100 % и по отношению к нему в процентах выражается значение этого же показателя в остальных образцах.

$$B_1 = \frac{B_x}{B_{max}} * 100\%, \quad (3.4)$$

где B_1 – относительный балл показателя,

B_x – фактическое значение показателя,

B_{max} – максимальное значение показателя.

После этого рассчитывали средний оценочный балл изученных показателей (активность ферментов и эмиссию CO_2) для варианта, абсолютные значения, которых не могут быть суммированы, так как имеют разные единицы измерения.

Интегральный показатель биологического состояния почвы рассчитывают аналогично формуле (3.4):

$$\text{ИПБС} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{ср_max}}} * 100\%, \quad (3.5)$$

где $B_{\text{ср}}$ – средний оценочный балл всех показателей, $B_{\text{ср_max}}$ — максимальный оценочный балл всех показателей.

Показатели ферментативной активности и дыхания почвы учитывали в перерасчете на грамм абсолютно сухой почвы.

3.3.2 Определение суммы хлорофиллов (a+b) в листьях и водного дефицита растений

Содержание суммы хлорофиллов (a+b) определяли по методике В.Т. Лобкова и Г.В. Наполова (Пат. 2244916 С1, 2003). Для определения содержания зеленых пигментов у сорго зернового отбирали 0,1 г листьев и мелко измельчали. Затем их помещали вials объемом 20 мл, заливая 10 мл 96 %-го этилового спирта и ставили в помещение без доступа света во избежание разрушения пигментов фотосинтеза. Через 48 часов проводили измерения на колориметре фотоэлектрический концентрационный КФК-2. Расчет концентрации пигментов листьев в мг/г сырой массы проводили по формуле 3.6.

$$A = \frac{V * C}{P * 1000}, \quad (3.6)$$

V – объем спиртовой вытяжки (10 мл);

C – концентрация пигментов в спиртовом растворе (a+b), (мг/л);

P – навеска растительного материала (0,1 г).

Статус водного режима растений сорго зернового определяли по методике под ред. Третьякова Н.Н. (Практикум, 1990).

3.3.3 Определение активностей пероксидаз и содержания свободного пролина в листьях растений

Активность пероксидаз рассчитывали по методике описанной у Грицаенко с соавторами (2003). Растительный материал массой 1 г растирали в ступке с 0,2 г CaCO_3 . Затем переносили в колбы на 100 мл смывая водой. Объем доводили до 100 мл и перемешивали. Затем аликвотную суспензию объемом 25 мл отбирали в колбу на 50 мл и доводили до метки р-ром 5 % $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Настаивали 30 минут, а после фильтровали. Фильтрат объемом 2 мл разбавили 6 мл водой, прилили 1 мл 1 % гваякола. Пробирку с фильтратом поставили в воду с температурой 20°C и долили 1 мл 0,05 н. H_2O_2 . Через 15 минут измеряли оптическую плотность на фотоэлектроколориметре. Контрольным раствором служил раствор, взятый таким же количеством, как в варианте опыта, но разбавленный водой до 10 мл. активность пероксидаз (мкмоль $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}_2$ мин* г растения) вычисляли по формуле 3.7.

$$A = \frac{84,3 * C}{a * n}, \quad (3.7)$$

C – концентрация серебра мг/мл, рассчитана по калибровочной кривой (Грицаенко);

α – объем исследованного раствора, мл;

n – навеска растительного материала для анализа, г.

Определение содержания свободного пролина в листьях растений. Пролин определяли по модифицированной методике Г.Н. Шихалеева и др. (2014). Навеску 0,2 г из свежих листьев заливали 10 мл кипящей дистиллированной воды и выдерживали 10 мин на водяной бане при температуре 100 °C. Затем в чистую пробирку заливали 2 мл ледяной уксусной кислоты, 2 мл нингидринового реактива и добавляли 2 мл приготовленного экстракта. Пробы инкубировали 20 мин на водяной бане при температуре 100°C после чего охлаждали до комнатной температуры (льдом). Затем измеряли оптическую плотность на

фотоэлектроколориметре при длине волны 540 нм. Значение содержания свободного пролина рассчитывали с помощью калибровочной кривой, построенной по плотности химически чистого пролина.

3.4 Анализ таксономической структуры микробиома почвы

ДНК из почвенных образцов выделена с помощью набора PowerSoil DNA Isolation Kit (MoBio, США) по протоколу производителя для гомогенизации образцов использовали VortexGenee-2 (Mo-Bio, США). Очищенную ДНК использовали в качестве матрицы в реакции ПЦР при создании ампликонных библиотек гена 16S рРНК, используя универсальные праймеры к варибельному участку V4 – F515 (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA) и R806 (GGACTACVSGGGTATCTAAT) (Bates et al., 2010). Библиотеки секвенировали с помощью MiSeq (Illumina, США) на базе Центра коллективного пользования «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» при ФГБНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии (Санкт-Петербург-Пушкин). Таксономический и статистический анализ полученных результатов проведен с использованием пакетов программ Bioconda (Grüning et al., 2018), QIIME (Caporaso et al., 2010), PASTPaleo (Hammer et al., 2001) и базы данных Ribosomal Database Project (RDP).

3.5 Статистические методы

Статистическую обработку полученных результатов исследований проводили в программах Microsoft Excel 2016 и Statistica 10.0. Для обработки данных использованы методы двухфакторного дисперсионного анализа с трехкратно повторными измерениями (Доспехов, 1985; Стукач, 2011г.) и представлены в виде среднего арифметического $\pm$ стандартной ошибкой средней ($\bar{x} \pm S\bar{x}$). Звездочки (*) в рисунках и таблицах указывают на значимые различия при $p < 0,05$. За факторы при выращивании сорго зернового принимали: погодно-

климатический (год исследования), обработка КМ и их взаимовлияние. Значимость оценивалась при $p < 0,05$ для всех статистических тестов. Зависимыми переменными были: показатели ферментативной активности почвы и физиологического статуса растений, количество эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов, высота, биомасса и урожайность сорго зернового.

Результаты микробиологического посева на элективные питательные среды визуализировали с использованием теплокарт (heat map). Данные представлены в виде значений $\log N$ (где N – количество КОЕ/г почвы микроорганизмов определенной эколого-трофической группы), нормализованных по принципу Z-трансформации (Никитин и др., 2020 г.).

Взаимосвязь изученных показателей оценена корреляционным анализом Пирсона. Значения статистически значимого коэффициента корреляции (r знач) оценивали при $p < 0,05$.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

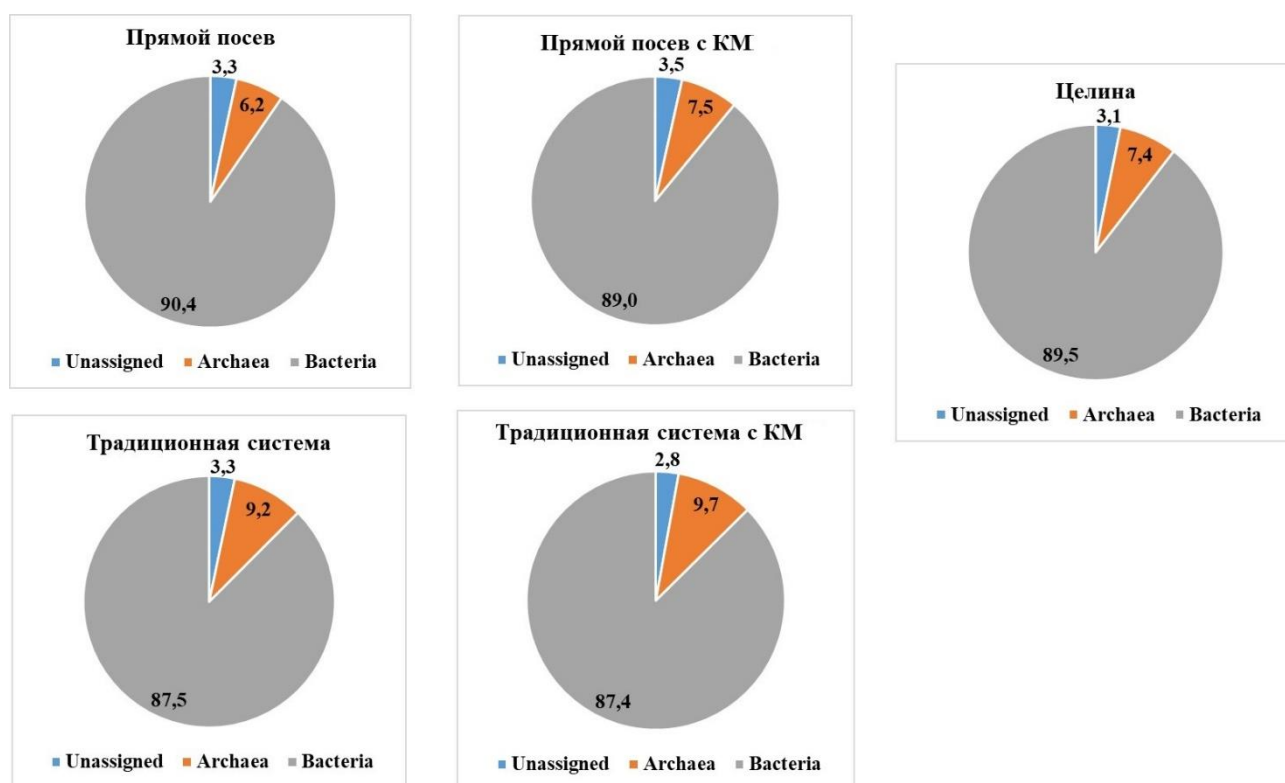
4.1 Экологическое состояние биологической активности чернозема южного под влиянием интродуцированных микроорганизмов при выращивании сорго в засушливых условиях

4.1.1 Изучение таксономической структуры микробиома чернозема южного

Таксономический и функциональный состав почвенного микробиома в агроценозах подвержен влиянию абиотических и биотических факторов, среди которых доминирующую роль играют агротехнологические практики, регулирующие направленность и интенсивность биологических процессов (Mathew et al., 2012; Tikhonovich, Provorov, 2011; Choudhary et al., 2018). В связи с этим, параметры микробного сообщества служат интегральным критерием для оценки состояния агроэкосистем (Bulgarelli et al., 2013). Ряд микроорганизмов обладают свойствами эффективных биоиндикаторов, фиксирующих как текущий статус почв, так и динамику протекающих в них сукцессионных и метаболических процессов (Основные достижения, 2017). Недавние исследования показали, что микробные сообщества содержат ключевые таксоны, которые определяют состав и функционирование сообществ независимо от их численности (Семенов, 2019).

Таксономический состав микробиоценоза южного чернозёма проанализирован методом высокопроизводительного секвенирования ампликонов гена 16S рРНК. Отбор проб для проведения исследований осуществлялся в 2018 году на всех опытных делянках, а также на целинном участке (45°32'21.6"N 34°12'07.3"E), локализованном в одном километре от стационарного опытного участка. Проведенный анализ установил доминирование домена Bacteria над доменом Archaea в исследуемом типе почвы, что соответствует типичной

таксономической структуре чернозёмов (рис. 4.1). При этом было зафиксировано значимое увеличение (в 1,5 раза) относительной численности архей в условиях традиционной системы земледелия по сравнению с технологией прямого посева. Полученные данные находятся в соответствии с результатами предыдущих исследований, выполненных на чернозёмных почвах (Основные достижения, 2017). Применение комплекса полезных микроорганизмов (КМ) индуцировало повышение относительного обилия архей в двух изучаемых агротехнологиях. Среди доминирующих компонентов почвенного микробиома идентифицированы представители прокариот, не поддающиеся точной таксономической принадлежности, доля которых варьировала в диапазоне 2,8–3,5 %.



Unassigned – неатрибутированные таксоны.

Рисунок 4.1 – Представители домена прокариот чернозёма южного под действием комплекса микроорганизмов (КМ) и систем земледелия по данным метабаркодинга по гену 16S рРНК.

В прокариотном сообществе чернозема южного доминировали (относительная доля превышает 1%) микроорганизмы из 1 филы архей и 9 фил бактерий (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на обилие фил прокариот в черноземе южном (указаны филы с обилием более 1%, 2018 г.)

Филы	Относительное обилие, %				
	Прямой посев (ПП)	ПП с КМ	Традиционная система (ТС)	ТС с КМ	Целина
Unassigned	3,35±0,47	3,48±0,11	3,27±0,02	2,84±0,39	3,12±0,35
<i>Crenarchaeota</i>	6,22±0,21	7,47±1,02	9,20±0,78	9,72±0,20	7,35±0,54
<i>Acidobacteria</i>	6,42±0,63	7,12±0,83	7,25±0,31	6,18±0,34	5,42±0,23
<i>Actinobacteria</i>	29,08±0,66	26,29±0,36	27,87±1,44	30,42±1,66	35,37±1,11
<i>Bacteroidetes</i>	9,95±0,14	11,09±0,50	10,23±0,74	8,23±1,16	6,24±0,57
<i>Chloroflexi</i>	3,75±0,37	3,55±0,50	3,85±0,20	4,13±0,09	5,09±0,01
<i>Firmicutes</i>	2,52±0,62	2,57±0,78	3,50±0,40	3,89±0,46	2,55±0,39
<i>Gemmatimonadetes</i>	3,38±0,44	3,16±0,27	4,34±0,09	4,15±0,08	4,54±0,03
<i>Planctomycetes</i>	3,81±0,77	3,67±0,63	3,03±0,22	3,39±0,02	4,27±0,32
<i>Proteobacteria</i>	26,36±1,35	25,62±0,74	23,80±0,53	23,88±0,33	23,09±0,03
<i>Verrucomicrobia</i>	3,62±1,08	4,42±1,38	1,86±0,10	1,57±0,21	1,39±0,18

В их число вошли *Crenarchaeota* (домен *Archaea*), а также *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia* (домен *Bacteria*). Согласно полученным данным, фила *Actinobacteria* являлась наиболее распространенной в исследуемых почвах. Максимальное относительное обилие актинобактерий (35,4 %) было зарегистрировано в целинной почве. В условиях традиционной системы земледелия их доля составляла 27,9 %, демонстрируя увеличение до 30,4 % при внесении комплекса микробных препаратов. В то же время при применении прямого посева наблюдалось снижение обилия с 29,1 % до 26,3 %. Выявленное

доминирование представителей *Actinobacteria*, вероятно, обусловлено сезонностью отбора проб, что согласуется с их известной толерантностью к аридным условиям (Манучарова и др., 2011; Pajares et al., 2018). Наряду с актинобактериями, наибольшая доля в целине, по сравнению с агроценозами (выше на 1,16–1,34 %), определена в филлах *Chloroflexi*, *Gemmatimonadetes*, *Planctomycetes*. При этом значительных изменений при применении биоагентов микробных препаратов в их представленности не выявлено, что возможно является следствием способности этих организмов существенно снижать популяцию под действием типа землепользования. Другим объяснением этого факта, возможно, является их чувствительность к резким перепадам влажности, поскольку известно, что эти бактерии реагируют снижением на такие условия (Favaz, 2013, Ivanova et al., 2018; Constancias et al., 2015).

Важной экологической характеристикой ацидобактерий является их способность выступать в качестве индикатора почвенных условий, поскольку их численность и таксономическая структура сильно зависят от концентрации элементов минерального питания и показателя pH (Kielak et al., 2016). Бактероидеты процветают в почвах благодаря своей способности секретировать разнообразные наборы углеводов-активных ферментов тогда, когда их субстратные гликаны присутствуют в изобилии в окружающей среде, что дает им явное преимущество перед другими видами в конкретной экологической нише (Larsbrink, McKee, 2019). В изучаемых условиях одинаково представлены бактерии из фил *Acidobacteria* и *Bacteroidetes*. В целинной почве их относительное обилие было на уровне 5,4 и 6,2 % соответственно, что на 1,0–4,0 % меньше, чем в используемых сельскохозяйственных почвах с обеими системами земледелия. По-разному эти бактерии отреагировали на применение КМ при выращивании культур. Так в прямом посеве отмечено увеличение их доли на 0,70–1,14 % при бактеризации. Обратную направленность развития ацидобактерии и бактериоидеты имели в традиционной системе, их представленность снизилась на 1,1–2,0 % при обработке комплексом микоорганизмов полезного действия.

Среди доминирующих фил *Proteobacteria* (одна из наиболее разнообразных) и *Verrucomicrobia* (имела наименьший процент среди описанных в таблице 4.1) вели одиноковую стратегию существования. Доля их в целине составила 23,1 и 1,39 % соответственно. При этом осталась на таком же уровне при ТС и, значительно, на 2,2–3,3 % выше при ПП.

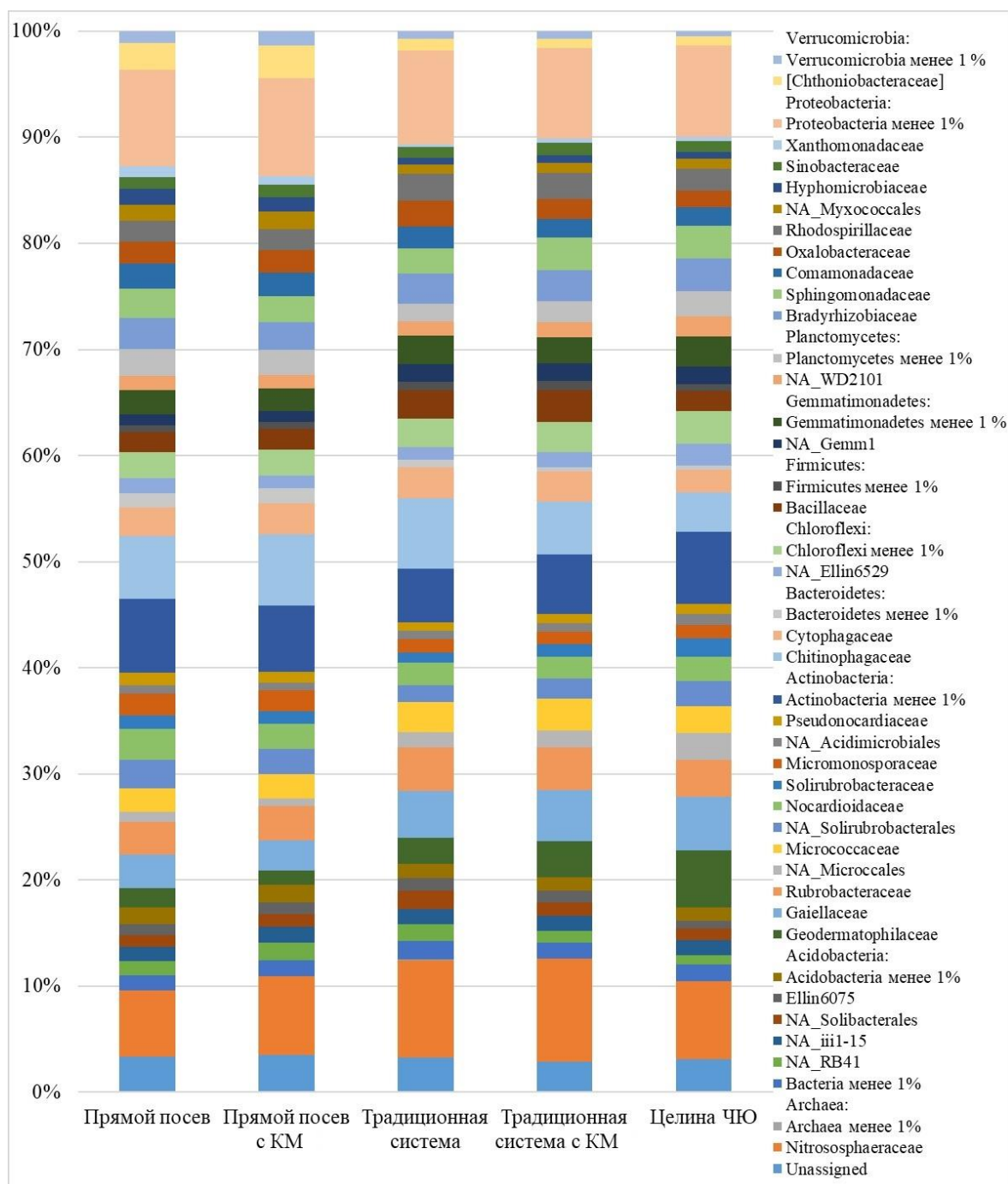
Археи, в частности представители филы *Crenarchaeota*, являются распространёнными компонентами почвенных микробоценозов, демонстрируя повышенное обилие в почвах с низкими значениями соотношения C:N (Bates et al., 2010). В ходе исследования установлено, что относительное обилие кренархеот в целинной почве достигло 7,35 %. Аналогичный показатель зафиксирован в ПП при использовании КМ – 7,47 %, тогда как без применения комплекса он снизился на 1,27 %. В условиях ТС доля данной филы увеличилась на 1,85 % по сравнению с целиной, а применение КМ в данной системе отмечен максимальный рост обилия — до 9,72 %.

«Разреженной бактериальной биосферой» (англ. rare bacterial biosphere), сокращенно – РББ, называется разнообразие прокариот, которые специфически представлены популяциями малого размера (Скопина и др., 2016; Pedrós-Alió, 2012). К объектам РББ чернозема южного в 2018 году относились 30 фил с общим обилием от 1,54 до 1,80 % в исследуемых образцах. Анализ таксономической структуры прокариотного сообщества чернозема южного выявил статистически значимые сдвиги в относительной численности ключевых фил под влиянием различных систем землепользования. Установлено, что доля представителей филы *Euryarchaeota* в условиях традиционной агроэкосистемы с применением комплекса микроорганизмов на растениях сорго превышала соответствующий показатель для ТС без КМ в 1,9 раза, а для целинной почвы — в 3,2 раза. В почве под ПП эуриархеи не выявлены. Репрезентативность других фил также варьировала: бактериальная фила AD3 была детектирована исключительно в варианте с обработкой сорго КМ на фоне прямым посевом, демонстрируя минимальную относительную численность (0,002 %), в то время как фила *Fusobacteria* обнаруживалась только в целинном образце. Зафиксирована

выраженная динамика для фило *Chlamydiae*, доля которой в целинной почве составляла 0,007 %, тогда как при традиционной агросистеме она возросла в 2,1 раза, а в условиях почвозащитной системы — в 10,8 раза.

В ходе эксперимента выявлено 455 семейств в прокариотном биоме чернозема южного. Среди них в качестве маркеров возделывания почвы выделяются *Micrococcaceae*, *Geodermatophilaceae* и *Rhodospirillaceae*, обилие которых, согласно литературным источникам, увеличивается в пахотных почвах (Основные достижения, 2017). Результаты настоящего исследования согласуются с этими данными, демонстрируя увеличение доли данных таксонов при традиционной системе земледелия по сравнению с прямым посевом (рис. 4.2). Интродукция биоагентов в составе микробных препаратов оказала дифференцированное влияние на анализируемые таксоны. Так, применение препаратов способствовало увеличению относительного обилия *Geodermatophilaceae* и *Rhodospirillaceae* исключительно в условиях ТС, тогда как доля *Micrococcaceae* возросла при обеих агроэкосистемах. Сравнение с целинным биоценозом показало, что в ненарушенной почве доля *Geodermatophilaceae* была в 2,2–3,0 раза выше, чем в агроценозах. В свою очередь, обилие *Rhodospirillaceae* и *Micrococcaceae* в целине было сопоставимо с их уровнем при прямом посеве и увеличивалось в условиях традиционной системы (рис. 4.2; Приложение В). К группе индикаторных бактерий относится и *Sphingomonadaceae*, максимальная доля (3,0 %) отмечена при ТС только под влиянием полезных микроорганизмов, как и в целине, и превышает показатель при прямом посеве (2,2 %).

Большинство представителей семейств *Gaiellaceae* и *Gemm 1*, из фил *Actinobacteria* и *Gemmatimonadetes* соответственно, широко распространены в почве, но эти данные получены только на основе метагеномного анализа библиотек гена 16S рРНК, а в чистую культуру выделено только по одному штамму этих таксонов (Hanada, Sekiguchi, 2014; Albuquerque, daCosta, 2014).



NA – некультивируемые семейства; ЧЮ – чернозем южный.

Рисунок 4.2 – Таксономическая структура на уровне семейств прокариотного биома чернозёма южного под влиянием комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем по данным анализа метабенома 16S рРНК (чернозем южный, 2018 г.).

В черноземе южном относительная численность данных некультивируемых бактериальных семейств при технологии прямого посева была в 1,4–1,6 раза ниже, чем в целинной почве и в условиях традиционной агроэкосистемы. Полученные данные согласуются с результатами М. Favaz (2013) о влиянии традиционной обработки почвы на численность данных микроорганизмов, но противоречат сведениям, приведенным Е.В. Першиной с соавторами (Основные достижения, 2017). Применение комплекса микроорганизмов на растениях в системе прямого посева привело к дополнительному снижению доли представителей семейства *Gaiellaceae* на 0,32 %.

Согласно литературным данным, представители семейства *Huphomicrobiaceae* относятся к чувствительным индикаторам агрогенного воздействия, поскольку их доля в пахотных почвах снижается по сравнению с залежными аналогами (Основные достижения, 2017). В проведенном исследовании на черноземе южном данная закономерность подтвердилась: относительная численность *Huphomicrobiaceae* при ТС земледелия и на целине была в 2,1–2,2 раза ниже, чем в агроценозе ПП, где их представленность достигала 1,4%. Анализ консервативных (коровых) компонентов микробиома черноземных почв выявил таксоны с различной реакцией на агроэкосистемы. К устойчивым группам, доля которых не претерпевала значимых изменений, относятся семейства *Sinobacteraceae* и *Bradyrhizobiaceae*. В противоположность этому, обилие представителей семейств *Comamonadaceae* и *Nocardiodaceae* достоверно увеличивалось в условиях системы прямого посева.

Повышенной чувствительностью к внесению минеральных удобрений характеризуются представители семейств *Nitrososphaeraceae*, *Chitinophagaceae* и *Bacillaceae*, что отмечено в Основных достижениях... (2017). В черноземе южном максимальное содержание доступных форм азота и фосфора, а также наибольшая представленность указанных таксонов были зарегистрированы в условиях ТС. В противоположность этому, семейство *Rubrobacteraceae* идентифицировано как индикатор экстремальных условий. В стационарном опыте его относительная численность в южном черноземе достигала максимума (4,1%) при традиционной

системе, тогда как при прямом посеве и на целине этот показатель был достоверно ниже – 3,1% и 3,5% соответственно. Бактерии семейства *Chthoniobacteraceae*, рассматриваемые как индикаторы благоприятных условий и богатой питательными веществами среды, демонстрировали иную динамику. Их максимальная доля (2,5%) отмечена в агроценозе прямого посева. В вариантах с традиционной системой (как с обработкой, так и без) и на целине обилие данного семейства ниже в 2,2–2,9 раза.

Всего в ходе исследования на уровне рода было идентифицировано 823 операционные таксономические единицы (ОТЕ). Количество детектированных ОТЕ в агроэкосистемах варьировало в пределах 487–502 и достоверно не отличалось от целинного контроля (таблица 4.2). В засушливых условиях 2018 года в почве под прямым посевом было зафиксировано более высокое альфа-разнообразие, характеризующееся увеличением 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. 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.

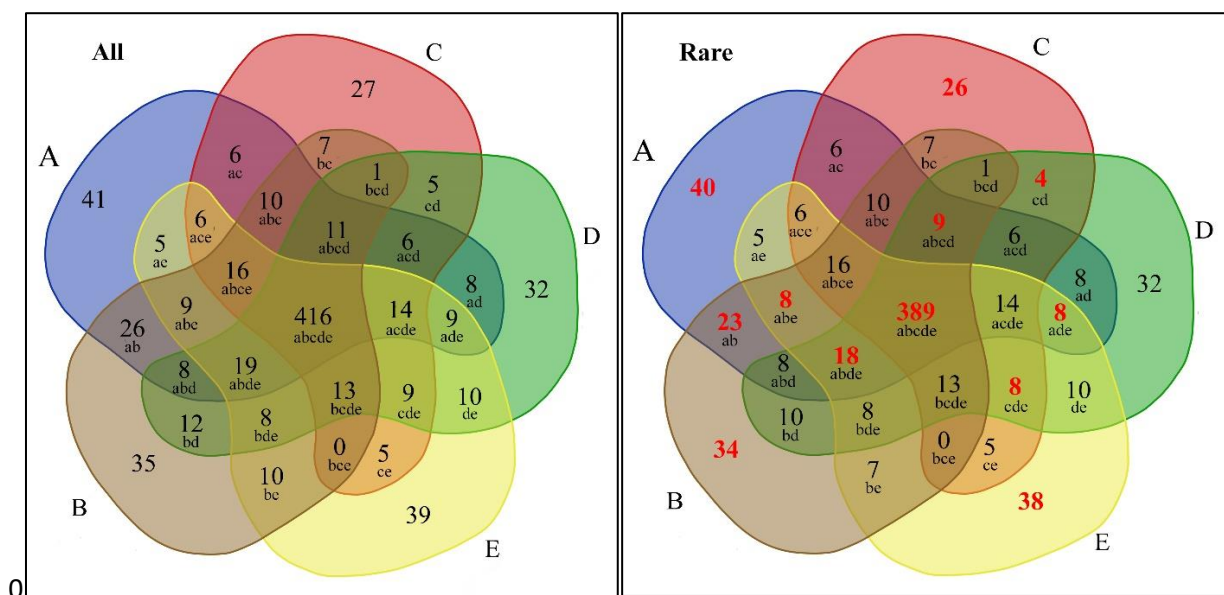
Таблица 4.2 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на индексы разнообразия прокариот в черноземе южном (2018 г.)

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

Понимание того, как процессы взаимодействия видов структурируют обильные и разреженные бактериальные биосферы в почвах, имеет решающее значение для прогнозирования того, как биоразнообразие влияет на функционирование экосистемы (Lynch, Neufeld, 2015). Одним из способов графического представления данных о разнообразии в экосистеме является диаграмма Венна, способная показать уникальные и общие (коровые) таксоны для изучаемых участков (Shade, Handelsman, 2012). Данные по представленности ОТЕ на уровне рода условно были разделены на обильное или мажорное подсообщество с представленностью более 1 % и разреженное (минорное) подсообщество менее 1 % (Кимеклис и др., 2020), либо согласно Du с соавторами (2020) (Du et al., 2020) ограничить обильно представленными микроорганизмами значением выше 0,5 %, а разреженных – ниже 0,1 %.

При рассмотрении полученных результатов секвенирования по первой градации (граница в 1%), общая диаграмма показала, что значительная часть микробиома (416 ОТЕ из 823) принадлежит коровым таксонам всех изучаемых участков, тогда как суммарно 21,1 % (174 ОТЕ) являлись уникальными или 3,3–5,0 % по каждому отдельному изучаемому варианту (рисунок 4.3, All). Обильную и разреженную биосферу представляют 34 и 789 ОТЕ соответственно. В более отличающихся сообществах соленых почв (Du et al., 2020) или загрязненных нефтепродуктами (Jiao et al., 2017) представленных в литературе это соотношение менее существенно. В РББ 50,2 % (389) таксонов общие для всех вариантов и 21,5 % (170) – сумма уникальных (рисунок 4.3, Rare). В ходе анализа отмечено, что области диаграммы, которые принадлежат прямому посеву с обработкой КМ и без нее, более других вариантов являлись представителями таксонов входящих в сообщество обильных и изменили свою численность.

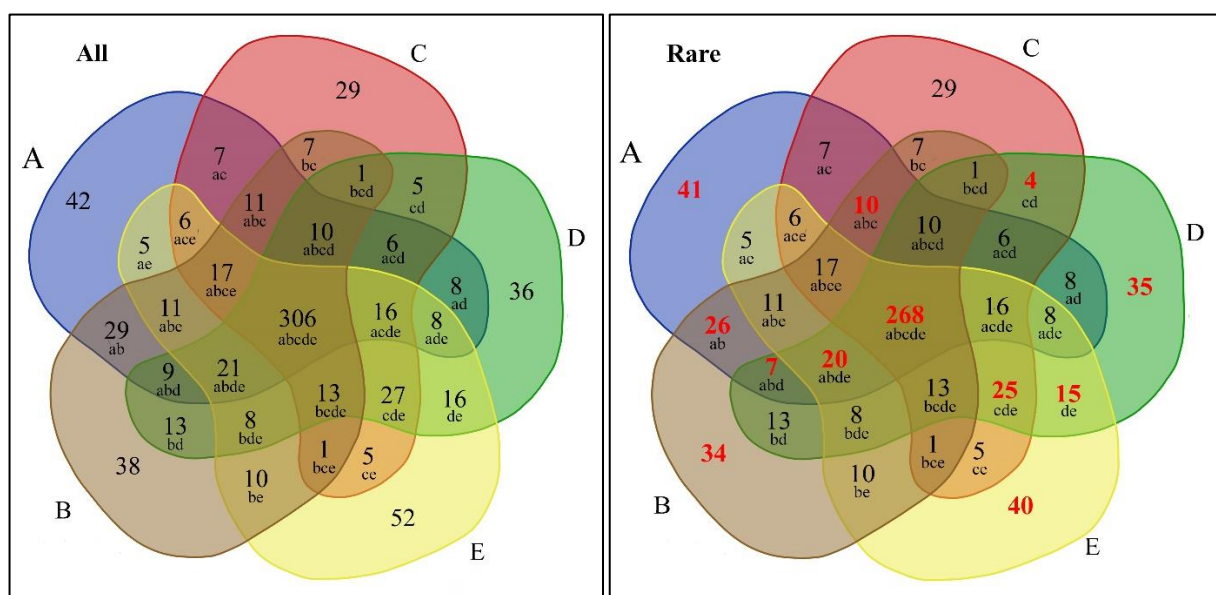


Примечания: А – прямой посев, В – прямой посев с комплексом микроорганизмов (КМ), С – традиционная система, D – традиционная система с КМ, Е – целина; красным отмечена численность ОТЕ, которая изменилась от общей численности к разреженной.

Рисунок 4.3 – Структура прокариотного сообщества по уникальным и коровым таксонам в черноземе южном в агроэкосистемах и целине при условной границе обильных и разреженных подсообществ 1%. All – общая численность ОТЕ, Rare – численность ОТЕ разреженной части микробиомов (2018 г.)

Оценка микробиомов по второй градации (с границами обильных выше 0,5 % и разреженных ниже 0,1 %) 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. Коровым таксонам соответствовали 39,6 % ОТЕ, а уникальным 25,5 % (рисунок 4.4). 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. Например, *Steroidobacter* (область на рисунке 4.4 Rare: de), NA_232 из семейства *Cytophagaceae* (область на рисунке 4.4

Rare: abde) и других, доля которых в традиционном посеве 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 4.4 Rare: abde и abd) и другие, присутствующие в данной почве в целине и прямом посеве. Система разграничения $0,5 < x < 0,1$ репрезентативней, потому как различает большее количество микроорганизмов из обильной части подсообщества 65 ОТЕ в сравнении с 34 при пороге в 1 %.



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 4.4 – 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.)

Согласно полученным данным с помощью высокопроизводительного секвенирования большей суммарной долей по сравнению с родами с известной таксономией обладали неатрибутированные рода со значениями от 59,5 до 64,9 % (490 ОТЕ) для каждого из вариантов, что в перспективе требует более детального их изучения (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на обилие родов прокариотного биома чернозема южного (%)

Рода	Прямой посев		Традиционная система		Целина
	без КМ	с КМ	без КМ	с КМ	
Таксономия известна	37,5	39,1	40,5	40,0	35,1
Неатрибутированные	62,5	60,9	59,5	60,0	64,9

Согласно анализу главных компонент, выявлено 8 доминирующих родов с известной таксономией: *Candidatus Nitrososphaera*, *Rubrobacter*, *Flavisolibacter*, *Segetibacter*, *Bacillus*, *Balneimonas*, *Skermanella* (приложение Б2). Микроорганизмы из родов *Erwinia* и *Xanthomonas* с 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*. Наиболее высокая доля представителей этого рода отмечена в целинной почве (0,55 %), тогда как системы земледелия способствовали её снижению: ПП в 1,6 раза и ТС в 1,3 раза.

Таким образом, проведенный метагеномный анализ таксономического состава почвенного микробиома с использованием высокопроизводительного секвенирования показал, что применение биоагентов микробных препаратов снижает негативное влияние системы земледелия no-till на микробоценоз чернозема южного и позволяет повысить ее экологическую целесообразность применения в условиях степи Крыма. В ходе исследования выявлены статистически значимые изменения таксономической структуры микробного

сообщества чернозема южного при применении комплекса микроорганизмов в условиях традиционной и прямого посева систем земледелия. Установлено увеличение относительной численности доминирующих фил *Acidobacteria*, *Bacteroidetes*, *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia* в агроэкосистемах при одновременном снижении *Actinobacteria*, *Chloroflexi*, *Gemmatimonadetes* и *Planctomycetes* по сравнению с целинной почвой.

4.1.2 Оценка численности эколого-трофических групп ризосферы сорго зернового

В экологических функциях почв микроорганизмы выполняют разностороннюю и весьма существенную роль (Добровольская и др., 2015). Антропогенная нагрузка, обусловленная применением агротехнологий, вызывает трансформацию ключевых экологических параметров почвенной экосистемы, включая её биологические, физические и химические свойства, и влечет за собой нарушение естественной динамики микробиологической минерализации органического вещества и циклов доступного азота (Почвозащитное, 2015; Campos, 2010).

Установлено, что применение КМ и агротехнологий является значимым фактором трансформации микробного сообщества ризосферы сорго, что проявляется в перераспределении численности микроорганизмов основных эколого-трофических групп и указывает на изменение функциональной стабильности агроэкосистемы. Микроорганизмы-аммонификаторы, используя органические формы азота, участвуют в деструкции растительных остатков и отмерших корней растений (Менькина, 2019). Результаты дисперсионного анализа показали, что применение предпосевной инокуляции в 2018 г. в традиционной системе положительно влияло на рост аммонификаторов, увеличение их количества составило 26 % (таблица 4.4). Численность аммонификаторов в 2019 г. в традиционной системе с обработкой комплексом микроорганизмов возросла на 31,4% в сравнении с контролем. В условиях 2020

г. способность этих бактерий адаптироваться к изменяющимся погодноклиматическим условиям выражена в их увеличении на 142,6 % под влиянием предпосевной инокуляции при прямом посеве. Известно, что показатель обилия аммонификаторов, деятельность которых направлена на обогащение растений азотом, связан с интенсивностью процессов минерализации органического вещества почвы (Wolińska et al., 2016).

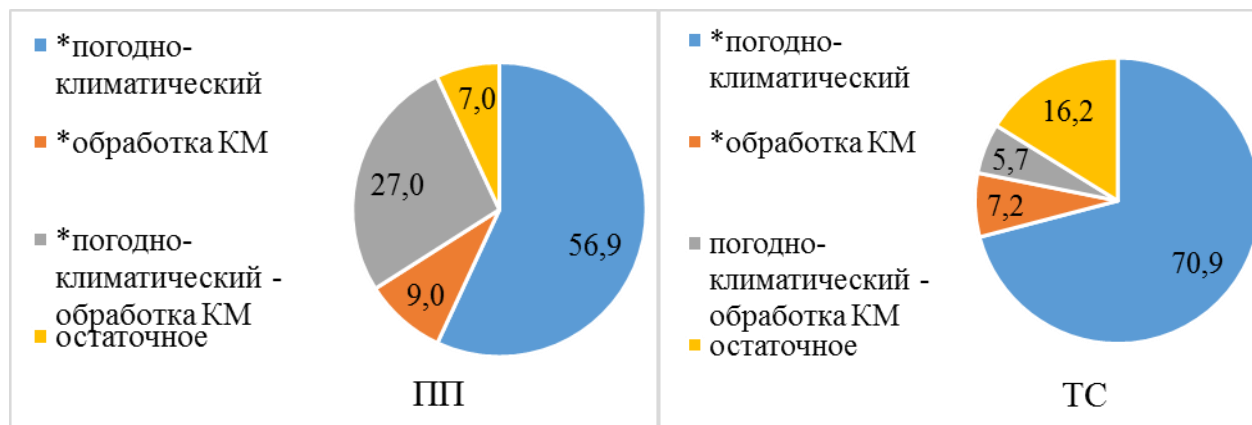
Таблица 4.4 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность аммонификаторов в ризосфере сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Аммонификаторы, млн КОЕ / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	5,2±0,5	14,4±0,6	6,8±0,4
ПП с КМ	5,5±0,6	12,9±0,7	16,5±1,7
Традиционная система (ТС)	6,5±0,1	10,2±1,0	7,5±0,8
ТС с КМ	6,9±0,3	13,4±1,0	8,1±0,7

В засушливых условиях процесс трансформации органического вещества в биодоступные формы азота определяются температурным режимом и дефицитом влаги, выступающими ключевыми регуляторами метаболической активности почвенной микробиоты. (Wang et al., 2013; Yan et al., 2008). В условиях 2018 и 2020 года, была установлена тенденция к увеличению численности аммонифицирующих микроорганизмов в ризосфере сорго зернового на фоне инокуляции семян комплексом микроорганизмов.

Двухфакторный дисперсионный анализ (приложение С1) показал, что условия года являлись доминирующим фактором, составляющего 56,9–70,9 % влияния на развитие группы аммонификаторов в ризосфере агроэкосистем (рисунок 4.5). В прямом посеве статистически значимое влияние на количество этой группы микроорганизмов оказывало взаимодействие условий года и применения КМ: вклад фактора в 4,7 раза превысил данный показатель

традиционной системы. Также подтверждено существенное влияние обработки КМ на развитие численности аммонификаторов в изучаемых агроэкосистемах.



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

Рисунок 4.5 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности аммонификаторов 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)

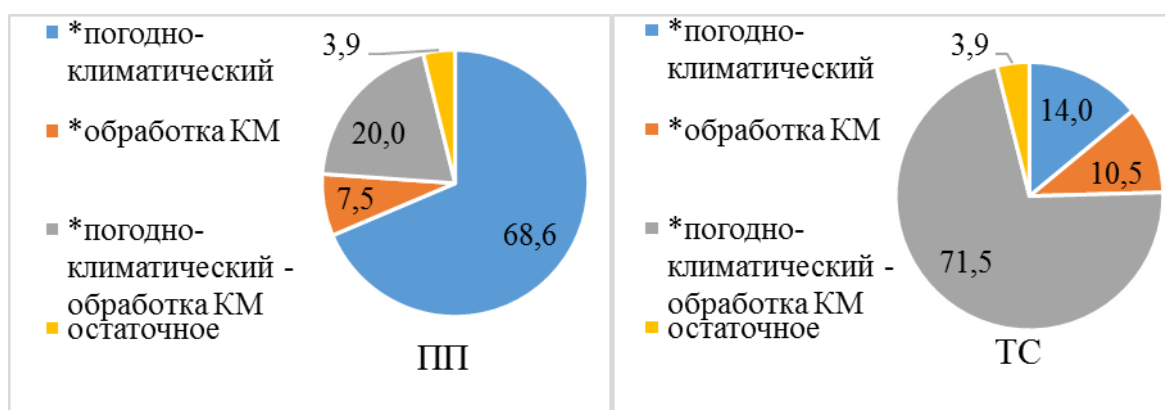
Разложение как сложных углеродсодержащих веществ, так и простых, выполняют микроорганизмы амилаolitikи. Для построения клеток амилаolitikи используют азот из почвы в виде минеральных соединений. Численность микроорганизмов этой группы в ризосфере *S. bicolor* возрастает под влиянием биоагентов микробных препаратов в прямом посеве в засушливые 2018 и 2020 годы в 1,3 и 1,9 раза (таблица 4.5). В условиях, в которых количество осадков превышало среднее многолетние показатели (2019 г.), выявлено воздействие систем земледелия. Установлено снижение КОЕ амилаolitikов в 1,2 раза в ПП относительно традиционной системы. Влияние КМ в условиях традиционной агроэкосистемы носило разнонаправленный характер: стимуляция роста в 5,9 раза (2018 г.) и снижением показателя в 1,7 раза (2019 г.).

Таблица 4.5 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность амилолитиков ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Амилолитики, млн КОЕ / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	3,7±0,5	12,1±0,4	9,5±0,5
ПП с КМ	4,7±0,6	10,4±0,1	18,2±1,4
Традиционная система (ТС)	3,0±0,3	14,0±1,2	12,0±0,6
ТС с КМ	17,8±0,9	13,8±0,4	7,1±0,2

Возможно, это связано с тем, что при традиционной технологии в результате вспашки, изменяются физические свойства почвы, а, следовательно, перестраивается функциональная роль микроорганизмов, которые в зависимости от расположения в почвенном слое участвуют в различных биохимических превращениях (Титова, Козлова, 2012).

Установлено комплексное влияние рассматриваемых факторов на группу амилолитиков в ризосфере зернового сорго (рисунок 4.6; приложение С2). Однако следует отметить не одинаковость эффекта взаимовлияния факторов, в прямом посеве их вклад составил 20%, а в традиционной системе их доля возросла в 3,4 раза. Погодно-климатический фактор также характеризовался не однозначным действием. Большей чувствительностью к этому воздействию обладали микроорганизмы ризосферы сорго зернового прямого посева, доля влияния условий года на численность амилолитиков в нем превысила в 4,9 раза, в сравнении с традиционной технологией.



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

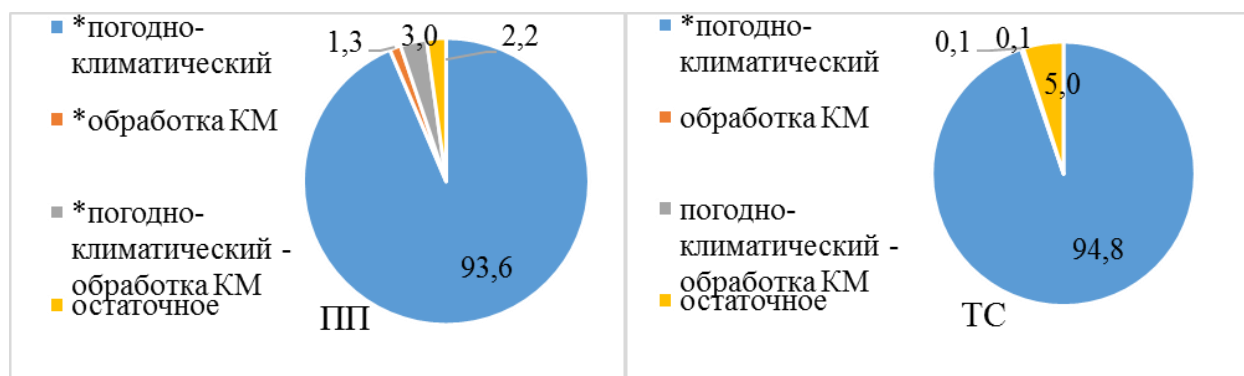
Рисунок 4.6 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности амилолитиков в ризосфере при выращивании сорго зернового в агроэкосистеме прямого посева (ПП) и традиционной системы (ТС) совместно с комплексом микроорганизмов (КМ) (чернозем южный, 2018-2020 года)

Олиготрофные микроорганизмы участвуют в деструкции органического вещества почвы промежуточной степени разложенности и подготавливают ее к процессу гумификации (Титова, Козлова, 2012). Олиготрофы способны усваивать целлюлозу и лигнин, разлагая и трансформируя в гумусоподобные вещества (Тихонович, Круглов, 2006). В результате учета численности микроорганизмов установлено увеличение их в период проведения исследований 2018-2020 гг. (таблица 4.6). В условиях 2019 г. статистически значимо повышалось количество КОЕ олиготрофов в 1,4 раза в прямом посеве в сравнении с традиционной агротехнологией, что может быть связано с увеличением растительных остатков на поверхности почвы (Кутовая и др. 2019). Увеличение численности олиготрофов с каждым годом исследований в обеих системах земледелия возможно связано с их устойчивостью к почвенно-климатическим условиям (Буянтуева и др., 2017). Тем самым, повышение численности олиготрофных микроорганизмов из года в год увеличивает их вклад в образование компонентов для гумификации.

Таблица 4.6– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность олиготрофов ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Олиготрофы, млн КОЕ / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	0,18±0,01	7,3±0,2	10,0±0,2
ПП с КМ	0,20±0,01	7,1±0,7	13,6±1,0
Традиционная система (ТС)	0,15±0,03	5,3±0,3	12,5±0,2
ТС с КМ	0,19±0,03	6,2±0,2	12,7±2,0

Весомый вклад в развитие олиготрофных микроорганизмов в ризосфере оказали погодные условия за период исследований в обеих агроэкосистемах с долей влияния 93,6-94,8 % (рисунок 4.7; приложение С3).



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

Рисунок 4.7 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности олиготрофов 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)

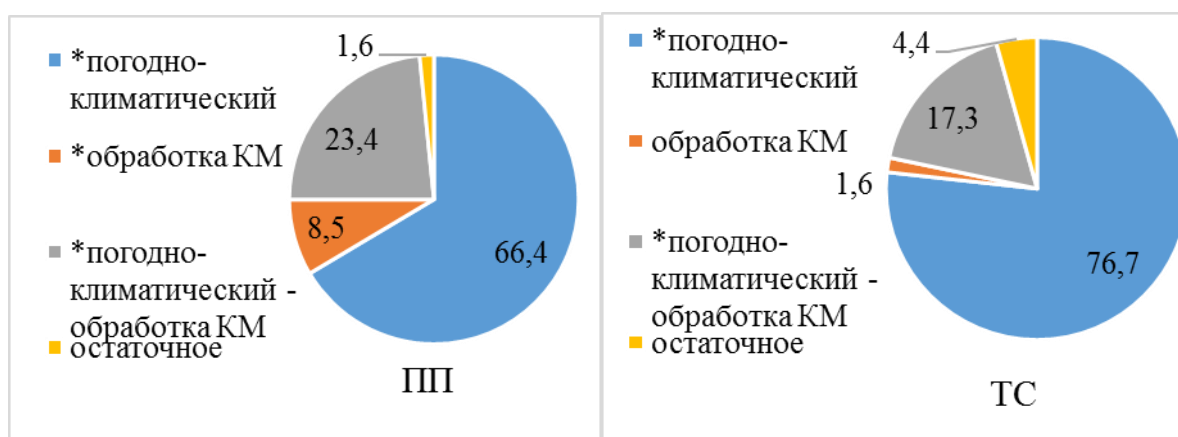
Известно, что при увеличении численности аммонификаторов, педотрофов и актиномицетов идет обогащение почвы подвижным органическим веществом,

усиление процессов гумусообразования (Тонха и др., 2014; Славкина, 2019). В нашем эксперименте микробиологический анализ показал снижение численности педотрофов в 1,6 (2018 и 2020 гг.) и в 1,2 раза (2019 г.) в прямом посеве в сравнении с традиционным посевом (таблица 4.7). В тоже время в период максимальных жарких и засушливых условий применение микроорганизмов комплексного действия способствовали увеличению их количества в 1,7 раза при традиционной системе в 2018 г. и в 2,5 раза в прямом посеве в 2020 г. Численность этих микроорганизмов к третьему году исследований возросла, что может свидетельствовать о накоплении в почве соединений азота и снижение минерализации соединений гумуса почвы (Славкина, 2019).

Таблица 4.7 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность педотрофов ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Педотрофы, млн КОЕ / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	3,5±0,4	14,6±0,4	13,1±1,0
ПП с КМ	3,0±0,1	13,1±1,5	32,1±1,0
Традиционная система (ТС)	5,5±0,1	18,0±1,0	20,6±1,0
ТС с КМ	9,6±0,7	16,7±0,2	13,9±1,0

На численность педотрофов в ризосфере сорго зернового повлияли погодно-климатические условия окружающей среды и взаимодействие двух факторов вне зависимости от способа возделывания почвы (рисунок 4.8; приложение С4). Педотрофы ризосферы были в большей степени подвержены влиянию обработки КМ при прямом посеве по сравнению с традиционной системой в 5,3 раза.



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

Рисунок 4.8 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности педотрофов 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)

Одним из жизненно важных элементов необходимых для всех живых существ является доступная форма азотсодержащих соединений. Лишь микроорганизмы-азотфиксаторы способны обеспечить растения «биологическим азотом» (в виде аминокислот, аминосахаров, белков и пр.). По содержанию его можно судить о накоплении гумуса и состоянии плодородия почвы (Добровольская, 2015). В таблице 4.8 приведены результаты изменения количества аэробных азотфиксаторов ризосферы сорго зернового. Статистическим анализом значимо показано, что в 2018 году количество азотфиксаторов выше в 1,5 раза варианте с прямым посевом а, в 2020 году в 2,0 раза в традиционной системе. Применение микробных биоагентов интенсифицировало развитие ассоциативных азотфиксаторов в 2,7 раза (2018 г.) при традиционной системе и в 4,0 раза (2020 г.) в ресурсосберегающей технологии в засушливых условиях года. Таким образом, увеличение численности азотфиксаторов служит биологическим индикатором интенсификации процессов азотного цикла и естественного повышения плодородия агроэкосистем (Кутовая, 2019).

Таблица 4.8 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность азотфиксаторов ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Азотфиксаторы, млн КОЕ / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	2,3±0,2	9,0±0,4	1,0±0,3
ПП с КМ	2,6±0,3	9,8±0,2	4,0±0,2
Традиционная система (ТС)	1,5±0,2	9,5±0,3	2,0±0,4
ТС с КМ	4,0±0,6	10,0±0,8	2,4±0,4

Эффективное функционирование азотфиксаторов в ризосфере сорго (Chen et al., 2021), при доминирующим влиянием (>90%) метеорологических факторов подтверждает их высокую адаптивность к условиям года (рисунок 4.9; приложение С5). В тоже время доля влияния КМ и его взаимовлияния с окружающей средой на численность азотфиксаторов составила 7,3 % в прямом посеве.



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

Рисунок 4.9 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности азотфиксаторов 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)

В обеспечении питательными веществами биоценоза почвы важную роль играют грибы. Грибы могут трансформировать различные группы органических соединений в природе: моно- и дисахара, полисахариды, органические кислоты, спирты, парафины, циклические соединения, полимеры (Мирчик, 1988). Характер ингибирующего или стимулирующего влияния на живые организмы зависит от выделения ими в окружающую среду антибиотиков, токсинов, стимуляторов роста (Добровольская, 2015). В литературе имеются сведения, что применение комплекса мероприятий по окультуриванию земель, в частности распашка, снижает разнообразие микромицетов, тем самым отрицательно сказывается на некоторых свойствах почв (Мирчик, 1988; Железова, 2019). Наши исследования показали такую же зависимость (таблица 4.9). Численность микромицетов в вариантах опыта с традиционной системой земледелия ниже в 1,2-1,7 раза за годы исследований в сравнении с прямым посевом. В тоже время применение предпосевной инокуляции семян в прямом посеве стимулирует рост количество этих микроорганизмов в острозасушливый 2018 год в 1,4 раза.

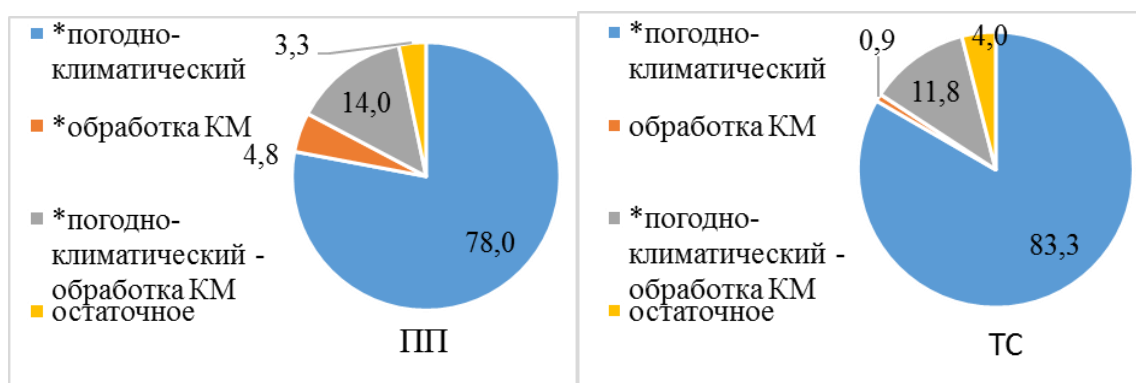
Таблица 4.9 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность микромицетов ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Микромицеты, тыс. КОЕ /г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	93,0±3,6	184,1±4,4	168,0±1,4
ПП с КМ	125,7±9,4	160,3±4,4	210,6±2,5
Традиционная система (ТС)	61,7±9,0	159,7±9,7	99,2±2,4
ТС с КМ	88,1±3,4	153,7±3,0	55,6±2,2

Возможно, увеличение численности микромицетов в прямом посеве связано с накоплением растительных остатков, которые остаются из года в год, а представители этих групп обладают способностью ускорять их разложение (Колесникова и др., 2018; Безлер и др., 2019). Применение же КМ в прямом

посеве влияло на представленность этого класса микроорганизмов в ризосфере сорго зернового, что скорее всего способствовало нивелированию неблагоприятных условий года.

Максимальное влияние на жизнедеятельность микромицетов в ризосфере сорго зернового в агроэкосистемах оказал погодно-климатический фактор (рисунок 4.10; приложение С6). В отличие от традиционной технологии в прямом посеве на численность этих микроорганизмов повлияли все рассматриваемые факторы. В процессе разложения целлюлозы происходит повышение активности азотфиксирующих бактерий, сожительствующих в ассоциации с грибами (Мирчик, 1988). Выявлена закономерность увеличения численности целлюлозолитических микроорганизмов в прямом посеве с каждым годом исследования (таблица 4.10). Количество их в ризосфере 2018 года при применении биоагентов микробных препаратов снизилось в 1,3-1,7 раза. Установлено, что в условиях 2020 года численность целлюлозолитических микроорганизмов в ПП возросла в 2,2 раза в сравнении с традиционной технологией. Применение КМ способствовало повышению их в 1,6 раза при ТС.



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

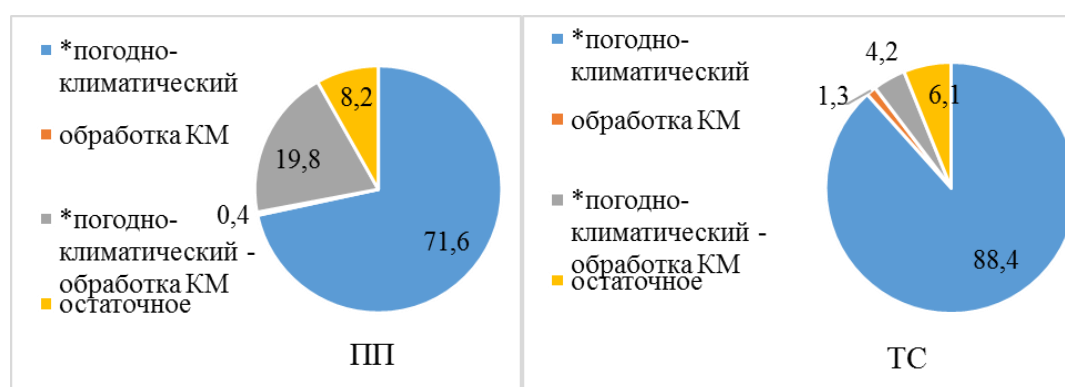
Рисунок 4.10 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности микромицетов в ризосфере при выращивании сорго зернового в агроэкосистеме прямого посева (ПП) и традиционной системы (ТС) совместно с комплексом микроорганизмов (КМ) (чернозем южный, 2018-2020 года)

Таблица 4.10 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на численность целлюлозолитиков ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Целлюлозолитики, тыс. КОЕ /г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	14,8±1,4	26,2±1,4	34,6±1,5
ПП с КМ	8,7±1,1	38,1±3,6	24,6±2,8
Традиционная система (ТС)	12,2±0,3	36,2±3,4	16,0±1,1
ТС с КМ	9,5±0,1	37,9±2,1	24,8±2,6

Максимум аэробных целлюлолитиков выявлен в условиях повышенного выпадения осадков (2019 г.) в активную фазу развития растений сорго зернового. Выявлено стимулирующее действие переувлажнения почвенного покрова в результате повышенных осадков в период активного роста (приложение А4) растений на активность целлюлозолитических грибов.

Доля влияния погодно-климатических условий на развитие целлюлозолитиков в ризосфере сорго в агроэкосистемах отличалась, вклад их в сравнение с остальными факторами был выше (рисунок 4.11; приложение С7).



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

Рисунок 4.11 – Доля влияния факторов (%) на показатель численности целлюлозолитиков 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)

Для понимания взаимоотношения отдельных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе разложения и синтеза органического вещества почвы, провели расчет эколого-физиологических коэффициентов, показанных на рисунке 4.12 (Титова, Козлова, 2012). Коэффициент минерализации (Кмин) показывает активность в преобразовании углеводов почвы в минеральные соединения и связывании свободного азота (Титова, Козлов 2012).

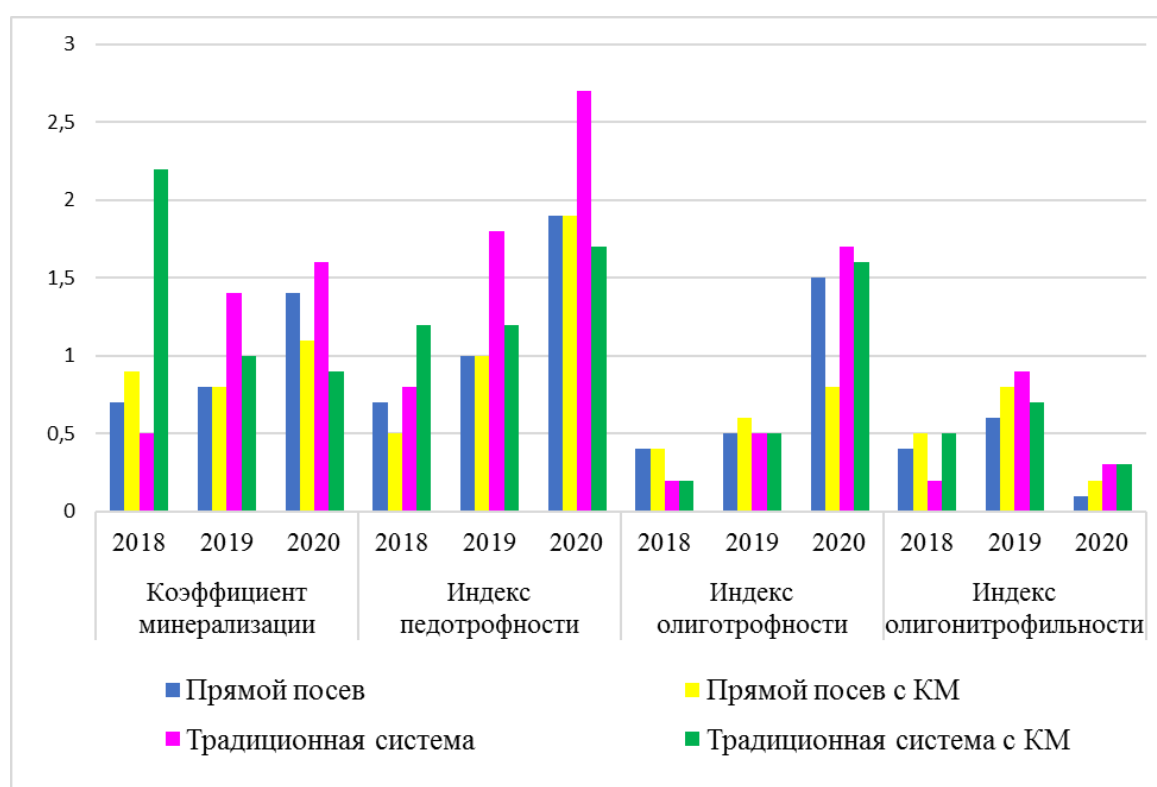


Рисунок 4.12– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на интенсивность минерализационных процессов в ризосфере сорго зернового (чернозем южный, 2018-2020 года)

При значении Кмин больше единицы минерализационные процессы протекают интенсивнее, что повышает уровень обеспеченности почвы

аммиачным азотом. Этот процесс может осуществляться за счет увеличения численности аммонификаторов либо за счет работы олиготрофного или автохтонного микробоценоза. В условиях 2018 года Кмин при традиционном посеве с применением КМ повысился в 2,4-4,4 раза в сравнении с остальными вариантами (см. рисунок 4.12). Следует отметить, что с очередным годом исследования Кмин в ризосфере сорго зерновое закономерно возрастает при технологии прямого посева и традиционной системы. В прямом посеве, возможно, это связано с увеличением численности олиготрофного и автохтонного микробоценозов. В 2019-2020 годах отмечено повышение активности минерализационных процессов, что свидетельствует об усилении трансформации органических веществ почвы, необходимых для жизнеобеспечения растений в их активную фазу развития.

Изобилие автохтонной части микроорганизмов, участвующих в новообразовании гумусовых соединений показывает индекс педотрофности. С повышением значения данного индекса повышается устойчивость системы к негативным антропогенным факторам. Он показывает насколько микробоценоз исследуемой почвы приближен к естественным ценозам, характерным для этой почвенно-климатической зоны. Так, прослеживается закономерность повышения индекса педотрофности в ризосфере сорго зернового с годами исследований (см. рисунок 4.12).

Активность олиготрофных групп микроорганизмов показывает индекс олиготрофности. В период исследований 2018-2020 годов отмечено возрастание этого индекса (см рисунок 4.12). В условиях 2020 года в ризосфере сорго зернового бактериализация способствовала его снижению в 2,0 раза в варианте прямого посева в сравнении с контролем. Высокие значения индекса олиготрофности свидетельствуют о замедленной деструкции органического вещества и стремлении к экологически устойчивому равновесному состоянию. Данный процесс, возможно, показывает снижение доступных органических веществ растениям во время активной фазы их развития.

Степень иммобилизации азота в почве характеризует индекс олигонитрофильности (Евсеев, 2005; Пуртова и др., 2012; Кузикова и др., 2019 г.). Наибольшая чувствительность олигонитрофилов выявлена в условиях повышенного дефицита влаги 2018 и 2020 годов. Индекс олигонитрофильности в это время имел значения ниже в 4,5–6,0 при прямом посеве и в 3,0–4,5 при традиционной агротехнологии, чем в 2019 г. (см. рисунок 4.12). Результаты исследований показали, что в засушливых годах численность групп микроорганизмов, использующих органический азот выше минерального, что свидетельствует о замедлении процессов несимбиотической азотфиксации. В тоже время предпосевная инокуляция семян сорго способствовала повышению численности бактерий, усваивающих минеральные формы азота, что показано по увеличению индекса олиготрофности в прямом посеве за период исследований.

Структура основных эколого-трофических групп микроорганизмов ризосферы *S. bicolor*. проанализирована методом теплокарты (heat map) в модификации Никитина Д.А. и др. (2020). с соавторами (2020). Проведенный анализ выявил закономерности в распределении исследуемых таксономических групп в зависимости от условий выращивания. (рисунок 4.13 (А, Б, В)). Микробиологический анализ ризосферы сорго зернового в условиях влагостресса (2018, 2020 гг.) показал высокую устойчивость целлюлозолитиков, которые доминировали в системе прямого посева. Низкая же активность амилолитиков и педотрофов свидетельствует о ограниченном пуле доступных азотсодержащих субстратов в данной агроэкосистеме. В варианте прямого посева с обработкой семян КМ в ризосфере наиболее многочисленной группой в активной фазе являлись микромицеты и незначительно ниже олиготрофы в неблагоприятных погодноклиматических условиях. За трехлетний период эксперимента в агроэкосистеме прямого посева отмечен прогрессирующий рост численности целлюлозолитиков, педотрофов и амилолитиков в ризосфере, изначально представленных незначительным количеством. В засушливые годы в традиционной системе установлена средняя численность педотрофов,

микроорганизмы других групп проявили количественную изменчивость в ризосфере.

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

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)



-2 0 2

Рисунок 4.13 – 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)

Количество олиготрофов и азотфиксаторов в традиционной системе с биоагентами микробных препаратов в ризосфере практически не изменилась, а активность групп аммонификаторов, амилаolitikов, педотрофов в 2020 г. уменьшилась по сравнению с 2018 г. В целом согласно методу теплокарты стратегия развития азотфиксаторов значительно не изменялись в соотношении с другими микроорганизмами год от года, применяемых технологий и предпосевной обработки микробными препаратами.

Установление симбиотических отношений сорго с микроорганизмами из биопрепаратов возможно способствовало к 2020 году исследований в стационаре устойчивому повышению нормализованного количества всех эколого-трофических групп микроорганизмов при прямом посеве. Это отличает ПП от ТС, при которой численные изменения всех групп микроорганизмов имеют разнонаправленный характер не зависимо от года исследований и применения микроорганизмов.

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 агротехнологии способствует нестабильности функционирования микробиоценоза и может привести к нарушению экологического состояния почвы. Результаты исследований численности эколого-трофических групп показали, что применение прямого посева совместно с использованием биотехнологических приемов позволит увеличить поступление свежих органических остатков, сохранить структуру чернозема южного и высокое биологическое разнообразие, свойственное природным биоценозам степной зоны Крыма. Анализ эколого-микробиологической активности ризосферы сорго зернового показал увеличение численности амилаolitikов, олиготрофов, азотфиксаторов, микромицетов до 1,4 раз в прямом посеве до 5,9 раз в традиционной системе в сравнении с вариантом его без обработки в 2018 г. В засушливом 2020 году применение предпосевной инокуляции КМ способствовало повышению численности аммонификаторов,

амилолитиков, 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. Также по степени толерантности к погодноклиматическим 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.

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

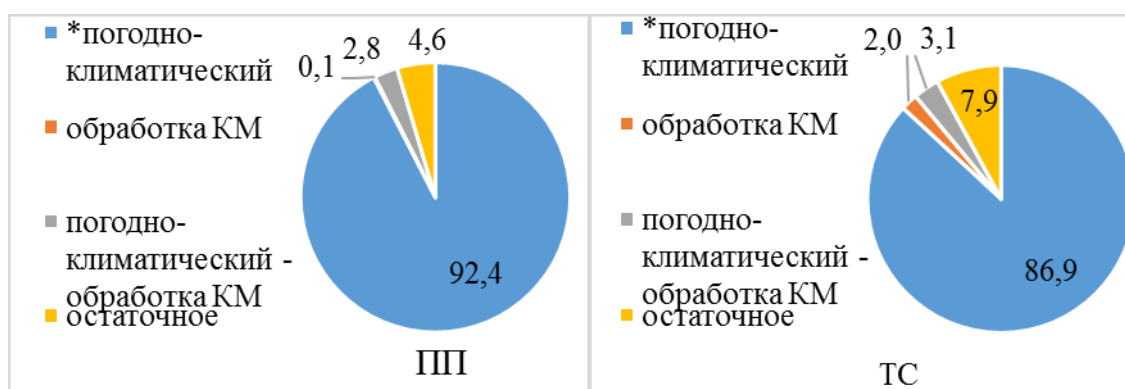
Почвенные ферменты катализируют ключевые процессы трансформации веществ, интегрируя потоки энергии и вещества в экосистеме, что делает их информативными биомаркерами жизнедеятельности почвенного сообщества. Ферментативная активность почв показывает интенсивность и направленность биохимических процессов, что позволяет оценить уровень потенциальной биологической активности (Улигова и др., 2015; Гедгафова и др., 2019). Регулирование их активности в почве, осуществляет органическое вещество, в том числе его специфическая часть – гумус (Щур др., 2016; Вяль, Шиленков, 2008; Абрамян, 1992). Активность каталаз, разлагающих токсичную для клеток перекись водорода, является чувствительным показателем антропогенной нагрузки. В традиционной системе в 2018 году отметили тенденцию, а в 2019 году значимое снижение активности каталаз на 20 % по сравнению с прямым посевом (таблица 4.11). В условиях 2019 года установлено увеличение активности каталаз на 9,1 % при прямом посеве и на 8,0 % в традиционной системе с применением

КМ. Экспериментально установлено, что в условиях 2019 года, характеризовавшихся повышенной влажностью, 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).

Таблица 4.11– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной) на активность каталаз ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Активность каталаз, мл O ₂ за минуту / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	22,7±0,2	36,1±2,0	23,9±0,1
ПП с КМ	20,1±1,6	39,7±0,4	24,5±1,0
Традиционная система (ТС)	19,2±1,4	30,0±0,4	24,7±0,5
ТС с КМ	20,0±0,8	27,6±1,0	22,8±0,3

Согласно результатам двухфакторного дисперсионного анализа, каталазная активность ризосферы сорго в прямом посеве на 92,4 % зависела от погодно-климатических условий года, в традиционном посеве – на 5,6% ниже. (рисунок. 4.16; приложение. С8)



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

Рисунок 4.16 – Доля влияния факторов (%) на активность каталаз 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)

Пероксидаза катализирует окисление почвенной органики, запуская процесс гумификации через конденсацию промежуточных продуктов с аминокислотами и пептидами с образованием гуминовых кислот. (Хазиев, 2015). Активность пероксидаз ризосферы сорго зернового представлена в таблице 4.12.

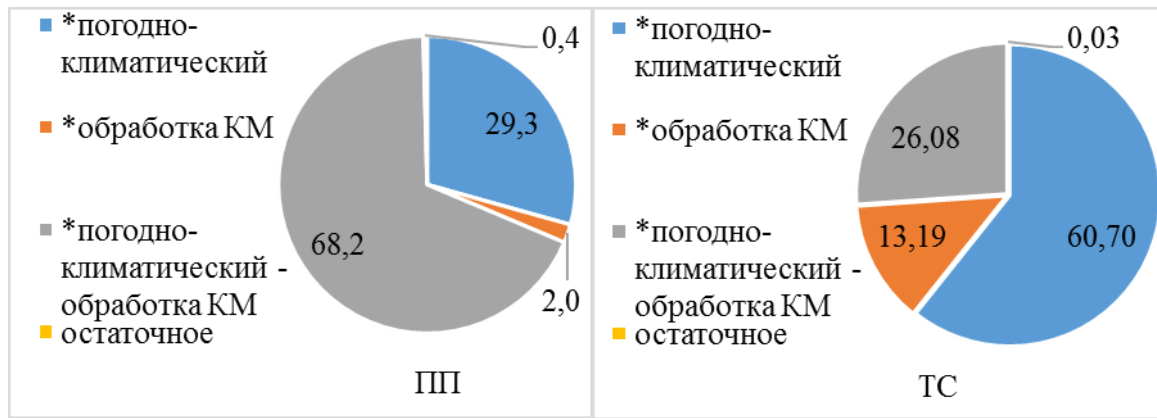
Таблица 4.12 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной) на активность пероксидаз ризосферы сорго зернового ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Активность пероксидаз, мкмоль $C_7H_8O_2$ /100 г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	2,80±0,03	2,99±0,04	2,40±0,04
ПП с КМ	2,32±0,03	1,99±0,04	4,60±0,04
Традиционная система (ТС)	3,04±0,00	2,17±0,06	9,27±0,04
ТС с КМ	3,30±0,02	1,87±0,01	3,89±0,02

В условиях 2019 г. исследования ризосферы сорго показали, что применение КМ способствовало уменьшению активности фермента на 33,4 % в прямом посеве и на 13,8% в традиционной системе. В засушливый период 2020 г. применение (КМ) в качестве предпосевной обработки оказало неоднозначное влияние на активность пероксидаз: стимулирующий эффект в агроэкосистеме прямого посева (+91,7%) контрастировал с ингибирующим влиянием в традиционной системе (-58,0%). Возможно, это связано с проявлением устойчивости к засухе и быстрой регенерации при незначительных осадках у растений, имеющих C4-фотосинтез (Alvarez et al., 2019), к которым относится *S. bicolor*.

Осадки, выпавшие в критическую фазу развития (в июне), оптимизировали условия для микробного сообщества ризосферы, что положительно отразилось на биохимической активности почвенной биоты. Поскольку известно, что после восстановления благоприятных условий среды у избирательных микроорганизмов (стрессоустойчивых к засухе) происходит регидратация клеток (Manzanera, 2020). В ответ на аномальные погодные условия 2020 г. активность пероксидаз при ПП снижалась в 3,9 раза в сравнении с ТС, где наблюдалось максимальное значение в сравнении с 2018 и 2019 годами исследований. Повышение активности пероксидаз может быть связано с большим запасом почвенной влаги в условиях ресурсосберегающей системы по сравнению с пахотой (Дрепа, Голубь, 2014). Проведены исследования, в которых показано, что почвенная пероксидаза участвует в процессе разложения органического вещества и преобразует углеводы и белки, которые могут быть инкапсулированы в гумусе, а, следовательно, недоступны для почвенных гидролаз и микроорганизмов (Tian, Shi, 2014).

В условиях степи в ризосфере сорго доля вклада фактора «обработка КМ» в активность пероксидаз составила в ПП 2 %, тогда как в ТС – в 7 раз выше (рисунок 4.17; приложение С9).



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

Рисунок 4.17 – Доля влияния факторов (%) на активность пероксидаз 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)

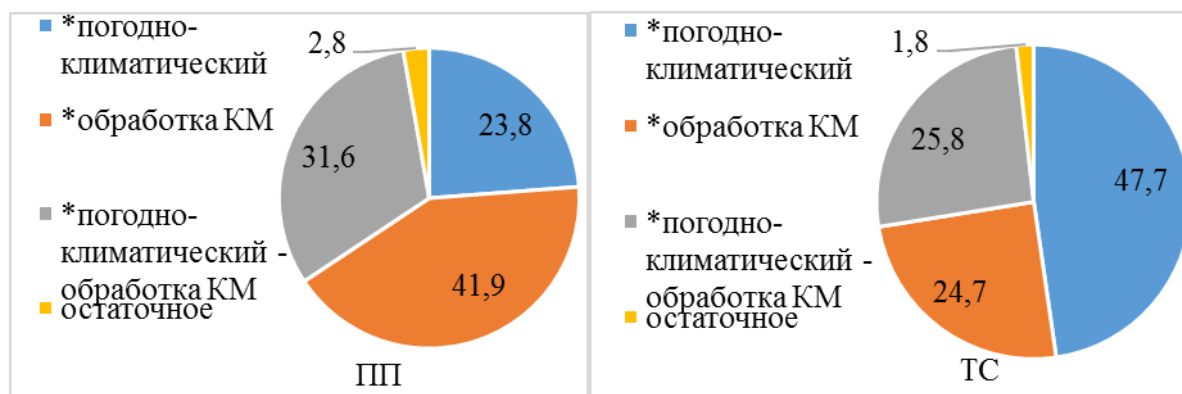
Установлено, что погодно-климатический фактор на работу ферментов при ТС оказывал максимальное влияние.

Важную роль в образовании гумусовых веществ, устойчивых к разложению, выполняют полифенолоксидазы (ПФО). Фермент полифенолоксидаза преимущественно микробного происхождения и катализирует окисление моно-, ди-, трифенолов до хинонов в присутствии кислорода воздуха или перекиси водорода (Лапа и др., 2016; Хазиев, 2005; Грицаенко и др., 2003). Так, активность полифенолоксидаз в прямом посеве ниже в 5,7 раз в 2019 году и в 2,0 раза – в 2020 в сравнении с ТС (таблица 4.13). Установлено, что предпосевная инокуляция семян при прямом посеве значительно увеличила активность этого фермента в 4,7 раза в 2019 году, в 2,4 раза – в 2020. Реакция ферментов полифенолоксидаз ризосферы сорго зернового на применение КМ в традиционном посеве носила противоположный характер. Выявлено угнетение активности данного фермента в 3,3 раза в 2019 году и в 2,0 раза – в 2020.

Таблица 4.13 – 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

Дисперсионный анализ выявил значимое влияние погодных условий, предпосевной инокуляции бактериями и их взаимодействия на активность полифенолоксидаз в ризосфере сорго (рисунок 4.18; приложение С10).



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

Рисунок 4.18 – Доля влияния факторов (%) на активность полифенолоксидаз 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)

При традиционной системе земледелия максимальное влияние на работу в ризосфере сорго зернового оказали погоднo-климатические условия года, вклад фактора составил 47,7 %, что в 2 раза выше в сравнении с ПП. Доля влияния фактора предпосевной бактериализации семян в ПП выше в 1,7 раза в сравнении с ТС.

По данным ферментативной активности оксидоредуктаз – пероксидаз и полифенолоксидаз – проведены математические расчеты коэффициентов гумификации, показывающих направленность трансформации органического вещества. Условный коэффициент гумификации служит индикатором направленности трансформации органического вещества: его значения ниже единицы характеризуют преобладание минерализационных процессов, а выше единицы – интенсивность гумификации (рисунок 4.19). За период проведения исследований 2018-2020 гг. условный коэффициент гумификации показал преобладание минерализационных процессов, исключение составили варианты прямого посева с КМ и ТС в более благоприятных условиях 2019 года.

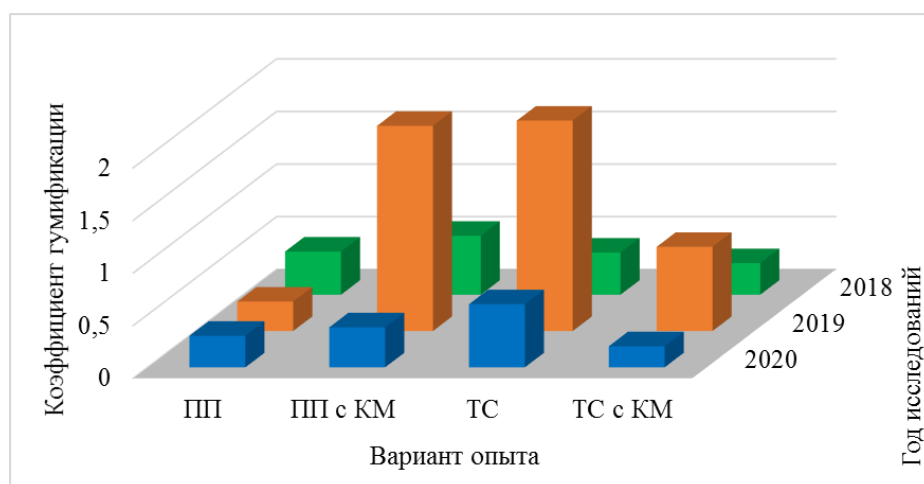


Рисунок 4.19– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) при выращивании сорго зернового в агроэкосистеме прямого посева (ПП) и традиционной системы (ТС) на коэффициент гумификации (чернозем южный, 2018-2020 года)

Мониторинг почвенного дыхания (2018-2020 гг.), отражающего активность микробоценозов и потери органического вещества при их трансформации (Пуртова и др., 2013), выявил, что в агроэкосистеме прямого посева применение полифункционального комплекса микроорганизмов (КМ) выступало ключевым фактором, снижающим эмиссию CO₂ из ризосферы сорго (таблица 4.14).

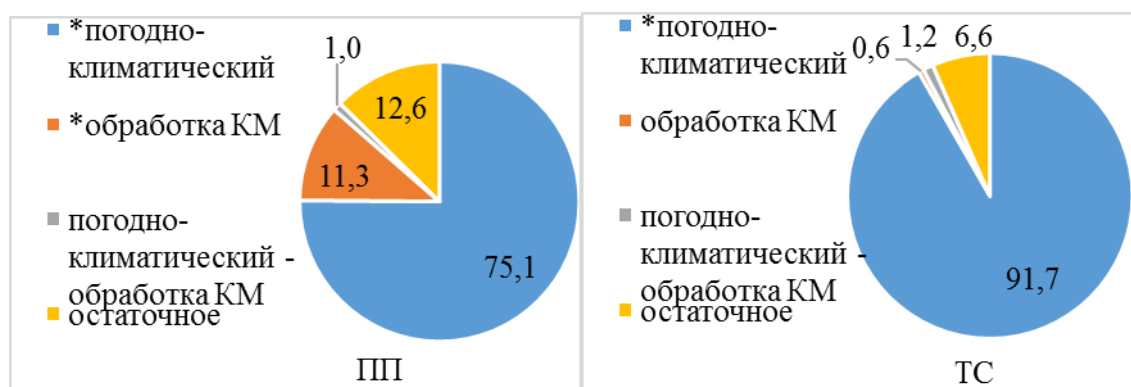
Таблица 4.14– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной) на эмиссию углекислого газа в ризосфере сорго ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018-2020 года)

Вариант опыта	Эмиссия углекислого газа, мг / г почвы		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	160,77±8,4	112,76±5,6	137,42±7,56
ПП с КМ	146,2±0,0	89,36±7,4	125,53±4,26
Традиционная система (ТС)	171,7±0,08	103,4±2,11	186,7±12,87
ТС с КМ	170,9±0,41	118,0±2,16	186,7±7,43

Так использование КМ способствовало снижению выделения углекислого газа в почве на 9,1 % в 2018 году, на 20,8 % в 2019 и 8,7 % в 2020 году. В тоже время, предпосевная инокуляция семян сорго зернового при традиционной агротехнологии одностороннего воздействия не показала. В условиях 2019 года установили увеличение на 14,1 %, а в 2018 и 2020 годах показатели дыхания почвы дали одинаковые результаты. Максимум выделения углекислого газа обычно происходит с изменением величины пористости пахотного слоя и в период интенсивного обмена веществ у растений (Туев, 1989).

Установлено, что максимальное влияние на процессы эмиссии CO₂ в ризосфере сорго обеспечивается погодными условиями. При прямом посеве доля фактора составила 75,1%, тогда как при традиционной системе – на 16,6 % выше. Дисперсионный анализ выявил экологическое преимущество агроэкосистемы

прямого посева: вклад биоагентов (11,3%) (рисунок 4.20; приложение С11) в формирование активности полифенолоксидаз проявился только в этом варианте.



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

Рисунок 4.20 – Доля влияния факторов (%) на 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)

В агроэкосистеме традиционной системы ферментативная активность в большей степени (на 16,6%) зависела от погодных условий года, что демонстрирует её меньшую технологическую устойчивость.

Установлена дифференциация ведущих факторов в зависимости от ферментативной активности: для каталазы и эмиссии CO_2 доминирующим остаётся погодно-климатический фактор 75,1–92,4 %, тогда как для пероксидазы и полифенолоксидазы в системе прямого посева формируется синергический эффект, выражающийся в резком увеличении доли совместного действия погодных условий и комплекса микроорганизмов до 68,2 % и 31,6 % соответственно и собственно микробного фактора 41,9 % для полифенолоксидазы (таблица 4.15)

В прямом посеве в отличие от традиционной агроэкосистемы сопровождается снижением доли погодно-климатического фактора для пероксидазы (с 60,7 % до 29,3 %), полифенолоксидазы (с 47,7 % до 23,8 %) и

эмиссии CO₂ (с 91,7 % до 75,1 %), что свидетельствует о формировании более устойчивой биологической системы, менее чувствительной к абиотическим стрессам.

Таблица 4.15 – 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

Мониторинг интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) почвы в 2018-2020 гг. выявил устойчивое максимальное значение в агроэкосистеме ТС (рисунок 4.21). В агроэкосистеме ПП отмечена тенденция к снижению ИПБС, указывающая на замедление биологических процессов, которое компенсировалось предпосевной бактеризацией, стабилизирувавшей показатель.

На основании полученных результатов выявлено, что применение комплекса микроорганизмов в условиях прямого посева способствует:

- оптимальной работе пероксидаз, достаточного для протекания реакций минерализации в этой фазе;
- увеличению активности полифенолоксидаз в 1,1 - 4,7 раза, что не отмечено в традиционной системе;
- снижению эмиссии углекислого газа в почве на 9,1% - 20,8%, что сохраняет запасы органического вещества почвой;
- стабилизации биологической активности ризосферы растений сорго.

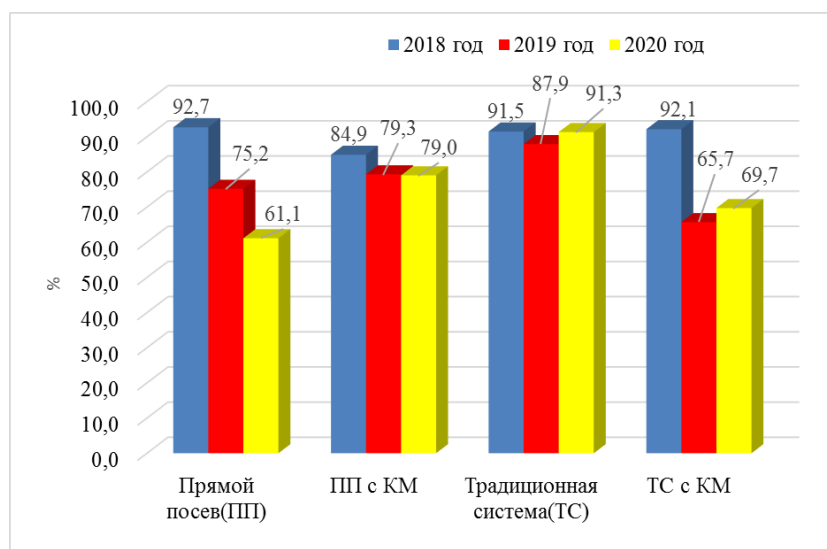


Рисунок 4.21 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) в агроэкосистемах (прямого посева и традиционной) на ИПБС ризосферы сорго в фазу выметывания (чернозем южный, 2018-2020 года)

Факторный анализ ферментативной активности ризосферы сорго зернового показал, что влиянию погодно-климатических условий степи в большей степени подвержена традиционная агроэкосистема в 1,2-2,1 раза в сравнении с прямым посевом. Взаимовлияние погодно-климатических условий с предпосевной инокуляцией семян на активность пероксидаз и полифенолоксидаз возросла в среднем в 1,9 раза в прямом посеве.

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

Следует отметить, что стационарный эксперимент по изучению традиционной и ресурсосберегающей агросистем заложен в 2015 году. Ранее на этом участке в течении длительного времени со времени основания станции (Клепинин, 1927) культуры возделывались по традиционной системе с применением всех возможных приемов обработки почвы, комплекса удобрений и полива. В целом смена антропогенного воздействия – с применения вспашки к прямому посеву – в нашем эксперименте скорее всего приведет к изменениям сукцессионного типа во всей ресурсосберегающей агроэкосистеме.

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

В условиях степи недостаток влаги отражается на биохимических функциях развития растений (Алтыбаева, Жаркова, 2020) торможением роста, снижением качества и количества урожая. Комплекс показателей физиологического статуса является важным для представления адаптационно-защитного состояния растений.

Известно, что активность оксидоредуктаз изменяется в зависимости от интенсивности и длительности стрессового воздействия, а также от фазы развития растения (Hou et al., 2021; Sheteiwy et al., 2021; Toptikov et al., 2012).

Дефицит влаги отрицательно воздействует на развитие растений, особенно, если это почвенно-воздушная засуха. Способ регуляции водного режима в растениях осуществляется благодаря процессу транспирации. Транспирация регулирует насыщение клеток водой, обеспечивает передвижение растворимых минеральных и частично органических питательных веществ от корней к другим частям растений. Вода испаряется со всех поверхностей растений, тем самым создает им защиту от перегрева при высоких температурах (Чернова, Былова, 2004; Чернышенко и др., 2017).

В условиях 2019 года наблюдали тенденцию к увеличению транспирации листьев *S. bicolor* под влиянием биопрепаратов и технологии прямого посева (таблица 4.16). Возможно, это связано с тем, что при достаточном влагообеспечении сорго, биоагенты микробных препаратов и прямой посев содействовали усиленному поступлению питательных веществ в растения. При засушливых условиях 2020 г. отмечены тенденции к снижению интенсивности транспирации под воздействием КМ. Известно, что в условиях высоких температур и недостаточных осадков, скорость понижения транспирации в растениях способствует сохранению влаги и адаптации к неустойчивым погодным явлениям (Aroca et al., 2006).

Таблица 4.16 – Транспирация листьев *S. bicolor* при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной), ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2019-2020 года)

Вариант опыта	Транспирация листьев, мг/ч/г растений	
	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	1,9±0,2	2,6±0,3
ПП с КМ	2,2±0,4	2,2±0,4
Традиционная система (ТС)	1,4±0,2	2,3±0,1
ТС с КМ	1,8±0,3	1,9±0,2

Вода составляет 70-95% от массы растительной клетки. Степень насыщенности ею показывает относительная тургесцентность, которая изменяется в противоположном направлении водному дефициту (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Величина относительной тургесцентности растений *S. bicolor* при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной), ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Вариант опыта	Относительная тургесцентность растений, %		
	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Прямой посев (ПП)	77,8±0,8	60,4±2,1	82,6±1,3
ПП с КМ	75,4±3,0	69,9±3,7	83,4±0,3
Традиционная система (ТС)	77,8±2,0	67,7±4,9	86,7±1,7
ТС с КМ	74,7±2,3	63,4±2,5	85,9±0,4

При применении комплекса микроорганизмов в 2019 году получили положительный эффект в прямом посеве зарегистрировав увеличение

относительной тургесцентности листьев сорго на 9,5 % от контроля без инокуляции.

Важным критерием нормальной жизнедеятельности растений в условиях степи является их засухоустойчивость. Степень засухоустойчивости определяли по шкале оценки параметров водного режима (табл. 4.18).

Таблица 4.18 – Величина водного дефицита *S. bicolor* при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной), ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Вариант опыта	Величина водного дефицита растений, %		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев (ПП)	22,2±0,8	28,9±1,8	17,4±1,3
ПП с КМ	24,6±3,0	21,8±2,7	16,6±0,3
Традиционная система (ТС)	22,2±2,0	22,8±3,4	13,3±1,7
ТС с КМ	25,3±2,3	26,4±1,5	14,1±0,4

При водном дефиците растений 10-20 % – средняя, при 20 % и более – низкая. По результатам определения водного дефицита установлена: низкая – 2018–2019 гг., в 2020 г – средняя степень засухоустойчивости растений во всех вариантах опыта (13,3-17,4%)

Классические пероксидазы растений — это группа гемсодержащих ферментов, интенсивность реакций которых связана с защитой от окислительного стресса в неблагоприятных условиях (Veitch, 2004; Михайлова, 2019). Экспериментальные данные 2019-2020 гг. показали статистически значимое снижение активности пероксидаз в 1,8–1,9 раза при прямом посеве по сравнению с традиционной системой (рисунок 4.22). 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). Так и в наших опытах повышение пероксидазной активности возможно

связано с биозащитой растений в ответ на стресс, вызванный почвенно-воздушной засухой.

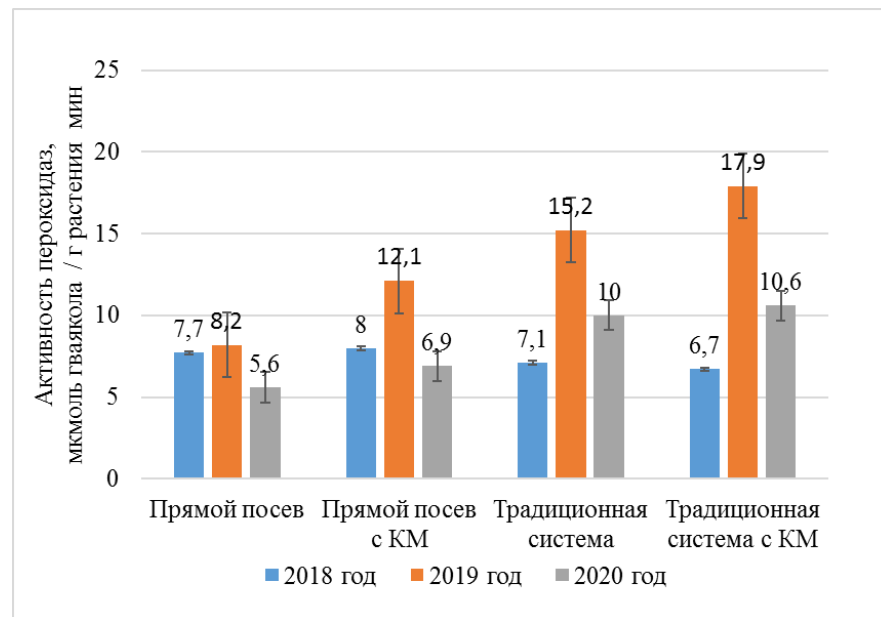


Рисунок 4.22 – Активность пероксидаз растений *S. bicolor* при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Еще одним из диагностических показателей влияния неблагоприятных условий на развитие растений может служить количество хлорофиллов. Фотосинтетические пигменты регулируют процесс последовательных катализируемых ферментами реакций (Blankenship, 2002). Избыточное их накопление может приводить к фотоокислительному повреждению клеток, вследствие нарушения поглощения и использования световой энергии в фотосинтезе. Есть эксперименты, где установлено, что уровень пигментов растений в жестких условиях окружающей среды снижался (Дымова, Головки, 2018). Так, в наших исследованиях установлено низкое содержание хлорофиллов в 2018 году (таблица 4.19), что может быть связано со значительным дефицитом влаги в начальный период развития растений (приложение А2). Нами выявлено незначительное возрастание суммы хлорофиллов (a+b) с годом исследования во всех вариантах опыта. В условиях 2020 г. в варианте традиционного посева

содержание пигментов в растениях возросло на 8,4 % по сравнению с прямым посевом.

Таблица 4.19 – Содержание хлорофиллов в листьях *S. bicolor* L. при воздействии комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем (прямого посева и традиционной), ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный, 2018–2020 года)

Вариант опыта	Содержание хлорофиллов (a+b), мг / г растения		
	2018 год	2019 год	2020 год
Прямой посев	14,80±0,09	17,55±0,00	19,33±0,25
Прямой посев с КМ	14,80±0,09	16,41±0,22	19,46±0,22
Традиционная система	15,67±0,37	18,31±0,88	21,11±0,13
Традиционная система с КМ	15,57±0,47	17,68±0,34	20,86±0,25

Известно, что повышение содержания свободного пролина, как осмолита и антиоксиданта, позволяет растению снижать негативное воздействие водного дефицита (Ибрагимова и др., 2010; Chun et al., 2018). Согласно полученным данным в 2018 г. отмечено, что возделывание культуры сорго зернового по традиционной системе способствовало аккумуляции пролина в листьях с увеличением на 160 % по сравнению с прямым посевом (рисунок 4.23). Применение комплекса микроорганизмов на *S. bicolor* содействовало повышению содержания концентрации пролина на 38,2 % (2018 г.) и снижению – на 45,7 % на фоне благоприятных погодных условий (2019 г.) в сравнении с прямым посевом без предпосевной инокуляции. В острозасушливый 2020 год 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 комплекса микроорганизмов

установлено снижение концентрации пролина в 1,3–2,0 раза в обеих сельскохозяйственных экосистемах.

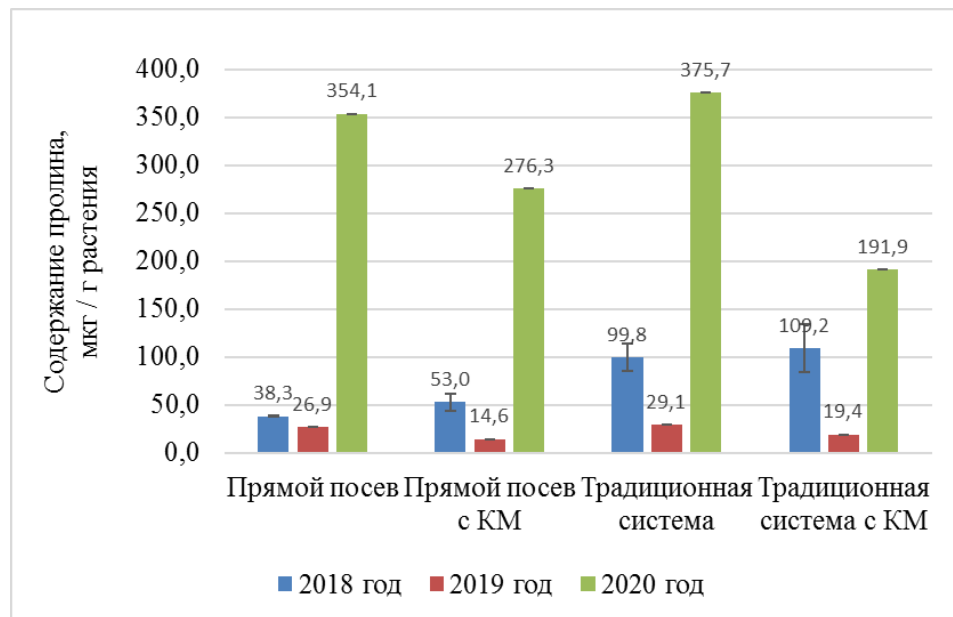


Рисунок 4.23– Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на содержание пролина в растениях *S. bicolor* ($\bar{x} \pm S\bar{x}$; чернозем южный; 2018–2020 года)

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. Предполагаем, что адаптация обусловлена снижением содержания свободного пролина в 1,3-2,0 раза в 2019-2020 гг. под действием КМ в изучаемых агроэкосистемах. В эти же годы активность пероксидазы в растениях сорго усиливается под действием агроэкосистемы с применением вспашки по сравнению с no-till, а водный дефицит снижается, что может быть взаимосвязанным ответом на условия роста культуры и усилением биозащитной реакции на стресс.

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

Полученные нами результаты по влиянию комплекса микроорганизмов в прямом посеве и традиционной агротехнологии на биомассу зерна свидетельствуют о существенных различиях как по вариантам, так и по годам проведения эксперимента. Положительное воздействие биоагентов микробных препаратов в различных системах земледелия отразилось на зерновой продуктивности сорго зернового при значительных сменах погодно-климатических условий. В условиях климатической нестабильности 2018 года с резкими колебаниями осадков (приложение А5) комбинация прямого посева и микробных препаратов (КМ) повысилась эффективность продукционного процесса сорго, что выразилось в достоверном увеличении зерновой биомассы на 0,6 т/га (40%) относительно контроля (рисунок 4.24). В тоже время разницы между изучаемыми агроэкосистемами при выращивании культуры не обнаружено. В условиях оптимального увлажнения 2019 года традиционная система обеспечила увеличение биомассы зерна на 0,51 т/га (25,4%) относительно агроэкосистемы прямого посева, тогда как применение микробного комплекса не оказало статистически значимого эффекта на продуктивность.

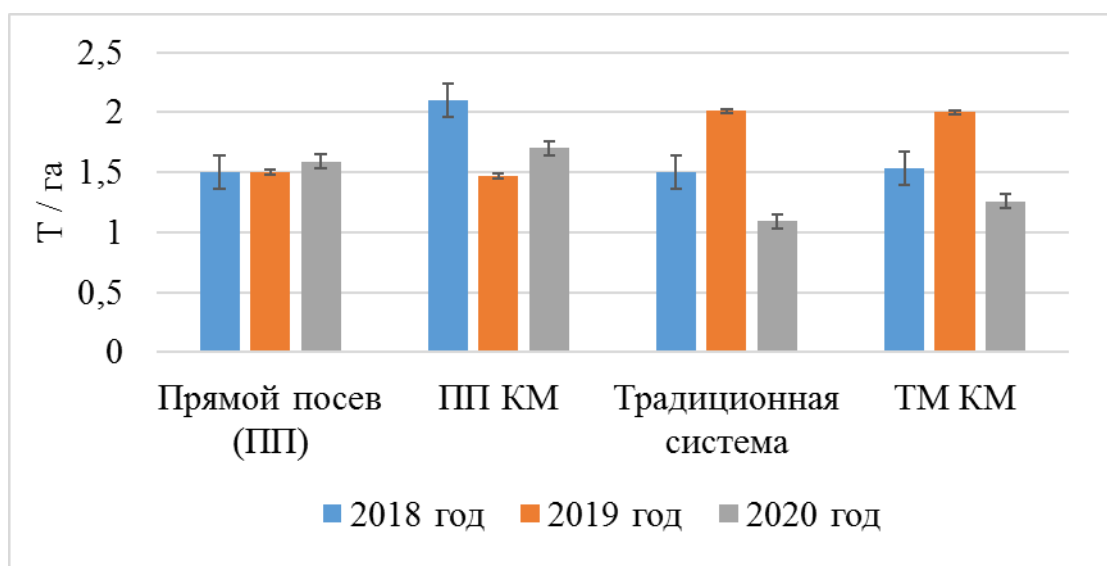


Рисунок 4.24 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на биомассу зерна *S. bicolor* (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

В засушливых условиях 2020 года проявилась высокая экологическая пластичность сорго, способного эффективно использовать ограниченные водные ресурсы (приложение А4, А7). 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 в предыдущих разделах, наиболее адаптированы к недостатку влаги растения, которые на стадии закладки полевого эксперимента были обработаны комплексом микроорганизмов, обладающими различными полезными свойствами. Применение предпосевной инокуляции в ТС увеличило биомассу зерна на 15,6% (+0,17 т/га) относительно ТС без обработки. Однако агроэкосистема прямого посева показало значительно бóльшую устойчивость к засухе: даже без обработки КМ его продуктивность превышала традиционную систему на 45,9% (+0,5 т/га), а в сочетании с микробным препаратом преимущество перед обработанной традиционной системой составило 34,9% (+0,44 т/га).

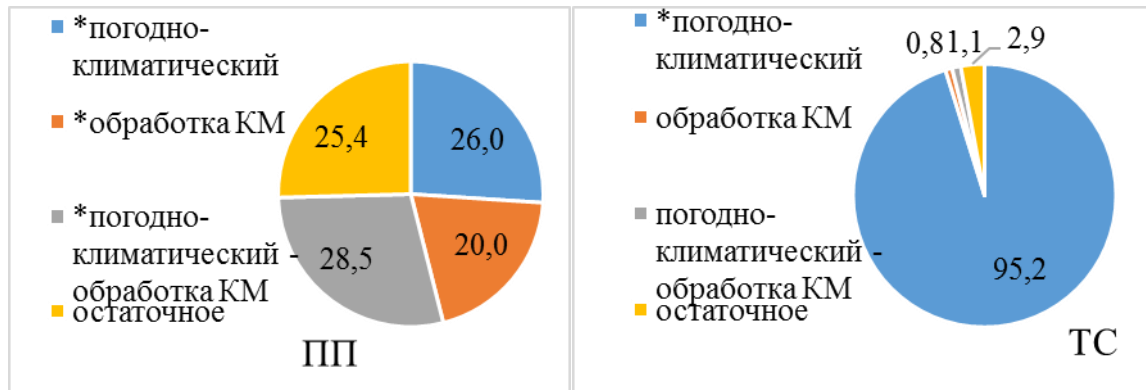
В среднем за три года исследований биомассы зерна в различных системах земледелия была одинаковой, в тоже время применение КМ способствовало ее повышению на 0,07 т/га при традиционной системе и на 0,23 т/га при технологии прямого посева (таблица 4.20).

Таблица 4.20 – Влияние комплекса микроорганизмов (КМ) и агроэкосистем на биомассу зерна *S. bicolor* (чернозем южный, среднее за 2018-2020 гг.)

Вариант опыта		Биомасса зерна, т/га	Прибавка биомассы зерна	
Фактор А	Фактор Б		т/га	%
Прямой посев	Без обработки	1,53	-	-
	КМ	1,76	0,23	15,0
Традиционная система	Без обработки	1,53	-	-
	КМ	1,6	0,07	4,6

Факторный анализ биомассы зерна сорго зернового выявил значимое влияние в прямом посеве всех изучаемых факторов, по традиционной системе –

воздействие погодных-климатических условий составило 95,2 % (рисунок 4.25; приложение С12). Тем самым показано, что агро- и биотехнологии влияют на адаптацию растений сорго к погодным-климатическим условиям.



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

Рисунок 4.25 – Доля влияния факторов (%), агроэкосистем и обработки комплексом микроорганизмов (КМ), на биомассу зерна сорго зернового (чернозем южный, 2018-2020 гг.)

Таким образом, установлено, что нестабильность погодных-климатических условий в зоне сухой степи Крыма при выращивании сорго зернового, один из основных факторов, влияющих на продуктивность растений. Нивелирование негативных экологических факторов окружающей среды возможно при использовании альтернативной традиционной системе, технологии прямого посева, с применением КМ в предпосевной обработке семян *S. bicolor*. Следовательно, в условиях недостаточного влагообеспечения выращивание сорго зернового по технологии прямого посева с применением предпосевной обработкой семян комплексом микроорганизмов полезного действия способствует сохранению природной функции почвы, биокоррекции микробной экологической ниши под данную культуру.

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

Отрицательное действие водного стресса во время вегетации заключается в подавлении ростовых процессов как наиболее сложных и требующих регулирования между отдельными физиологическими функциями (Храмченкова, 2016; Кудоярова, и др. 2013). Корреляционный анализ изученных параметров в активную фазу роста растений показал схожие связи между погодноклиматическими условиями 2018 и 2020 годов, характеризующимися повышенным температурным режимом и отсутствием осадков в определенный период вегетации сорго зернового (прил. А2, А4, А5, А7). Повышение урожайности отрицательно коррелировало с активностью пероксидаз ризосферы $r = -0,74$ и $r = -0,67$ соответственно в 2018 и 2020 годах (рисунок. 4.26 и 4.27). Особенно ярко выражено влияние засухи при традиционном посеве. Активность пероксидаз при этом составляла $9,27 \text{ мкмоль } C_7H_8O_2 / 100 \text{ г почвы}$ при минимальных его значениях $2,32$ в 2020 году (см таблицу 4.12).

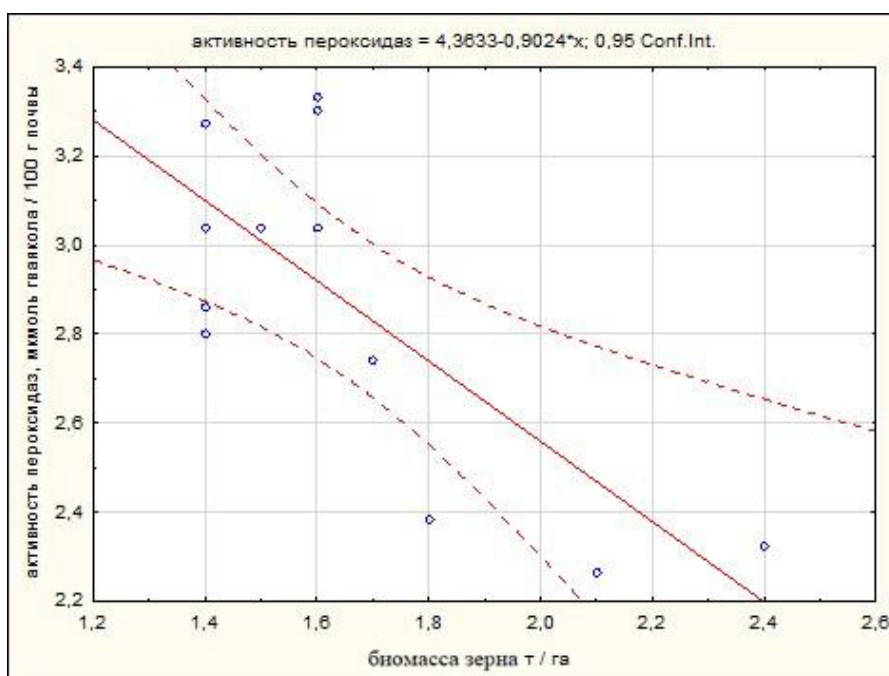


Рисунок 4.26 – Диаграмма рассеяния активности пероксидаз ризосферы и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2018 год)

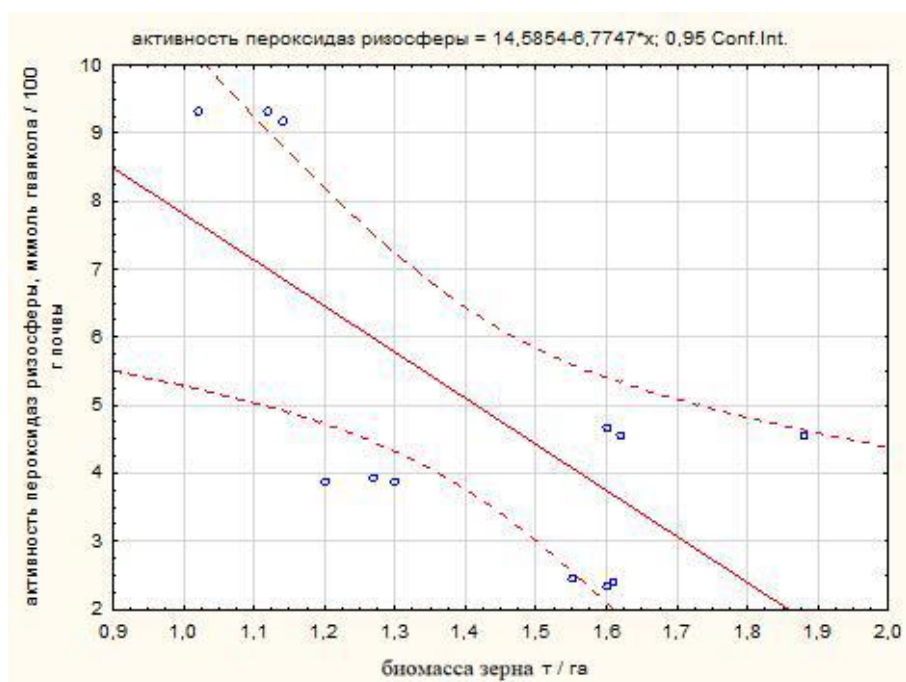


Рисунок 4.27 – Диаграмма рассеяния активности пероксидаз ризосферы и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 год)

2019 год отмечен сменами периодов переувлажнения почвы количеством осадков, превышающих среднемноголетние показатели, и периодов с умеренной засухой.

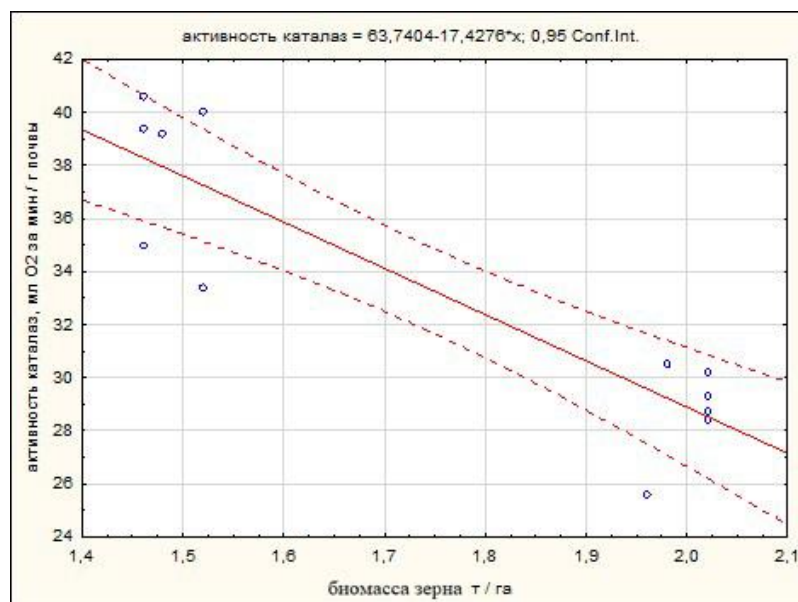


Рисунок 4.28 – Диаграмма рассеяния активности каталаз ризосферы и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2019 г.)

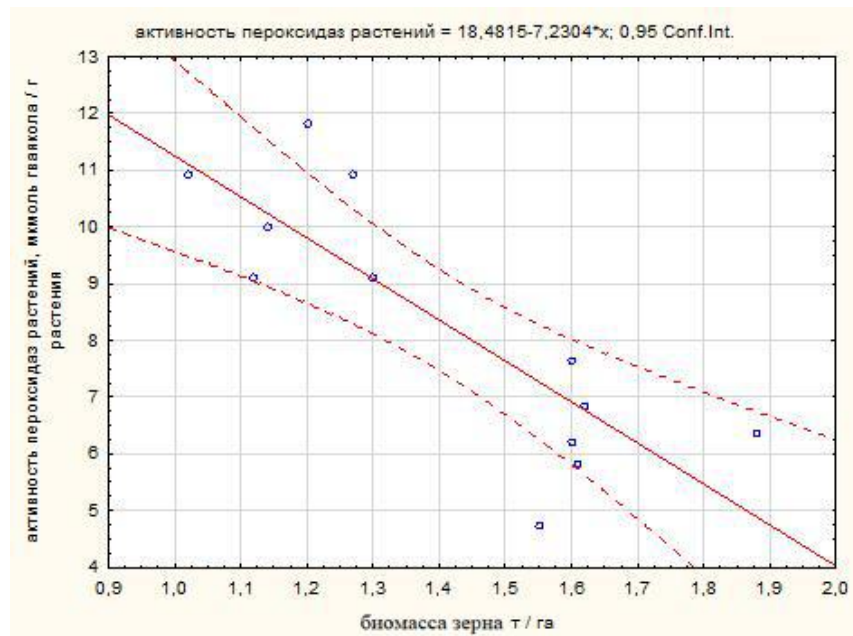


Рисунок 4.29 – Диаграмма рассеяния активности пероксидаз растений и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2019 г.)

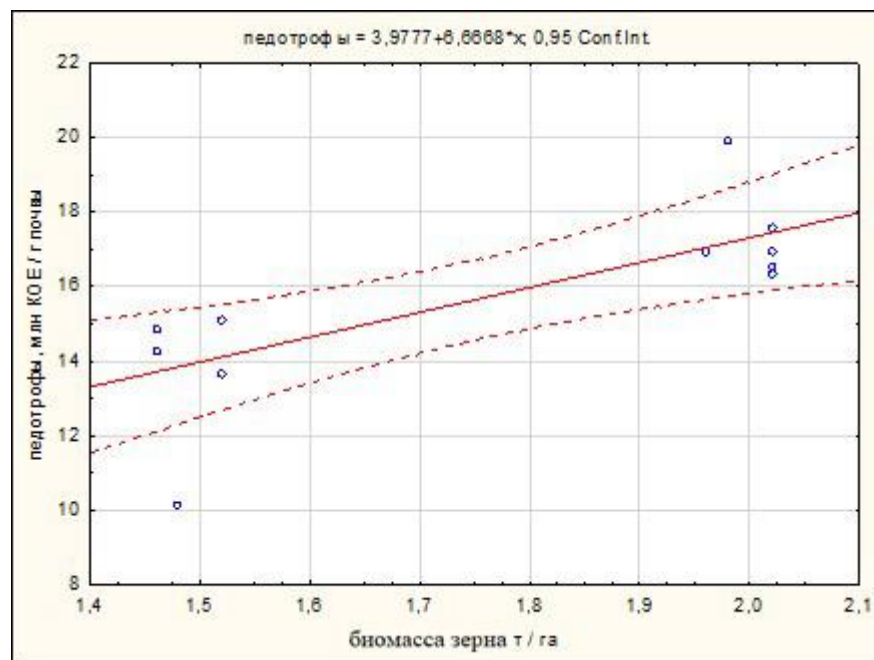


Рисунок 4.30 – Диаграмма рассеяния численности педотрофов в ризосфере и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2019 г.)

Уровень корреляции биомассы зерна с активностью каталаз ризосферы составил $r=-0,89$ (рисунок 4.28), олиготрофными микроорганизмами $r=-0,75$. Установлена прямая зависимость биомассы зерна с активностью пероксидаз

растений $r=0,85$ (рисунок 4.29), численностью педотрофных микроорганизмов $r=0,75$ (рисунок 4.30).

В весенний период 2020 г. до посева сорго выпало на 68,5 % осадков меньше в сравнении со среднемноголетними показателями (приложение А7). Всхожесть семян, а, следовательно, и густота стояния растений при прямом посеве была выше в сравнении с традиционной системой, что требовало большего потребления воды в варианте ресурсосберегающей технологии. У сорго в активную фазу идет формирование метелки, а при закладке репродуктивных органов так же происходит усиленное потребление воды (Zhang et al., 2020).

Известно, что при обеспечении растений водой после умеренной засухи, жизнедеятельность растений возобновляется, однако у них нет анатомо-морфологических приспособлений для ограничения расхода воды, что приводит к снижению продуктивности (Храмченкова, 2016). На протяжении всей вегетации сорго наблюдали дефицит влаги, осадков выпало меньше на 39,8–67,8 % в сравнении со среднемноголетними (приложение А7). Только в июне количество атмосферных осадков было на 17,9 % выше среднемноголетних показателей. Увеличение транспирации у засухоустойчивых культур обеспечивает растению возможность охлаждения при действии высоких температур (Высоцкая, Кудоярова, 2014). Как показано Manzanera и др. (2020), недостаток влаги в почве приводит к гибели многих бактерий, которая заканчивается выбросом органических веществ в окружающую среду. 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 4.31-4.34).

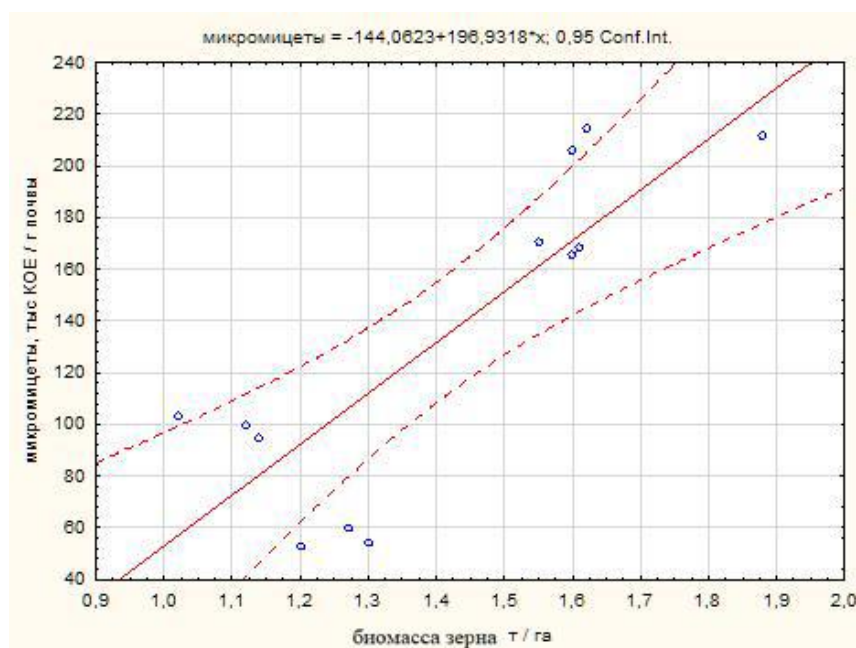


Рисунок 4.31 – Диаграмма рассеяния численности микромицетов и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 г.)

Установленные взаимосвязи указывают на то, что применение комплекса микроорганизмов полезного действия 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.

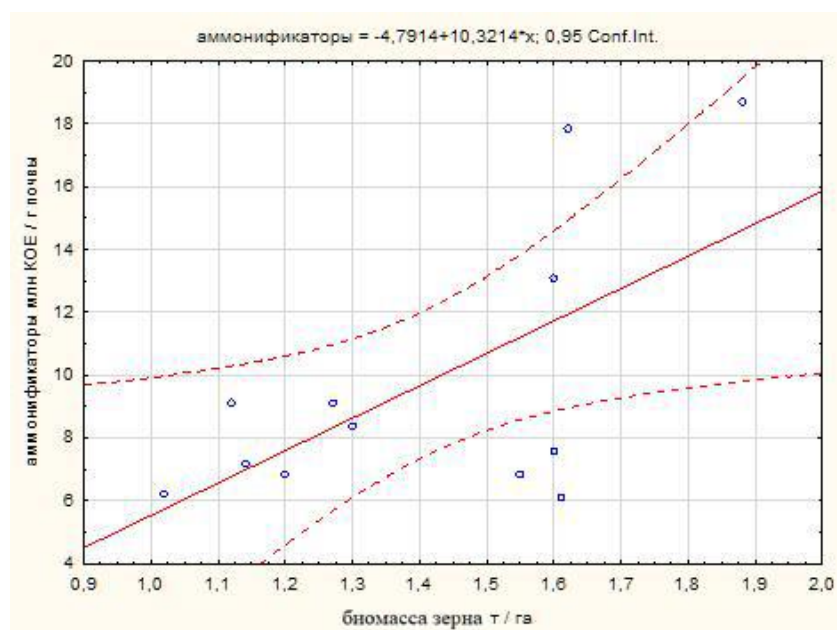


Рисунок 4.32 – Диаграмма рассеяния численности аммонификаторов и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 г.)

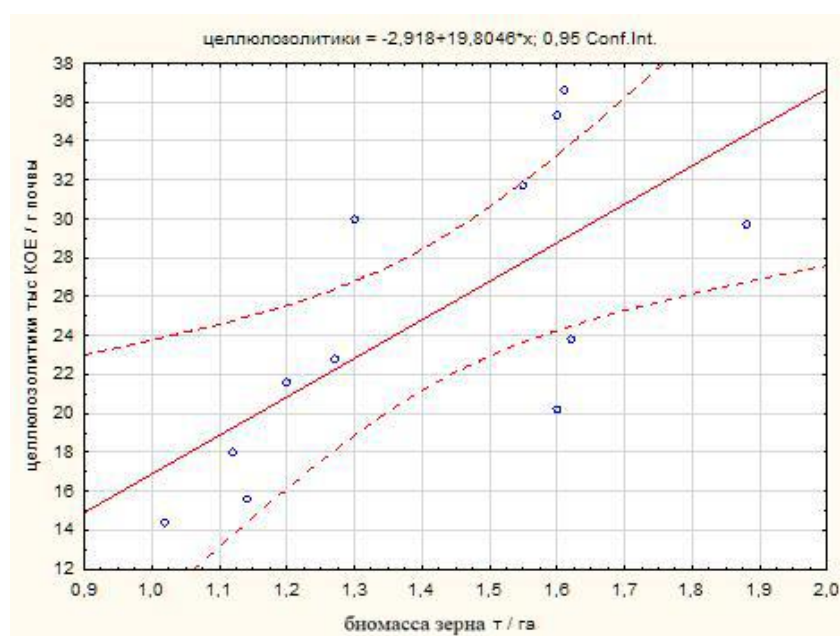


Рисунок 4.33 – Диаграмма рассеяния численности целлюлозолитиков и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 г.)

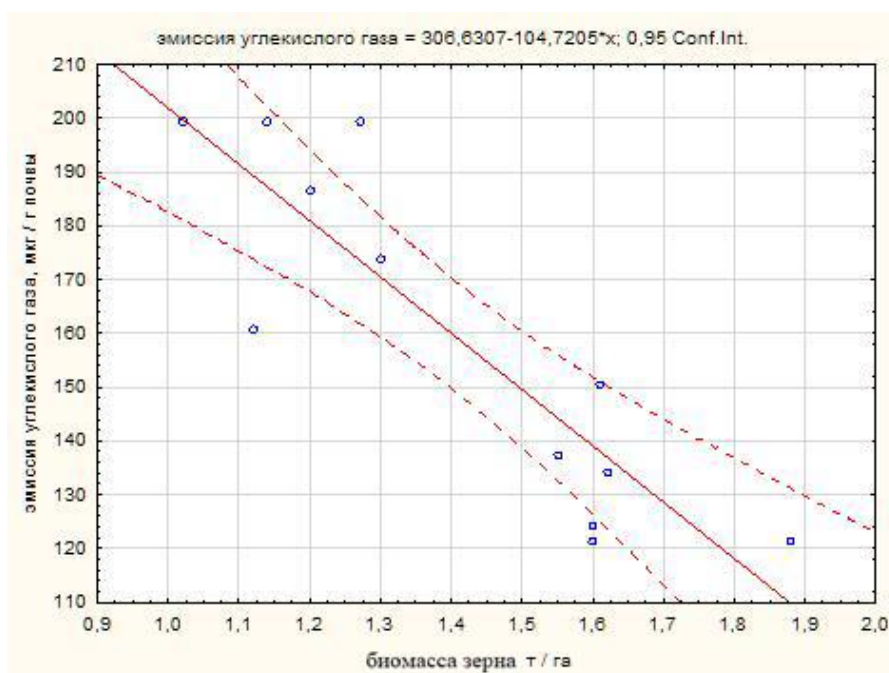


Рисунок 4.34 – Диаграмма рассеяния эмиссии углекислого газа и биомассы зерна сорго зернового (чернозем южный, 2020 г.)

Проведенные исследования выявили преимущество системы прямого посева над традиционной технологией по продуктивности сорго в засушливых условиях 2020 года. Полученная разница может быть объяснена способностью агроэкосистемы ПП эффективно аккумулировать и сохранять ограниченные осадки, выпавшие в июне – в критический период активной вегетации. Как следствие, в ризосфере поддерживался стабильный гидротермический режим, что стимулировало развитие специфических групп микроорганизмов и повышало ферментативную активность (Manzanera, 2020). Сравнительный анализ с литературными источниками позволяет заключить, что применение микробных биоагентов повышает адаптивный потенциал растений сорго к резким гидротермическим флуктуациям. Важной физиологической характеристикой оказалась способность культуры к быстрой реактивации ростовых процессов после снятия влагостресса. В условиях 2018 и 2020 годов даже ограниченное увлажнение в критическую фазу развития инициировало компенсаторный рост и обеспечило достоверную прибавку зерновой биомассы в вариантах с применением микробных препаратов.

Таким образом, анализ полученных результатов указывает на функциональную зависимость почвенного микробоценоза и физиологического статуса растений от применения комплекса микроорганизмов полезного действия и систем земледелия. Применение КМ комплексного действия способствует оптимизации работы микробиоты в ризосфере и повышению адаптационного потенциала сорго зернового при неблагоприятных условиях окружающей среды.

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 погодноклиматическими 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 погодноклиматического 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 % погодноклиматическое воздействие в агроэкосистеме прямого посева относительно традиционной. Применение комплекса микроорганизмов способствует повышению биомассы зерна сорго зернового 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова

КОЕ – колониеобразующие единицы

ОТЕ – операционная таксономическая единица

п.н. – пар нуклеотидов

ПЦР – полимеразная цепная реакция

НА – неатрибутированные таксоны

NGS – next-generation sequencing (технологии высокопроизводительного параллельного секвенирования)

Other – другие последовательности

PGPR – plant growth promoting rhizobacteria

АМГ – грибы арбускулярной микоризы

КАА – крахмало-аммиачный агар

Кгум – условный коэффициент гумификации

КМ – комплекс микроорганизмов

Кмин – коэффициент минерализации

МПА – мясо-пептонный агар

ПА – почвенный агар

ПО – пероксидаза

ПП – прямой посев

ПФО – полифенолоксидаза

ТС – традиционная система земледелия

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A/RES/70/1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года : резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 21 октября 2015 года. – URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/70/1> (дата обращения: 01.01.2023).
2. Абдурашитов, С. Ф. Оптимизация тройного симбиоза в агроценозах сои : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук : 06.01.05 / Абдурашитов Сулейман Февзиевич ; Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань, 2017. – 26 с.
3. Абрамян, С. А. Изменение ферментативной активности почвы под влиянием естественных и антропогенных факторов / С. А. Абрамян // Почвоведение. – 1992. – № 7. – С. 70-82.
4. Азаренко (Мясникова), М. А. Изменение растительного покрова и биологических свойств черноземов в постагрогенный период / М. А. Азаренко (Мясникова), К. Ш. Казеев, О. Ю. Ермолаева, С. И. Колесников // Почвоведение. – 2020. – № 11. – С. 1412-1422.
5. Алтыбаева, А. К. Длительность вегетационного периода сортов яровой мягкой пшеницы в условиях северо-востока Казахстана / А. К. Алтыбаева, С. В. Жаркова // Сборник трудов международной научно-практической онлайн конференции «Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса». – 2020. – С. 10-13.
6. Андронов, Е. Е. Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е. Е. Андронов, Е. А. Иванова, Е. В. Першина, О. В. Орлова, Ю. В. Круглов, А. А. Белимов, И. А. Тихонович. // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – № 80. – С. 83-93.

7. Ассоциативные микроорганизмы растений: выделение штаммов и их изучение. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2021. – 179 с. – ISBN 978-5-907506-71-8. – DOI 10.33952/2542-0720-2022-978-5-907506-71-8.

8. Баранская, М.И. Воздействие биоагентов микробных препаратов (*Rhizobium radiobacter* 204, *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32-3, *Paenibacillus polymyxa* П) на семена *Nigella damascena* L / М. И. Баранская, Л. А. Чайковская, В. И. Немтинов // Таврический вестник аграрной науки. – 2020. – № 3 (23). – С. 18–25.

9. Бастаубаева, Ш. О. Эффективность биологизированных севооборотов и зеленых удобрений для повышения продуктивности орошаемых земель /Ш. О. Бастаубаева, А. В. Агеенко // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 2. – С. 53-60.

10. Безлер, Н. В. Возможности использования целлюлозолитического микромицета *Nhumicola fuscoatra* ВНИИСС для стабилизации гумусового состояния чернозема, выщелоченного / Н. В. Безлер, И. В. Черепухина, М. В. Колесникова // Плодородие почв России: состояние, тенденции и прогноз: материалы международной конференции. / под ред. В. Г. Сычева. – М.: ВНИИ агрохимии, 2019. – С. 32-38. DOI: 10.25680/VNIIA.2019.18.86.034

11. Биологический контроль окружающей среды: генетический мониторинг: учеб. пособие для студ. высш. проф. образования / С. А. Гераськин, Е. И. Сарапульцева, Л. В. Цаценко, В. М. Глазер, С. К. Абилов, С. Г. Смирнова, И. А. Замулаева, Л. Н. Комарова, Е. И. Степченкова, С. Г. Инге-Вечтомов, А. И. Ким, Д. В. Крутенко, Т. И. Евсеева, Г. Ф. Михайлова, Н. В. Амосова; под ред. С. А. Гераськина и Е. И. Сарапульцевой. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 208 с.

12. Биопрепарат на основе иммобилизованных микроорганизмов как основа высокоэффективных органических удобрений нового поколения / Н. Ю. Юдина, Т. Н. Козлова, Т. Н. Абрамова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 208-216. – DOI 10.31857/S0555109923020198.

13. Биотехнологический потенциал микробиома почв / Н. А. Манучарова, А. П. Власова, М. А. Коваленко [и др.] // Микробиология. – 2024. – Т. 93, № 2. – С. 128-132. – DOI 10.31857/S0026365624020056.
14. Борисов, А. Ю. Регуляторные гены гороха посевного (*Pisum sativum* L.), контролирующие развитие азотфиксирующих клубеньков и арбускулярной микоризы: фундаментальные и прикладные аспекты / А. Ю. Борисов, А. Г. Васильчиков, В. А. Ворошилова, Т. Н. Данилова, А. И. Жернаков, В. А. Жуков, Т. А. Королева, Е. В. Кузнецова, Л. З. Мадсен, М. З. Мофетт, Т. С. Наумкина, Т. А. Неманкин, Е. С. Овчинникова, З. Б. Павлова, Н. Э. Петрова, А. Г. Пинаев, С. З. Радутоиу, С. М. Розов, Т. С. Рычагова, И. И. Соловов, Й. З. Стоугард, А. Ф. Топунов, Н. Ф. Уиден, В. Е. Цыганов, О. Ю. Штарк, И. А. Тихонович. // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 265-271.
15. Бровко, И. С. Формирование микробиоценоза ризосферы растений сои разных генотипов при использовании глифосата /И. С. Бровко, Л. В. Титова, Г. А. Иутинская // Агроекологічний журнал. – 2015. – № 2. – С. 82-86.
16. Буянтуева, Л. Б. Динамика численности олиготрофных бактерий каштановых почв Селенгинского среднегорья / Л. Б. Буянтуева, Е. П. Никитина, А. Н. Пронченко // Actualscience. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 18-20.
17. Вадюнина, А. Ф. Методы определения физических свойств почв и грунтов (в поле и лаборатории). / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М.: Высшая школа, 1961. – 345 с.
18. Власенко, А. Н. Изменение показателей плодородия чернозема выщелоченного лесостепи Приобья при использовании технологии no-till / А. Н. Власенко, Н. Г. Власенко, П. И. Кудашкин // Агрохимия. – 2019. – № 12. – С. 16-21
19. Влияние штаммов *Bacillus subtilis* в сочетании с салицилатом хитозана на активность пероксидазы и каталазы в листьях пшеницы при инфицировании возбудителем темно-бурой пятнистости *B. sorokiniana* / И. И. Новикова, Э. В. Попова, Н. М. Коваленко, И. Л. Краснобаева // Прикладная биохимия и

микробиология. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 193-204. – DOI 10.31857/S0555109924020093.

20. Волобуева, О. Г. Влияние биопрепарата Альбит на содержание фитогормонов в растениях фасоли разных сортов и эффективность симбиоза / О. Г. Волобуева, И. В. Скоробогатова, В. К. Шильникова // Известия ТСХА. – 2010. – Вып. 1. – С. 105-113.

21. Воробьев, Н. И. Граф-анализ генно-метаболических сетей почвенных микроорганизмов, трансформирующих растительные остатки в гумусовые вещества / Н. И. Воробьев, О. В. Свиридова, А. А. Попов, И. В. Русакова, В. Б. Петров. // Сельскохозяйственная биология. – 2011. – № 3. – С. 88-93.

22. Воронин, А. А. Динамика ферментативной активности чернозема обыкновенного в условиях полевого стационарного опыта федерального полигона «каменная степь» / А. А. Воронин, Н. А. Протасова, Н. С. Беспалова // ВЕСТНИК ВГУ. – 2006. – № 2. – С.122-127.

23. Высоцкая, Л. Б. Особенности реакции на дефицит воды в атмосфере и среде корнеобитания у разных сортов ячменя / Л. Б. Высоцкая, Г. Р. Кудоярова // Известия Уфимского научного центра РАН. Биология. Биохимия и генетика. – 2014. – № 1. – С. 37-42.

24. Вяль, Ю. А. Ферментативная активность и агрохимические свойства почв Пензенского ботанического сада /Ю. А. Вяль, А. В. Шиленков // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. Естественные науки. – 2008. – № 10 (14). – С. 26-32.

25. Газарян, И. Г. Особенности структуры и механизма действия пероксидаз растений / И. Г. Газарян, Д. М. Хушпульян, В. И. Тишков // Успехи биологической химии. – 2006. – Т. 46. – С. 303-322

26. Галстян, А. Ш. Унификация методов исследования активности ферментов почв / Галстян А. Ш. // Почвоведение. – 1978. – №2.

27. Гатаулина, Г. Г. Влияние погодных условий на стабильность урожайности у сортов люпина белого *Lupinus albus* L. / Г. Г. Гатаулина, М. Е. Бельшкіна, Н. В. Медведева // Известия ТСХА. – 2017. – Вып. 6. – С. 16-28.
28. Гедгафова Ф. В. Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв центрального Кавказа (терский вариант поясности в пределах Кабардино-Балкарии) в результате агроиспользования / Ф. В. Гедгафова, О. Н. Горобцова, Т. С. Улигова, Р. Х. Темботов, Е. М. Хакунова // Агрохимия. – 2019. – № 4. – С. 23-30.
29. Горянин, О. И. Эффективное плодородие при прямом посеве яровой пшеницы в Среднем Заволжье / О. И. Горянин, А. В. Васин, Е. В. Щербинина, Б. Ж. Джангабаев, Л. В. Пронович, И. Ф. Медведев // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 4-9.
30. Грицаенко, З. М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин та ґрунтів / З. М. Грицаенко, А. О. Грицаенко, В. П. Карпенко. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – 320 с.
31. Губанова В. М., Губанов М. В. Влияние гидротермического коэффициента на урожайность коллекции ярового ячменя различных групп спелости // Известия Оренбургского государственного аграрного университета – 2021. – Т.91. – №5. – С. 35 – 39. doi: 10.37670/2073-0853-2021-91-5-35-39.
32. Гусев В.П., Колесниченко В.Т. Почвы сельскохозяйственной опытной станции и прилегающих районов Крымских степей // Труды Крымской Государственной сельскохозяйственной опытной станции. – Симферополь: Крымиздат, 1955. – Т. 1. – С. 21–49.
33. Даденко, Е. В. Оценка применимости показателей ферментативной активности в биодиагностике и мониторинге почв / Е. В. Даденко, Т. В. Денисова, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. // Поволжский экологический журнал. – 2013. – № 4. – С. 385-393.
34. Добровольская, Т. Г. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв / Т. Г. Добровольская, Д. Г. Звягинцев, И. Ю. Чернов, А. В. Головченко, Г. М. Зенова, Л. В. Лысак, Н. А. Манучарова, О. Е. Марфенина, Л. М.

Полянская, А. Л. Степанов, М. М. Умаров. // Почвоведение. – 2015. – № 9. – С. 1087-1087. DOI: 10.7868/S0032180X15090038.

35. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). / Б. А. Доспехов – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

36. Достижения и перспективы в сфере производства и переработки сельскохозяйственной продукции : Материалы IV национальной научно-практической конференции, посвященной 45-летию ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, Майский, 10 ноября 2023 года. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. – 485 с.

37. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. – Симферополь: Доля, 2004. – 208 с.

38. Дрёпа, Е. Б. Физические свойства почвы при применении технологии no-till /Е. Б. Дрёпа, А. С. Голубь. // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 4 (16). – С. 181-185.

39. Дубинина, М. Н. Роль почвенных микробиологических сообществ в формировании агрономически ценной водопрочной структуры / М. Н. Дубинина, В. А. Лыхман // Вестник Донского государственного аграрного университета. – 2019. – №. 3-1. – С. 82-87.

40. Дубровская, Е. В. Пероксидазы из корней люцерны: каталитические свойства и участие в деградации полициклических ароматических углеводов / Е. В. Дубровская, Н. Н. Позднякова, С. Н. Голубев, В. С. Гринев, О. В. Турковская // Физиология растений. – 2017. – Т. 64. – № 2. – С. 116-126.

41. Дымова, О. В. Фотосинтетические пигменты: функционирование, экология, биологическая активность / О. В. Дымова, Т. К. Головкин // Известия уфимского научного центра РАН. – 2018. – № 3 (4). – С. 5-16.

42. Евсеев, В. В. Микробиологическая активность чернозема выщелоченного в зернопаровом и кормовом севооборотах лесостепной зоны Зауралья / В. В. Евсеев // Аграрный вестник Урала. – 2005. – № 1 (25). – С. 54-56.

43. Ергина, Е. И. Географический анализ допустимых норм эрозии почв в агроландшафтах Крымского полуострова / Е. И. Ергина, Р. В. Горбунов, А. Д. Щербина. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. – 180 с.
44. Есикова, Т. З. Новые ризосферные штаммы-деструкторы гербицидов, способные к биоконтролю фитопатогенных микроорганизмов / Т. З. Есикова, В. Н. Поливцева, Т. О. Анохина // Микробиология. – 2025. – Т. 94, № 1. – С. 104-108. – DOI 10.31857/S0026365625010099.
45. Железова, А. Д. Влияние способа сельскохозяйственной обработки на микробиологические характеристики дерново-подзолистой почвы / А. Д. Железова, Д. И. Пассова, Д. А. Никитин, М. А. Яшин, С. В. Железова. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – Вып. 99. – С. 117-144. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-99-117-144>
46. Железова, С. В. Прямой посев и вспашка: десятилетний комплексный мониторинг агрофитоценозов в центре точного земледелия РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева / С. В. Железова // Сборник научных трудов ГНБС. – 2019. – Т. 148. – С. 60-67.
47. Жученко, А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика: В трех томах / А. А. Жученко – М.: изд-во «Агрорус», 2009. – Т.2. – 1104 с.
48. Завалин, А. А. Биопрепараты, удобрения и урожай. / А. А. Завалин. – М.: Издательство ВНИИА. – 2005. – 302 с.
49. Новые технологии производства и применения биопрепаратов комплексного действия / А. А. Завалин, А. П. Кожемяков, О. А. Андреев [и др.]; Под редакцией А.А. Завалина, А.П. Кожемякова. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 64 с. – ISBN 978-5-93808-188-8.
50. Злотников, А. К. Применение биопрепарата для повышения устойчивости растений к засухе и другим стрессорам / А. К. Злотников, К. М. Злотников // АГРО XXI. – 2007. – № 10-12. – С. 37-38.
51. Злотников, А. К. Разработка и комплексная характеристика полифункционального препарата Альбит для защиты растений от болезней и

стрессов: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.00 / А. К. Злотников. - Воронеж, 2012. - 47 с.

52. Ибрагимова, С. С. Роль различных метаболитов в формировании стрессоустойчивости растений / С. С. Ибрагимова, В. В. Горелова, А. В. Кочетов, В. К. Шумный. // Вестник НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина. – 2010. – Т. 8. – № 3. – С.98-103.

53. Иванистов, А. Н. Биопрепарат Поле-Агровит р и его применение при выращивании сельскохозяйственных культур / А. Н. Иванистов, Ю. Л. Тибец, О. Н. Жук // Проблемы продовольственной безопасности (EPFS 2023) : Материалы Международной научно-практической конференции: В 2-х частях, Горки, 19–21 января 2023 года / Редколлегия: В.В. Великанов (гл. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. – С. 250-254.

54. Казеев, К. Ш. Биодиагностика почв: методология и методы исследований: / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. - Ростов-на-Дону. – Издательство Южного федерального университета, 2012. – 260 с.

55. Каменева, И. А. Ассоциативные с растениями микроорганизмы как объекты биотехнологии микробных препаратов / И. А. Каменева, А. И. Якубовская, И. И. Смирнова, М. В. Гритчин. // Материалы VI Всероссийской конференции с международным участием. Экобиотех 2019. – 2019. – С. 178-182.

56. Кибальник, О. П. Оценка качества зерна и биомассы сорго с целью использования в кормопроизводстве / О. П. Кибальник, И. Г. Ефремова, Д. С. Семин, В. С. Горбунов, О. Б. Каменева, В. И. Старчак, С. С. Куколева // Зерновое хозяйство России. – 2019. - №4. С. 3-7.

57. Кимеклис, А. К. Микробиом почв Кингисеппского месторождения фосфоритов при разных типах горнотехнической и биологической рекультивации / А. К. Кимеклис, Я. А. Дмитракова, Е. А. Першина, Е. А. Иванова, А. О. Зверев, Г. В. Гладков, А. А. Кичко, Е. Е. Андронов, Е. В. Абакумов. // Сельскохозяйственная биология. – 2020. – Т. 55. – С. 137-152.
10.15389/agrobiology.2020.1.137rus

58. Кирюшин, В. И. Проблемы минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследования /В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2013. – №7. – С. 3-6.
59. Клепинин Н.Н. Как работает Крымская опытная станция. Крымским крестьянам/Н.Н. Клепинин. - Симферополь: Крымгосиздат, 1927 г. - 34 с.
60. Коваленко М. В., Марковская Г. К. Влияние способов основной обработки почвы на её ферментативную активность / М. В. Коваленко, Г. К. Марковская. // Вестник Казанского ГАУ. – 2013. – № 1. – Вып. 27. – С.108-111.
61. Колесникова, М. В. Влияние целлюлозолитического микромицета *Humicola fuscoatra* ВНИИСС 016 на некоторые показатели плодородия почвы в посевах сахарной свёклы / М. В. Колесникова, И. В.Черепухина, Н. В. Безлер // Агрохимия. – 2018. – № 4. –С. 18-26.
62. Колупаев, Ю. Е. Пролин: физиологические функции и регуляция содержания в растениях в стрессовых условиях / Ю. Е. Колупаев, А. А. Вайнер, Т. О. Ястреб // Вісник харківського національного аграрного університету серія біологія. – 2014. – Вип. 2 (32). – С. 6-22.
63. Колчанов, Н. А. Генные сети / Н. А. Колчанов, Е. А. Ананько, Ф. А. Колпаков [и др.]. // Молекулярная биология. – 2000. – Т. 34. – № 4. – С. 533-544.
64. Кондакова, О. Э. Использование микоорганизмов для выращивания хвойных и улучшения биогенности почв в лесных питомниках Сибири : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.03 / О. Э. Кондакова ; науч. рук. И. Д. Гродницкая. - Красноярск, 2019. - 257 с.
65. Кононова, М. М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения / Кононова М. М. – М., 1963.- 314с.
66. Корчагин, В. А. Системы обработки почвы в современных ресурсосберегающих технологических комплексах возделывания зерновых культур на черноземных почвах степных районов Среднего Заволжья / В. А. Корчагин, С. В. Обущенко, О. И. Горянин, Б. Ж. Джангабаев. // Земледелие и растениеводство. – 2015. – С. 546-560.

67. Кочмина, Е. О. Влагосберегающая эффективность технологии no-till при возделывании озимой пшеницы /Е. О. Кочмина, Н. П. Чекаев. // Нива Поволжья. – 2016. – №1 (38). – С. 35-41.
68. Кривошеев Г. Я., Игнатьев А. С. Влияние количественных признаков на урожайность зерна гибридов кукурузы в зависимости от климатических условий // Зерновое хозяйство России – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 30-35.
<https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-91-2-30-35>
69. Кудоярова, Г. Р. Современное состояние проблемы водного баланса растений при дефиците воды /Г. Р. Кудоярова, В. П. Холодова, Д. С. Веселов. // Физиология растений. – 2013. – Т. 60. – № 2. – С. 155-165.
70. Кузикова, И. Л. Влияние нонилфенолов на численность и таксономическую структуру почвенного микробного сообщества / И. Л.Кузикова, Т. Б. Зайцева, А. А. Кичко,С. В. Зиновьева, А. Д. Руссу, Н. В. Маячкина, Н. Г. Медведева. // Почвоведение. – 2019. – № 6. – С. 722-733.
71. Куприченков, М. Т. Ферменты в почвах Предкавказья: монография / М.Т. Куприченков, Т. Н. Антонова; Ставропольский НИИСХ. – Ставрополь: АГРУС, 2010. – 192 с.
72. Курамшина, З. М. Влияние *Bacillus subtilis* на рост и активность антиоксидантных ферментов растений *Triticum aestivum* при Cd-стрессе / З. М. Курамшина, Ю. В. Смирнова, Р. М. Хайруллин. // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Т. 19. – №3. – С. 835-839.
73. Курьянчик, Т. Г. Содержание фотосинтетических пигментов и феофитина в листьях растений ячменя, выращенных в условиях почвенной засухи при разной освещенности / Т. Г. Курьянчик, Н. В. Козел // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 5. Экономика. Социология. Биология. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 156-162.
74. Кутовая, О. В. Сравнительная оценка влияния нулевой и традиционной обработки на биологическую активность агрочерноземов Ставропольского края / О. В. Кутовая, А. К. Тхакахова, М. В. Семенов,Т. И. Чернов, Н. А. Ксенофонтова, А. Д. Железова, Р. Г. Гаджиумаров, Р. С. Стукалов,

Е. А. Иванова, Д. А. Никитин. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2019. – Вып. 100. – С. 159-189. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-100-159-189

75. Кутузова, Р. С. Микробиологическая характеристика дерновых почв центральной поймы Северной Двины / Р. С. Кутузова, Н. И. Воробьев, М.В. Гамова, Л. А. Попова, Ю. В. Круглов. / Почвоведение. – 2009. – №2. – С. 244-254.

76. Лапа, В. В. Активность процессов минерализации и гумификации в высоко окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в зависимости от применения удобрений / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская. // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2016. – Т. 60. – № 3. С.– 122–128.

77. Лихошвай, В. А. О связи графа генной сети с качественными режимами ее функционирования / В. А. Лихошвай, Ю. Г. Матушкин, С. И. Фадеев / Молекулярная биология. – 2001. – № 35 (6). – С. 1080-1087.

78. Маевская, С. Н. Реакция антиоксидантной и осмопротекторной систем проростков пшеницы на засуху и регидратацию / Маевская С. Н, М. К. Николаева. // Физиология растений. – 2013. – Т. 60. – № 3. – С. 351-359.

79. Максимов, И. В. Структурно функциональные особенности изопероксидаз растений / И. В. Максимов, Е. А. Черепанова, Г. Ф. Бурханова, А. В. Сорокань, О. И. Кузьмина // Обзор. Биохимия. – 2011. – Т. 76. – №6. – С.749-763.

80. Манучарова, Н. А. Специфика хитинолитического микробного комплекса в почвах, инкубируемых при различных температурах / Н. А. Манучарова, А. Н. Власенко, Е. В. Менько, Д. Г. Звягинцев. // Микробиология. – 2011. – Т. 80. – № 2. – С. 219-229.

81. Менькина, Е. А. Влияние элементов технологии возделывания на влагообеспеченность и активность эколого-трофических групп микроорганизмов чернозема обыкновенного / Менькина Е. //

Сельскохозяйственный журнал. – 2019. – №2 (12). – С. 19-24. DOI: 10.25930/003.2.12.2019

82. Мерзликин, А. С. Ценовая политика, эффективность химизации и сельскохозяйственного производства в России / Мерзликин, А. С. // Проблемы агрохимии и экологии. – 2010. – № 1. – С.45-54.

83. Методические рекомендации по оценке токсического действия пестицидов на микрофлору почвы / под общим руководством Ю.В. Круглова. – 1981. – 43 с.

84. Минаева, О. М. Биопрепараты для защиты растений: оценка качества и эффективности: учеб. пособие / О. М. Минаева, Е. Е. Акимова, Т. И. Зюбанова, Н. Н. Терещенко. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2018. - 130 с.

85. Минникова, Т. В. Оценка ферментативной активности Ростовской области под бинарными посевами подсолнечника / Т. В. Минникова, Г. В. Мокриков, К. Ш. Казеев, Ю. В. Акименко, С. И. Колесников // Известия ТСХА. – 2017. – Вып 6. – С.141-155.

86. Мирчик, Т. Г. Почвенная микология / Т. Г. Мирчик. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. - 220 с.

87. Михайлова, М. П. Роль пероксидазы в повышении устойчивости растений сои к неблагоприятным факторам / М. П. Михайлова. // Вестник Дальневосточного отделения РАН. - 2019. - № 3. - С. 139-144.

88. Мокриков, Г. В. Влияние технологии прямого посева на запасы влаги в черноземе Ростовской области / Г. В. Мокриков, М. А. Мясникова, В. П. Солдатов, К. Ш. Казеев // Почвы в биосфере: сборник материалов Всерос. науч. конференции с международным участием, посвященной 50-летию Ин-та почвоведения и агрохимии СО РАН / отв. ред. А. И. Сысо. - 2018. - С. 333-335.

89. Мордкович, В. Г. Степные экосистемы / В. Г. Мордкович; отв. ред. И. Э. Смелянский. – 2-е изд. испр. и доп. Академ. изд-во "Гео", 2014. - 170 с.

90. Мынбаева, Б. Н. Подавление биохимической активности загрязненных городских почв / Б. Н. Мынбаева, А. В. Медведева. // Известия алтайского государственного университета. – 2011. – №3-2 (71). – С. 23-25.

91. Научные основы и практические рекомендации по использованию биоудобрений из отходов животноводства для биологического земледелия / под.ред. И.А. Архипченко – Спб., 2005, 44 с.

92. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)» / под ред. А. И. Бедрицкого. – М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева: ГЕОС, 2018. - 285 с.

93. Нечаева, Е. Х. Параметры оценки биологической активности почвы / Е. Х. Нечаева, Г. К. Марковская, Н. А. Мельникова. // Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решения: сб. науч. тр. Кинель. – 2016. – С. 154-158.

94. Никитин, Д. А. Оценка влияния технологии no-till и вспашки на микробиом южных агрочерноземов / Д. А. Никитин, Е. А. Иванова, А. Д. Железова, М. В. Семенов, Р. Г. Гаджиумаров, А. К. Тхакахова, Т. И. Чернов, Н. А. Ксенофонтова, О. В. Кутовая. // Почвоведение. – 2020. – № 12. – С. 1508-1520.

95. Новосёлова, Е. И. Влияние тяжёлых металлов на активность каталазы разных типов почв / Е. И. Новосёлова, О. О. Волкова. // Известия оренбургского государственного университета. – 2017. – №2. – Вып. 64. – С.190-193.

96. Основные достижения и перспективы почвенной метагеномики // Под ред. Першиной Е. В., Кутовой О. В., Когут Б. М., Андропова Е. Е. СПб.: Информ-Навигатор, 2017. – 288 с.

97. Павлова, В. Н. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России / В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко // Труды Главной геофизической обсерватории. – 2012. – Вып. 565. – С. 132-151.

98. Пат. 2244916 Рос. Федерация. Способ определения хлорофилла в растениях гречихи / В. Т. Лобков, Г. В. Наполова; патентообладатель Орловский

гос. аграр. ун-т. - № 2003118708/13; заявл. 02.07.2003; опубл. 20.01.2005, Бюл. № 2. - 4 с.

99. Пат. 2661815 Рос. Федерация. Способ выращивания нута в засушливых условиях степного Крыма / О. П. Пташник, С. В. Дидович, В. С. Паштецкий. - № 2016136048; заявл. 06.09.2016; опубл. 19.07.2018.

100. Пат. 2676926 Рос. Федерация. Фосфатмобилизующий штамм почвенных бактерий *Lelliottia nimipressuralis* ССМ 32-3 и биопрепарат на его основе для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности / Л. А. Чайковская, Т. Н. Мельничук, И. А. Каменева, М. И. Баранская, О. Л. Овсиенко. - № 2018100472; заявл. 09.01.2018; опубл. 11.01.2019.

101. Пат. 2692655 Рос. Федерация. Штамм *Bacillus thuringiensis* var. *darmstadiensis* 56 в качестве полифункционального средства для растениеводства. / И. А. Тихонович, В. П. Ермолова, С. Д. Гришечкина, Т. А. Романова, А. А. Нижников, К. С. Антонец - № 2017143084 ; заявл. 11.12.2017 ; опубл. 25.06.2019.

102. Пат. 2823059 Рос. Федерация. Штамм бактерий *Bacillus pumilus* BIS88 в качестве универсального средства для улучшения питания, ускорения роста и увеличения продуктивности сельскохозяйственных зерновых, овощных и технических культур, а также их защиты от болезней и стрессовых факторов хлоридного засоления / В. К. Чеботарь, С. В. Ерофеев ; заявитель ООО "БИСОЛБИ-ИНТЕР". - № 2023136239; заявл. 29.12.2023; опубл. 18.07.2024.

103. Паштецкий, В. С. Научные основы оптимизации агроландшафтов и эффективного аграрного производства Республики Крым. Симферополь: ИТ «Ариал», 2015. – 276 с.

104. Першина, Е. В. Изучение структуры микробного сообщества засоленных почв с использованием высокопроизводительного секвенирования / Е. В. Першина, Г. С. Тамазян, А. С. Дольник, А. Г. Пинаев, Н. Х. Сергалиев, Е. Е. Андронов. // Экологическая генетика. – 2012. – Т. X. – №2. – С.32-39.

105. Пилецкая, О. А. Прокопчук В. Ф. Ферментативная активность черноземовидной почвы на фоне длительного применения удобрений / О. А. Пилецкая, В. Ф. Прокопчук. / Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2014. – № 4. – С. 41-45.
106. Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия. – Симферополь: Таврия, 1987. – 151 с.
107. Попович В. Ф. Особенности сценарного моделирования развития сельскохозяйственных культур / Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы IV международной научно-практической конференции. Научный редактор В.С. Паштецкий. 2019 - с. 328-330.
108. Почвозащитное и ресурсосберегающее земледелие: теория и методика исследований / Публикация издана в ознаменование Международного года почв; перевод под общей ред. Х. Муминджанова. Анкара. – 2015. – С.188
109. Практикум по физиологии растения / Под ред. Н. Н. Третьякова, Т. В. Карнаухова, Л. А. Паничкин; 3-е изд., перераб, и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
110. Проворов, Н. А. Генетические основы эволюции растительно-микробного симбиоза / Н. А. Проворов, Н. И. Воробьев // Под ред. И. А. Тихонович. СПб.: Информ-Навигатор, 2012. – 400 с.
111. Проворов, Н. А. Сельскохозяйственная микробиология и симбиогенетика: синтез классических идей и конструирование высокопродуктивных агроценозов (обзор) / Н. А. Проворов, И. А. Тихонович // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57, № 5. – С. 821-831. – DOI 10.15389/agrobiology.2022.5.821rus.
112. Пуртова, Л. Н. Изменение показателей гумусного состояния, микрофлоры и ферментативной активности в агрообразцах приморья в условиях фитомелиоративного опыта / Л. Н. Пуртова, Л. Н. Щапова, А. Н. Емельянов, С. Н. Иншакова. // Аграрный вестник Урала. – 2012. – №10 (102). – С. 10-12.

113. Пуртова, Л. Н. Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья / Л. Н. Пуртова, Н. М. Костенков, В. А. Семаль, И. В. Комачкова. // Биологические науки. – 2013. – № 1. – С. 585-589.
114. Радюкина, Н. Л. Экзогенный пролин модифицирует дифференциальную экспрессию генов супероксиддисмутазы в растениях шалфея при UV-B облучении / Н. Л. Радюкина, А. В. Шашукова, С. С. Макарова, В. В. Кузнецов. // Физиология растений. – 2011. – Т. 58. – № 1. – С. 49-57.
115. Рахманкулова, З. Ф. Сравнительная оценка вклада компонентов $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ обмена в процесс адаптации к засухе у ксерогалофитов семейства *Chenopodiaceae* с разным типом фотосинтеза / З. Ф. Рахманкулова, Е. В. Шуйская, М. Ю. Прокофьева, А. М. Боровкова, П. Ю. Воронин. / Физиология растений. – 2020. – Т. 67. – № 3. – С. 298-311.
116. Рождественский, А. В. Статистические методы в гидрологии / А. В. Рождественский, А. И. Чеботарев. – Гидрометеиздат, 1974. – 423 с.
117. Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агросистем и защите окружающей среды (обзор) / Т. Ю. Коршунова, М. Д. Бакаева, Е. В. Кузина [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 211-227. – DOI 10.31857/S0555109921030089.
118. Сандакова, Г. Н. Параметры моделей погодных факторов для формирования урожая яровой сильной пшеницы в условиях степной зоны Оренбургской области / Г. Н. Сандакова, В. И. Елисеев. // Известия оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – №2. – Вып. 64. – С. 16-19.
119. Свиридова, О. В. Выравнивание почвенных условий для развития растений при деструкции растительных остатков микробными препаратами / О. В. Свиридова, Н. И. Воробьев, Н. А. Проворов, О. В. Орлова, И. В. Русакова, Е. Е. Андронов, В. Н. Пищик, А. А. Попов, Ю. В. Круглов. // Сельскохозяйственная биология. – 2016. – Т. 51. – № 5. – С. 664-672. DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.664rus

120. Селявин, С. Н. Оценка биологического состояния почвы по микробиологической и ферментативной активности / С. Н. Селявин, О. Б. Мареева, А. Л. Лукин. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2. – Вып. 45. – С. 36-39.

121. Семенов, А. М. Концепция здоровья почвы: фундаментально-прикладные аспекты обоснования критериев оценки / А. М. Семенов, М. С. Соколов. // Агрохимия. – 2016. – №1. – С. 3-16.

122. Семенов, М. В. Метабаркодинг и метагеномика в почвенно-экологических исследованиях: успехи, проблемы и возможности / М. В. Семенов. // Журнал общей биологии. – 2019. – Т. 80. – № 6. –С. 403–417. DOI: 10.1134/S004445961906006X

123. Скопина, М. Ю. Разнообразие малочисленности: феномен «разреженной бактериальной биосферы» / М. Ю. Скопина, А. А. Васильева, Е. В. Першина, А. В. Пиневич. // Микробиология. – 2016. – Т. 85, № 3. – С. 248-260.

124. Славкина, В. П. Микробиологическая активность лугово-дерновой почвы при использовании разнородных сидератов / В. П. Славкина. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 11. (89). – С. 63-66. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.89.11.046>

125. Стахурлова, Л. Д. Биологическая активность как индикатор плодородия черноземов в различных биоценозах /Л. Д. Стахурлова, И. Д. Свистова, Д. И. Щеглов // Почвоведение. – 2007. – №6. – С. 769-774.

126. Страшная, А. И. Автоматизированная технология мониторинга и расчета количества декад с почвенной и атмосферно-почвенной засухой под зерновыми культурами / А. И. Страшная, И. Э. Пурина, О. В. Чуб, О. И. Задорнова, Т. С. Чекулаева. // Тр. Гидрометцентра России. - 2013. - Вып. 349. - С. 161-175.

127. Стукач, О. В. Программный комплекс Statistica решении задач управления качеством: учебное пособие / О. В. Стукач; Томский политехн. ун-т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. - 163 с.

128. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – М.: Дрофа, 2005. – 254 с.

129. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: Научно-методическое пособие / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Нижний Новгород: Нижегородская с.-х. акад., 2012. – 64 с.

130. Тихонович, И. А. Микробиологические аспекты плодородия почвы и проблемы устойчивого земледелия / И. А. Тихонович, Ю. В. Круглов // Плодородие. – 2006. – № 5. – С. 9-12.

131. Тихонович, И. А. Молекулярные основы конструирования высокопродуктивных экологически устойчивых агроценозов / И. А. Тихонович, Н. А. Проворов // Экологическая генетика. – 2011. – Т. IX– №3. – С.23-26.

132. Тишков, А. А. Экологическая реставрация нарушенных степных экосистем / А. А. Тишков // Вопросы степеведения. Оренбург: Оренбургская губерния, 2000. – С. 47-61.

133. Тонха, О. Л. Микробная трансформация органического вещества черноземов лесостепи и степи Украины при различном их использовании / О. Л. Тонха, А. Д. Балаев, В. Н. Недбаев. // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – №4. – С. 50-54.

134. Туев, Н. А. Микробиологические процессы гумусообразования / Н. А. Туев. – ВАСХНИЛ. – М.: Агропромиздат, 1989. – 239 с.

135. Турусов, В. И. Изменение и взаимосвязь физических и микробиологических показателей луговых почв юго-востока ЦЧЗ в результате агрогенеза / В. И. Турусов, Ю. И. Чевердин, Т. В. Титова, В. А. Беспалов, Л. В. Гармашова. // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. – № 1. – С. 58-63.

136. Улигова Т. С. Эколого-биологические исследования естественных биогеоценозов в ареале черноземов обыкновенных карбонатных остаточно-луговатых центрального Кавказа (Кабардино-Балкария) / Т. С. Улигова, Ф. В. Гедгафова, О. Н. Горобцова, И. Б. Рапопорт, Н. Л. Цепкова, Р. Х. Темботов //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т.17. – №4(2). – С. 412-418.

137. Фермент пероксидаза: Участие в защитном механизме растений / В. А. Андреева. – М.: Наука, 1988. – 128 с.

138. Физиология устойчивости растений: учеб. пособие к спецкурсу/ Л. А. Чудинова, Н. В. Орлова; Перм. ун-т. –Пермь, 2006. – 124с.

139. Фосфатмобилизующие бактерии в агроценозах Крыма / под ред. Л.А. Чайковской. - Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2018. – 156 с.

140. Фролов, А. В. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур / А. В. Фролов, А. И. Страшная // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук – Исследования по теории климата Земли // М.: Триада ЛТД, 2011. – С. 22-31.

141. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев, Ин-т биологии Уфим. НЦ. – М.: Наука, 2005. – 252 с.

142. Хазиев, Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах / Ф. Х. Хазиев. // Вестник академии наук РБ. – 2015. – Т. 20. – № 2 (78). – С. 14-24.

143. Хазиев, Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв /Ф. Х. Хазиев // Экобиотех. – 2018. – Том 1. – № 2. – С. 80-92. DOI: 10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92

144. Хайрулина, Т. П. Антиоксидантная система защиты в листьях G.max и G.soja при водном стрессе / Т. П. Хайрулина, П. В. Тихончук, Е. А. Семенова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 12 (74). – С. 30-33.

145. Хежева, Ф. В. Оценка ферментативной активности черноземов естественных биоценозов степной зоны и лесостепного пояса центрального Кавказа / Ф. В. Хежева, Т. С. Улигова, Р. Х. Темботов. // Известия Самарского

научного центра Российской академии наук. –2010. –Т. 12. – №1. – Вып.4. – С. 1075-1078.

146. Храмченкова, О. М. Физиология растений. Экология водного обмена: практ. рук-во по теме УСР / О. М. Храмченкова. – М-во образования РБ, Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Чернигов: Десна Полиграф, 2016. – 40 с.

147. Черемисин, А. И. Применение биопрепаратов комплексного действия и биоудобрений в оригинальном семеноводстве картофеля /А. И. Черемисин, В. Н. Кумпан. // Вестник Омского ГАУ. Сельскохозяйственные науки. – 2017. – № 1 (25). – С. 28-34.

148. Чернов, Т. И. Управление почвенными микробными сообществами: возможности и перспективы (обзор) / Т. И. Чернов, М. В. Семенов // Почвоведение. – 2021. – № 12. – С. 1506-1522. – DOI 10.31857/S0032180X21120029.

149. Чернова, Н. М. Общая экология / Н. М. Чернова, А. М. Былова. – М.: Дрофа, 2004. – 416 с.

150. Чернышенко, О. В. Интенсивность транспирации листьев у некоторых видов рода *Paeonia* L. как один из возможных показателей их адаптации к условиям сред / О. В. Чернышенко, О. А. Рудая, С. В. Ефимов, Ю. Н. Кирис. // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2017. – Т. 21. – № 3. – С. 78-86.

151. Чирак, Е. Л. Таксономическая структура микробных сообществ в почвах различных типов по данным высокопроизводительного секвенирования библиотек гена 16S-rРНК / Е. Л. Чирак, Е. В. Першина, А. С. Дольник, О. В. Кутовая, Е. С. Василенко, Б. М. Когут, Я. В. Мерзлякова, Е. Е. Андронов. // Сельскохозяйственная биология. – 2013. – № 3. – С. 100-109.

152. Шашукова, А. В. Участие пролина в регуляции уровня полиаминов и функционирования антиоксидантных ферментов у растений *Salvia officinalis* L. при действии УФ-В облучения: автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / А. В. Шашукова ; Ин-т физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. - М., 2009. - 26 с.

153. Шихалеева, Г. Н. Модифікована методика визначення проліну в рослинних об'єктах / Г. Н. Шихалеева, А. К. Будняк, И. И. Шихалеев, О. Л. Иващенко // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: біологія. – 2014. – Вип. 21, №112. – С. 168-172.
154. Штерншис, М. В. Тенденции развития биотехнологии микробных средств защиты растений в России / М. В. Штерншис. // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 2 (18). – С. 92-100.
155. Щур, А. В. Влияние различных уровней агроэкологических нагрузок на биохимические характеристики почвы /А. В. Щур, А. В. Виноградов, В. П. Валько // Юг России: экология, развитие. –2016. –Т. 11. –№ 4. – С. 139-148.
156. Экологическая оценка применения технологии No-Till в Ростовской области: монография / К. Ш. Казеев, Г. В. Мокриков, Ю. В. Акименко, М. А. Мясникова, С. И. Колесников; отв. ред. К. Ш. Казеев ; Юж. федер. ун-т. - Ростов н/Д ; Таганрог : Изд-во Южного федерального ун-та, 2018. - 332 с.
157. Эффективность применения биопрепарата экстрасол / В. К. Чеботарь, А. А. Завалин, Е. И. Кипрушкина – М: Издательство ВНИИА, 2007. – 216 с.
158. Якушев, А. В. Зависимость активности полифенолпероксидаз и полифенолоксидаз в современных и погребенных почвах от температуры / А. В. Якушев, И. Н. Кузнецова, Е. В. Благодатская, С. А. Благодатский. // Почвоведение. – 2014. – № 5. – С. 590-596.
159. Afonin, A. M. A high coverage reference transcriptome assembly of pea (*Pisum sativum* L.) mycorrhizal roots /A. M. Afonin, I. V. Leppyanen, O. A. Kulaeva, O. Y. Shtark, I. A. Tikhonovich, E. A. Dolgikh, V. A. Zhukov. // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. – 2020. – Vol. 24. – No. 4. – P. 331-339.
160. Afshar, R. K. Impact of conservation tillage and nitrogen on sugarbeet yield and quality / R. K.Afshar, A. Nilahyane, Che. Chen, H. He, St. W. Bart, W. M. Iversen. // Soil and Tillage Research. – 2019. – Vol. 191. – P. 216-223. doi: 10.1016/j.still.2019.03.017

161. Albuquerque L., da Costa M.S. The Family *Gaiellaceae* / In: Rosenberg E., DeLong E.F., Lory S., Stackebrandt E., Thompson F. (eds) *The Prokaryotes* // Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. – P. 357-360. 10.1007/978-3-642-30138-4_394.
162. Alvarez, C. E. Molecular adaptations of NADP-malic enzyme for its function in C-4 photosynthesis in grasses / C. E. Alvarez, A. Bovdilova, A. Hoppner, C. C. Wolff, M. Saigo, F. Trajtenberg, T. Zhang, A. Buschiazzi, L. Nagel-Steger, M. F. Drincovich, M. J. Lercher, V. G. Maurino // *Nature plants*. – 2019. – Vol. 5. – No. 7. – P. 755-765. DOI: 10.1038/s41477-019-0451-7
163. Aroca, R. Drought, Absciscic Acid and Transpiration Rate Effects on the Regulation of PIP Aquaporin Gene Expression and Abundance in *Phaseolus vulgaris* Plants / R. Aroca, A. Ferrante, P. Vernieri, J. Maarten, S. Chrispeel // *Ann Bot.* – 2006. – Vol. 98.–No. 6. – P. 1301-1310. doi: 10.1093/aob/mcl219
164. Awada, L. The development and adoption of conservation tillage systems on the Canadian Prairies / L. Awada, C. W. Lindwall, B. Sonntag // *International Soil and Water Conservation Research*. – 2014. – Vol. 2. – No. 1. – P. 47-65.
165. Awika, J. M. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health / J. M. Awika, L. W. Rooney // *Phytochemistry*. – 2004. – Vol. 65. – No. 9. – P.1199-221. doi: 10.1016/j.phytochem.2004.04.001.
166. Azam, F. Mapping QTL for chlorophyll fluorescence kinetics parameters at seedling stage as indicators of heat tolerance in wheat /F. Azam, X. Chang, R. Jing // *Euphytica*. – 2015. – Vol. 202. – P. 245-258.
167. Backer, R. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture /R. Backer, J. S. Rokem, G. Ilangumaran, J. Lamont, D. Praslickova, E. Ricci, S. Subramanian, D. L. Smith. // *Frontiers in Plant Science*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1473. doi: 10.3389/fpls.2018.01473.
168. Bates, S. T. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil / S. T. Bates, D. Berg-Lyons, J. G. Caporaso, W. A. Walters, R. Knight, N. Fierer // *ISME J.* – 2010. – Vol. 5. – P. 908-917.

169. Berendsen, R. L. The rhizosphere microbiome and plant health /R. L. Berendsen, M. J. Pieterse Corne', A. H. M. Bakker Peter // Trends in Plant Science. – 2012. – Vol. 17. – No. 8. – P. 478-486. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.04.001.
170. Bhattacharyya, P. N. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture /P. N. Bhattacharyya, D. K. Jha. // J. Microbiol Biotechnol. – 2012. – Vol. 28. – P.1327-1350.
171. Blankenship, R. E. Molecular Mechanisms of Photosynthesis. Blackwell Science, 2002. –321 p.
172. Borrell, A. K. Drought adaptation of stay-green in sorghum associated with canopy development, leaf anatomy, root growth and water uptake /A. K. Borrell, J. E. Mullet, B. George-Jaeggli, E. J. van Oosterom, G. L. Hammer, P. E. Klein, D. R. Jordan. // J. Exp Bot.– 2014. – Vol. 65. – No. 21. – P. 6251-6263. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru232>
173. Büchi, L. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long-term experiment in Switzerland / L. Büchi, M. Wendling, C. Amossé, B. Jeangros, S. Sinaj, R. Charles. // Soil and Tillage Research. — 2017. — Vol. 174. — P. 120-129.
174. Bulgarelli, D. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants / D. Bulgarelli, K. Schlaeppli, S. Spaepen, E. Ver Loren Van Themaat, P. Schulze-Lefert // Annual Review of Plant Biology. — 2013. — Vol. 64. — P. 807-838. — DOI: 10.1146/annurev-arplant-050312-120106.
175. Birhanu, M. W. Arbuscular Mycorrhizal (AM) Fungi Symbiosis in Sustainable Production of Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Under Drought Stress: An Emerging Biofertilizer in Dryland Areas / M. W. Birhanu, Z. T. Negussie // Advances in Agriculture. — 2024. — DOI: 10.1155/2024/8814543.
176. Campos A. Response of soil inorganic nitrogen to land use and topographic position in the Cofre de Perote Vulcano (Mexico) // Environ Manage. – 2010.– Vol. 46. – P. 213-224. doi: 10.1007/s00267-010-9517-z

177. Caporaso, J. G. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data / J. G. Caporaso, J. Kuczynski, J. Stombaugh [et al.]. // *Nature methods*. – 2010. – Vol. 7. – No. 5. – 335 p.

178. Chandra, D. Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions / D. Chandra, R. Srivastava, B. R. Glick, A. K. Sharma // *Pedosphere*. – 2018. – Vol. 28. – No 2. – P. 227-240.

179. Chaturvedi, P. Editorial: Sorghum and Pearl Millet as Climate Resilient Crops for Food and Nutrition Security. / P. Chaturvedi, M. Govindaraj, V. Govindan, W. Weckwerth // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 851970. DOI: 10.3389/fpls.2022.851970.

180. Chen, Y. Current Studies of the Effects of Drought Stress on Root Exudates and Rhizosphere Microbiomes of Crop Plant Species / Y. Chen, Z. Yao, Y. Sun, E. Wang, Tian C., Sun Y., Liu J., Sun C., Tian L// *International Journal of Molecular Sciences*. — 2022. — Vol. 23. – No 4. — Art. 2374. — DOI: 10.3390/ijms23042374.

181. Chen, D. Effects of long-term discharge of acid mine drainage from abandoned coalmines on soil microorganisms: microbial community structure, interaction patterns, and metabolic functions /D. Chen, Q.Y. Feng, H.Q. Liang. // *Environmental science and pollution research*. – 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-14566-2

182. Chen Z. Assessment of the homology of the aquaporin in representatives of symbiotic mycorrhizal fungi / Z. Chen // *Journal of Bioinformatics and Genomics*. — 2025. — Vol. 29. — №3.

183. Chernov, T. I. Profile Analysis of Microbiomes in Soils of Solonetz Complex in the Caspian Lowland / T. I. Chernov, M. P. Lebedeva, A. K. Tkhakakhova, O. V. Kutovaya // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – Vol. 50. – No. 1. – P. 64-69.

184. Chitara, M. K. Improving crop performance under heat stress using thermo tolerant agriculturally important microorganisms / M. K. Chitara, C. Keswani, K. Bisen,

V. Singh, S. P. Singh, B. K. Sarma, H. B. Singh // *Advances in PGPR Research*. – 2017. P. 296-305.

185. Chojnacka K. Innovative bio-products for agriculture /K. Chojnacka // *Open Chemistry*. – 2015. – Vol.13. – P. 932-937. DOI: 10.1515/chem-2015-0111

186. Choudhary, M. Soil bacterial diversity under conservation agriculture-based cereal systems in Indo-Gangetic Plains / M. Choudhary, P. C. Sharma, H. S. Jat, A. Dash, B. Rajashekar, A. J. McDonald, M. L. Jat // *3 Biotech*. – 2018. – Vol. 8. – No. 7. – P. 304. DOI: 10.1007/s13205-018-1317-9

187. Chun S. C. Proline Accumulation Influenced by Osmotic Stress in Arbuscular Mycorrhizal Symbiotic Plants. / S. C. Chun, M. Paramasivan, M. Chandrasekaran. // *Front. Microbiol.* – 2018. – Vol. 9. – P. 2525. doi: 10.3389/fmicb.2018.02525

188. Condrón, L. The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter / L. Condrón, C. Stark, M. O’Callaghan, P. Clinton, Z. Huang // *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. Springer Science+Business Media B.V. – 2010. – P. 81-117.

189. Constancias, F. Contrasting spatial patterns and ecological attributes of soil bacterial and archaeal taxa across a landscape / F. Constancias, N. P. A. Saby, S. Terrat, S. Dequiedt, W. Horrigue, V. Nowak, J. P. Guillemin, L. Biju Duval¹, C. N. Prevost-Bour, L. Ranjard. // *Microbiology Open*. – 2015. – Vol. 4. – No. 3. – P. 518-531.

190. Cortivo, D. C. Increased root growth and nitrogen accumulation in common wheat following PGPR inoculation: Assessment of plant-microbe interactions by ESEM /D. C. Cortivo, G. Barion, G. Visioli, M. Mattarozzi, G. Mosca, T. Vamerali. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2017. – Vol. 247. – P. 396-408. doi: 10.1016/j.agee.2017.07.006

191. Craufurd, P. Q. Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). 1. Panicle development and leaf appearance /P. Q. Craufurd, D. J. Flower, J. M. Peacock // *Exp Agri*. – 1993. – Vol. 29. – No. 1. – P. 61-76.

192. Dang Yash, P. No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: An Overview / P. Dang Yash, L. Page Kathryn, C. Dalal Ram, W. Menzies Neal // No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture, Challenges and Opportunities. – 2020. – P.3-20. DOI: 10.1007/978-3-030-46409-7_1

193. de Cárcer P. S. Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties /P. S. de Cárcer, S. Sokrat, S. Mathieu, F. Dario, J. Bernard. // Soil and Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – P. 209-219. doi: 10.1016/j.still.2019.01.012

194. Denef, K. Influence of dry–wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics / K. Denef, J. Six, H. Bossuyt, S. D. Frey, E. T. Elliott, R. Merckx // Soil Biol Biochem. – 2001. – Vol. 33. – P. 1599-1611. <https://doi.org/10.1007/s11103-020-01074-z>

195. Dick R. P. Soil Enzyme Activities as Indicators of Soil Quality // Defining Soil Quality for a Sustainable Environment / J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, B. A. Stewart (eds.). – Madison, WI: SSSA, 1994. – Ch. 7. – 18 p. – (SSSA Special Publication, 35). – DOI: 10.2136/sssaspecpub35.c7.

196. Dick, W. A. Continuous application of notillage to Ohio soils / W. A. Dick, E. L. McCoy, W. M. Edwards, R. Lal // Agron. J. – 1991. – V. 83. – P. 65-73. DOI: 10.2134/agronj1991.00021962008300010017x

197. Dicko, M. H. Evaluation of the effect of germination on phenolic compounds and antioxidant activities in sorghum varieties / M. H. Dicko, H. Gruppen, A. S. Traore, W. J. H. Van Berkel, A. G. J. Voragen. // J Agric Food Chem. – 2005. – Vol. 53. –No 7. – P. 2581-2588. <https://doi.org/10.1021/jf0501847>

198. Du S. Divergent Co-occurrence Patterns and Assembly Processes Structure the Abundant and Rare Bacterial Communities in a Salt Marsh Ecosystem / S. Du, F. Dini-Andreote, N. Zhang, C. Liang, Z. Yao, H. Zhang, D. Zhang // Applied and Environmental Microbiology. – 2020. – Vol. 86. – No 13. – e00322-20. doi: 10.1128/AEM.00322-20.

199. Dugas, D.V. Functional annotation of the transcriptome of *Sorghum bicolor* in response to osmotic stress and abscisic acid / D.V. Dugas, M. K. Monaco, A. Olson, R. R. Klein, S. Kumari, D. Ware, P. E. Klein // *BMC Genomics*. – 2011. – Vol. 12. – No. 514. – 21 p. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-514>
200. Ezirim, Ch. Y. Comparative Activities of Soil Enzymes from Polluted Sites in Egbema, Imo State, Nigeria /Ch. Y. Ezirim, P. C. Chikezie, K. M. Iheanacho, N. R. Nwachukwu // *Journal of Pollution Effects & Control*. – 2017. – Vol. 5. – No. 2. doi: 10.4172/2375-4397.1000185
201. Favaz M.N. Reveling the Ecological Role of Gemmatimonadetes Through Cultivation and Molecular Analysis of Agricultural Soils: master's thesis, University of Tennessee. – 2013. – P. 113. [Electronic resource]. Access point: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1652.
202. Feng, G. Metagenomic analysis of microbial community and function involved in cd-contaminated soil / G. Feng, T. Xie, X. Wang, J. Bai, L. Tang, H. Zhao, W. Wei, M. Wang, Y. Zhao // *BMC Microbiology*. – 2018. – Vol. 18 – No. 1. – P. 1-13. DOI: [org/10.1186/s12866-018-1152-5](https://doi.org/10.1186/s12866-018-1152-5)
203. Fierer, N. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes / N. Fierer, J. W. Leff, B. J. Adams, U. N. Nielsen, S. T. Bates, C. L. Lauber, S. Owens, J. A. Gilbert, D. H. Wall, J. G. Caporaso // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 109. – No. 52. –P. 21390-21395. DOI: [org/10.1073/pnas.1215210110](https://doi.org/10.1073/pnas.1215210110)
204. Fiorini, A. Effects of no-till on root architecture and root-soil interactions in a three-year crop rotation / A. Fiorini, R. Boselli, S. Amaducci / *Euroropean journal of agronomy*. – 2018. – № 9. – P. 156-166.
205. Food and Agricultural Organization of the United Nations (2001). FAOSTAT Agriculture Data. – Rome : FAO, 2001. – URL: <http://apps.fao.org>
206. George-Jaeggli, B. Bigger is not always better: reducing leaf area helps stay-green sorghum use soil water more slowly /B. George-Jaeggli, M. Y. Mortlock, A.

K. Borrell // Environ Exp Bot. – 2017. – Vol. 138. – P. 119-129.
doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.03.002

207. Grüning B. Bioconda: Sustainable and Comprehensive Software Distribution for the Life Sciences / B. Grüning, R. Dale, A. Sjödin, B. A. Chapman, J. Rowe, C. H. Tomkins-Tinch, R. Valieris, J. Köster // Nature Methods. – 2018. – Vol. 15. – P. 475-476.

208. Hafez, M. The biological correction of agro-photosynthesis of soil plant productivity / M. Hafez, M. Rashad, A. I. Popov. // Journal of Plant Nutrition. – 2020. Vol. 43. – No. 19. – P. 2929-2980. DOI: 10.1080/01904167.2020.1799008

209. Hafeza, E. M. Response of barley quality traits, yield and antioxidant enzymes to water-stress and chemical inducers / E. M. Hafeza, M. F. Seleiman. // International Journal of Plant Production. – 2017. – Vol. 11. – No. 4. – P. 477-490.

210. Haghighi, B. J. The role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) in sustainable Agriculture /B. J. Haghighi, O. Alizadeh, A. H. Firoozabadi. // Advances in Environmental Biology. – 2011. – Vol. 5. – No.10. – P. 3079-3083.

211. Hammer G. L. Crop design for specific adaptation in variable dryland production environments / G. L. Hammer, G. McLean, S. Chapman, B. Zheng, A. Doherty, M. T. Harrison, E. van Oosterom, D. Jordan // Crop and Pasture Science. – 2014. –Vol. 65. – P. 614-626.

212. Hammer, G. L. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops /G. L. Hammer, E. van Oosterom, G. McLean, S. Chapman, I. Broad, P. Harland, R. Muchow // J. Exp Bot. – 2010. – Vol. 61. – P. 2185-2202.

213. Hammer, G. L. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments. I. Development and testing of a simulation model /G. L. Hammer, R. C. Muchow // Field Crops Res. – 1994. – Vol. 36. – P.221-234.

214. **Hammer Ø.** PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis / Ø. Hammer, D. A. T. Harper, P. D. Ryan // Palaeontologia Electronica. – 2001. – Vol. 4, № 1. – 9 p.

215. Hanada S. The Phylum Gemmatimonadetes / S. Hanada, Y. Sekiguchi // The Prokaryotes / E. Rosenberg, E. F. DeLong, S. Lory, E. Stackebrandt, F. Thompson (eds.). – Berlin: Springer, 2014. – P. 677–681. – DOI: 10.1007/978-3-642-38954-2_164.

216. Heidari, M. Effects of water stress and inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on antioxidant status and photosynthetic pigments in basil (*Ocimum basilicum* L.) /M. Heidari, A. Golpayegani. // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2012. – Vol. 11. – No. 1. – P. 57-61. doi: 10.1016/j.jssas.2011.09.001

217. Hou, P. Antioxidant Enzymatic Activity and Osmotic Adjustment as Components of the Drought Tolerance Mechanism in *Carex duriuscula* /P. Hou, F. Wang, B. Luo, A. Li, C. Wang, L. Shabala, H. A. I. Ahmed, S. Deng, H. Zhang, P. Song, Y. H. Zhang, S. Shabala, L. P. Chen. // Plants 2021. – Vol. 10. – 436. <https://doi.org/10.3390/plants10030436>

218. Hou, R. Effect of experimental warming on nitrogen uptake by winter wheat under conventional tillage versus no-till systems / R. Hou, X. Xu, Z. Ouyang. // Soil and Tillage Research. – 2018. – № 8. – P. 116-125.

219. Huang, M. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat–maize double cropping system /M. Huang, T. Liang, L. Wang, Ch. Zhou // CATENA. – 2015. – Vol.128. – P. 195-202. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.010

220. Ivanova, A. A. Distinct diversity patterns of Planctomycetes associated with the freshwater macrophyte *Nuphar lutea* (L.) Smith /A. A. Ivanova, D. A. Philippov, I. S. Kulichevskaya, S. N. Dedysh // Antonie van Leeuwenhoek. – 2018. – Vol. 111. – No 6. – P. 811-823.

221. Jacinthe, P. A. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment / P. A. Jacinthe, R. Lal, J. M. Kimble // Soil and Tillage Research. – 2002. –V. 67. – P. 147-157.

222. Jat, R. A. Conservation Agriculture in the Semi-Arid Tropics: Prospects and Problems / R. A. Jat, S. P. Wani, K. L. Sahrawat // *Advances in Agronomy*. – 2012. – Vol.117. – P. 191-273. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394278-4.00004-0>

223. Jiao, S. Biogeography and ecological diversity patterns of rare and abundant bacteria in oil-contaminated soils /S. Jiao, W. Chen, G. Wei. // *Molecular Ecology*. – 2017. – Vol. 26. – No 19. – P. 5305-5317. doi: 10.1111/mec.14218

224. Julca I., Alaminos M., González-López J., Manzanera M. Xeroprotectants for the stabilization of biomaterials. Review / I. Julca, M. Alaminos, J. González-López, M. Manzanera. // *Biotechnology Advances*. – 2012. – V. 30. – No. 6. – P. 1641-1654. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.07.002

225. Kamali, Sh. Effects of Nitroxin and arbuscular mycorrhizal fungi on the agro-physiological traits and grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under drought stress conditions / Sh. Kamali, A. Mehraban // *PLoS One*. –2020. – Vol. 28. – No.12. –e0243824 p. doi: 10.1371/journal.pone.0243824.

226. Kassam, A. Global spread of conservation agriculture / A. Kassam, T. Friedrich, R. Derpsch // *International Journal of Environmental Studies*. – 2019. – Vol.76. – No.1. – P. 29-51. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>

227. Kaushal, N. Proline induces heat tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) plants by protecting vital enzymes of carbon and antioxidative metabolism /N. Kaushal, K. Gupta, K. Bhandhari, S. Kumar, P. Thakur, H. Nayyar. // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. – 2011. – Vol. 17. – No. 3. – P. 203-213.

228. Kielak, A. M. The ecology of Acidobacteria: moving beyond genes and genomes / A. M. Kielak, C. C. Barreto, G. A. owalchuk, J. A. Van Veen, E. E. Kuramae. // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – Vol. 7. – 744 p. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00744.

229. Kichko, A. A. The microbiome of buried soils demonstrates significant shifts in taxonomic structure and a general trend towards mineral horizons // A. A.

Kichko, N. K. Sergaliev, E. A. Ivanova, T. I. Chernov, A. K. Kimeklis, O. V. Orlova, M. D. Kalmenov, K. M. Akhmedenov, A. G. Pinaev, N. A. Provorov, N. A.

Shashkov, E. E. Andronov. // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, No 6. – Art. e17208. doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e17208.

230. Kumar, P. G. In vitro Screening for Abiotic Stress Tolerance in Potent Biocontrol and Plant Growth Promoting Strains of *Pseudomonas* and *Bacillus spp.* / P. G. Kumar, S. K. Mir Hassan Ahmed, S. Desai, A. E. Leo Daniel, R. Abdul // International Journal of Bacteriology. – 2014. – Vol. 2014. – 6 p. doi: 10.1155/2014/195946

231. Lareen, A. Plant root-microbe communication in shaping root microbiomes/ A. Lareen, F. Burton, P. Schäfer. // Plant Molecular Biology. – 2016. – Vol. 90. – No. 6. –P. 575-87. doi: 10.1007/s11103-015-0417-8.

232. Larsbrink, J. Bacteroidetes bacteria in the soil: Glycan acquisition, enzyme secretion, and gliding motility / J. Larsbrink, L. S. McKee // Advances in Applied Microbiology. – 2019. – Vol. 110. DOI: 10.1016/bs.aambs.2019.11.001

233. Lee, S. H. Anticancer Activity of a Novel High Phenolic Sorghum Bran in Human Colon Cancer Cells / S. H. Lee, J. Lee, Th. Herald, S. Cox, L. Noronha, R. Perumal, H.-S. Lee, D. Smolensky // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. – 2020. – Art. 2890536. DOI: 10.1155/2020/2890536

234. Li, Y. Amelioration of drought effects in wheat and cucumber by the combined application of super absorbent polymer and potential biofertilizer /Y. Li, H. Shi, H. Zhang, S. Chen // Peer J. – 2019. – Vol.7. – P. e6073 <https://doi.org/10.7717/peerj.6073>

235. Lynch, M. D. J. Ecology and exploration of the rare biosphere / M. D. J. Lynch, J. D. Neufeld // Nature Reviews Microbiology. – 2015. – Vol. 13. – No. 4. – P. 217-229. doi: 10.1038/nrmicro3400

236. Manzanera, M. Dealing with water stress and microbial preservation / Environ Microbiol. – 2020. –Vol. 00. – 9 p. DOI: 10.1111/1462-2920.15096

237. Mathew, R. P. Impact of no-tillage and conventional tillage systems on soil microbial communities / R. P. Mathew, Y. Feng, L. Githinji, R. Ankumah, K. S. Balkcom // Applied and Environmental Soil Science. – 2012. – Vol. 2012. – p. 10. DOI: [org/10.1155/2012/548620](https://doi.org/10.1155/2012/548620)

238. Meena, M. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions /M. Meena, K. Divyanshu, S. Kumar, P. Swapnil, A. Zehra, V. Shukla, M. Yadav, R.S. Upadhyay // *Helion*. – 2019. – Vol. 5. – No. 12. – P. e02952 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>

239. Melnichuk, T. N. The taxonomic structure of southern chernozem at the genus level influenced by microbial preparations and farming systems /T. N. Melnichuk, S. F. Abdurashitov, E. E. Andronov, E. R. Abdurashitova, A. Yu. Egovtseva, A. A. Gongalo, E. N. Turin, V. S. Pashtetsky. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming. – 2020. – P. 012101. DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012101

240. Molla, M. R. Exogenous proline and betaine-induced upregulation of glutathione transferase and glyoxalase I in lentil (*Lens culinaris*) under drought stress /M. R. Molla, M. R. Ali, M. Hasanuzzaman, M. H. Al-Mamun, A. Ahmed, M. A. N. Nazim-Ud-Dowla, M. M. Rohman // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. – 2014. – Vol. 42. – P. 73-80.

241. Moretti, L. G. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield / L. G. Moretti, C. A. C. Crusciol, E. E. Kuramae, J. W. Bossolani, A. Moreira, N. R. Costa, C. J. Alves, I. M. Pascoaloto, A. B. L. Rondina, M. Hungria. // *Agronomy journal*. – 2019. – Vol. 112. – No. 1. – P. 418-428. <https://doi.org/10.1002/agj2.20010>

242. Muratova, A. Yu. Rhizospheric microbiomes of *Sorghum bicolor* grown on soils with anthropogenic polyelement anomalies /A. Yu. Muratova, S. V. Gorelova, I. Yu. Sungurtseva, N. A. Zelenova. // *BIO Web Conf. PLAMIC 2020. II International Scientific Conference “Plants and Microbes: The Future of Biotechnology”*. – 2020. – Vol. 23. – P.03008. 1-7. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202303008>

243. Nichols, V. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review /V. Nichols, N. Verhulst, R. Cox, B. Govaerts. // *Field Crops Research*. – 2015. – Vol. 183. – P. 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>

244. Nunes, M. R. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield /M. R. Nunes, H. M. van Es, R. Schindelbeck, A. J. Ristow, M. Ryan // *Geoderma*. – 2018. – Vol. 328. – P. 30-43. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.031

245. Obour, A. K. Strategic Tillage Effects on Crop Yields, Soil Properties, and Weeds in Dryland No-Tillage Systems. / A. K. Obour, J. D. Holman; L. M. Simon, A. J. Schlegel, *Strategic // Agronomy*. – 2021. – Vol. 11. – p. 662. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040662>

246. Page K. L. Changes in soil water storage with no-tillage and crop residue retention on a Vertisol: Impact on productivity and profitability over a 50-year period /K. L. Page, Ya. P. Dang, R. C. Dalal, S. Reeves, G. Thomas, W. Wang, J. P. Thompson // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 194. – P. 104319. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104319>

247. Page K. L. The Ability of Conservation Agriculture to Conserve Soil Organic Carbon and the Subsequent Impact on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties and Yield /K. L. Page, Y. P. Dang, R. C. Dalal. // *Front. Sustain. Food Syst.* – 2020. – Vol. 4. – No.31. – 17 p. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031>

248. Pajares, S. Environmental controls on soil microbial communities in a seasonally dry tropical forest / S. Pajares, J. Campo, B. J. M. Bohannan, J. D. Etchevers // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2018. – Vol. 84. – No. 17. – P. e00342-18. DOI: 10.1128/AEM.00342-18.

249. Patade, V. Y. Exogenous application of proline alleviates salt induced oxidative stress more efficiently than glycine betaine in sugarcane cultured cells / V. Y. Patade, V. H. Lokhande, P. Suprasanna // *Sugar Tech.*– 2014. – Vol. 16. – P. 22-29.

250. Pedrós-Alió, C. The rare bacterial biosphere / C. Pedrós-Alió // *Annual Review of Marine Science*. – 2012. – Vol. 4. – P. 449-466. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100948>.

251. Pittelkow, C. M. When does no-till yield more? A global meta-analysis /C. M. Pittelkow, B. A. Linquist, M. E. Lundy, X. Liang, K. J. van Groenigen, J. Lee, N.

van Gestel, J. Six, R. T. Venterea, C. van Kessel. // *Field Crops Research*. – 2015. – Vol. 183. – P. 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>

252. Prathap, M. Critical Review on Plant Growth Promoting Rhizobacteria /M. Prathap, K. A. Ranjitha // *Journal of Plant Pathology & Microbiology*. – 2015. – Vol. 6. – No. 4. – P. 1000266

253. Prosser J. I. Molecular and functional diversity in soil microorganisms /Plant and Soil. – 2002. – Vol. 244. – P. 9–17.

254. Rice, C.W. Soil nitrogen availability after long-term continuous no-tillage and conventional tillage corn production / C.W. Rice, M. S. Smith, R. L. Blevins // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* – 1986. – V. 50. – P. 1206-1210.

255. Rong-hua, L. Evaluation of Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters as Indicators of Drought Tolerance in Barley / L. Rong-hua, G. Pei-guo, M. Baum, S. Grando, S. Ceccarelli. // *Agricultural Sciences in China*. – 2006. –Vol. 5. – No. 10. – P. 751-757.

256. Rooney W. L. Sorghum improvement: Integrating traditional and new technology to produce improved genotypes / W. L. Rooney // *Advances in Agronomy*. – 2004. – Vol. 83. – P. 37-109.

257. Samuel, D. Proline inhibits aggregation during protein refolding / D. Samuel, T. K. Kumar, G. Ganesh, G. Jayaraman, P. W. Yang, M. M. Chang, V. D. Trivedi, S. L. Wang, K. C. Hwang, D. K. Chang, C. Yu. // *Protein Science*. – 2000. – V. 9. – P. 344-352.

258. Sayyed R. Z. Heavy metal resistant PGPR as a green solution to pesticide and heavy metal pollution / R. Z. Sayyed, S. S. Shaikh, P. R. Patel, M. S. Sonawane, M. S. Reddy // *Trends in PGPR Research for Sustainable Crop Productivity*. – India: Scientific Publishers, 2016. – P. 1–8.

259. Schlatter, D. C. The mycobiome of deep soil profiles in no-till dryland wheat /D. C. Schlatter, K. Kahl, B. Carlson. // *Phytopathology*. – 2018. – No. 10. – P. 77.

260. Schmidt, R. Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil / R. Schmidt, K. Gravuer, A. V. Bossange,

J. Mitchell, K. Scow. // Plos one. – 2018. – Vol. 13. – No. 2. – P. 1-19. DOI: org/10.1371/journal.pone.0192953

261. Schulz, S. The role of microorganisms at different stages of ecosystem development for soil formation // S. Schulz, R. Brankatschk, A. Dumig, I. Kogel-Knabner, M. Schlöter, J. Zeyer // Biogeosciences. – 2013. – V. 10. – P. 3983-3996.

262. Shade, A. Beyond the Venn diagram: The hunt for a core microbiome /A. Shade, J. Handelsman. Environmental microbiology. – 2012. – Vol. 14. – No 1. – P. 4-12. 10.1111/j.1462-2920.2011.02585. x.

263. Sharifi, P. Effects of Drought Stress on Photosynthesis Factors in Wheat Genotypes during Anthesis / P. Sharifi, N. Mohammadkhani // Cereal Research Communications. – 2016. – Vol. 44. – No. 2. – P. 229-239. DOI: 10.1556/0806.43.2015.054

264. Sheteiwy, M. S. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium under drought stress /M. S. Sheteiwy, D. F. I. Ali, Y. C. Xiong, M. Brestic, M. Skalicky, Y. A. Hamoud, Z. Ulhassan, H. Shaghaleh, H. Abdelgawad, M. Farooq, A. Sharma, A. M. El-Sawah // BMC Plant Biology. – 2021. – Vol. 21. – No. 1. – P. 195. DOI: 10.1186/s12870-021-02949-z

265. Shukla, G. Soil Enzymology / G. Shukla, A. Varma // Soil Biology. – 2011. –Vol. 22.– P. 392. doi: 10.1007/978-3-642-14225-3

266. Smith J. L. Soil organic matter dynamics and crop residue management / J. L. Smith, R. I. Papendick, D. F. Bezdicek, J. M. Lynch // Soil Microbial Ecology / F. B. Metting, Jr. (ed.). – New York: Marcel Dekker, 1993. – P. 65–94.

267. Sofo, A. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses / A. Sofo, A. Scopa, M. Nuzzaci, A. Vitti // International Journal of Molecular Sciences – 2015. – No. 16. – P. 13561-13578. DOI: 10.3390/ijms160613561

268. Sokolowski, A.C. Tillage and no-till age effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina / A. C. Sokolowski, B. Prack McCormick, J. De Grazia, J. E. Wolski, H. A.

Rodríguez, E. P. Rodríguez-Frers, M. C. Gagey, S. P. Debelis, I. R. Paladino, M. B. Barrios. // *International Soil and Water Conservation Research*. – 2020. – Vol.8. – No.2. – P. 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.02.002>

269. Sorghum in the 21st Century: Food – Fodder – Feed – Fuel for a Rapidly Changing World (eBook) / V. A. Tonapi, H. S. Talwar, A. K. Are, B. V. Bhat, Ch. R. Reddy, T. J. Dalton (eds.). – Singapore: Springer, 2020. – 932 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8249-3>

270. Souza, L.H. Soil carbon and nitrogen stocks and physical properties under no-till and conventional tillage cotton-based systems in the Brazilian Cerrado / L. H. Souza, E. D. Matos, C. A. Magalhaes, É. R. de la Torre, F. M. Lamas, R. Lal / *Land degradation & development*. – 2018. – No. 10. – P. 3405-3412.

271. Thakur, R. P. Breeding for disease resistance in sorghum. “Proceedings of the International Conference on Genetic Improvement of Sorghum and Pearl Millet / R. P. Thakur, R. A. Frederiksen, D. S. Murty, B. V. S. Reddy, R. Bandyopadhyay, L. M. Giorda, G. N. Odvody, L. E. Claflin. // *INTSORMIL. Publ. 97-5*”. – 1997. – P. 303-315.

272. Thalooth, A. T. Comparative study on the effect of foliar application of zinc, potassium and magnesium on growth, yield and some chemical constituents of mungbean plants grown under water stress conditions / A. T. Thalooth, M. M. Tawfik, H. A. Magda Mohamed. // *World Journal of Agricultural Sciences*. – 2006. – V.2 (1). – P. 37-46.

273. Tian L. Soil peroxidase regulates organic matter decomposition through improving the accessibility of reducing sugars and amino acids / L. Tian, W. Shi. // *Biology and Fertility of Soils*. – 2014. – Vol. 50. – P. 785-794.

274. Tikhonovich, I. A. Microbiology is the basis of sustainable agriculture: an opinion / I. A. Tikhonovich, N. A. Provorov. // *Annals of Applied Biology*. – 2011. – Vol. 159. – No. 2. – P. 155-168.

275. Toptikov, V. A. Expression of antioxidant oxidoreductases and protein profile of seedling tissues of winter and spring forms of cereals under extreme temperature fluctuations / V. A. Toptikov, L. F. D'yachenko, V. N. Totskii. // *Cytology*

and genetics. – 2012. – Vol. 46. – No. 3. – P. 161-171. DOI: 10.3103/S0095452712030103

276. Triplett, G. B. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! / G. B. Triplett, Dick, A. Warren // *Agronomy Journal*. – 2008. – 100, Suppl. 3. - P. S-153-S-165. doi: 10.2134/agronj2007.0005c

277. Tshovrebov, V. S. Features of application of No-till technology on chernozems of the Central Ciscaucasia /V. S. Tshovrebov, V. I. Faizova, A. A. Novikov, V. Y. Lysenko, D. V. Kalugin. // II International Scientific Conference “Plants and Microbes: The Future of Biotechnology” (PLAMIC2020). BIO Web Conf. – 2020. – Vol. 23. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202302009>

278. Turner N. C. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems /Turner N. C. // *Journal of Experimental Botany*. - 2004. - Vol. 55, № 407. - P. 2413-2425.

279. van Oosterom, E. J. Functional dynamics of the nitrogen balance of sorghum. I. Nitrogen demand of vegetative plant parts /E. J. van Oosterom, A. K. Borrell, S. C. Chapman, I. J. Broad, G. L. Hammer. // *Field Crops Res.* – 2010. – Vol. 115. – P.19-28.

280. Veitch, N. C. Structural determinants of plant peroxidase function /N. C. Veitch / *Phytochemistry Reviews*. – 2004. – Vol. 3. – P. 3-18.

281. Venturi, V. Signaling in the rhizosphere / V. Venturi, C. Keel // *Trends in plant science*. – 2016. – V. 21. – No. 3. – P. 187-198.

282. Verhulst N. Conservation Agriculture, Improving Soil Quality for Sustainable Production Systems? / N. Verhulst, B. Govaerts, E. Verachtert, A. Castellanos-Navarrete, M. Mezzalama, P. Wall, J. Deckers, K. D. Sayre // *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality* / R. Lal, B. A. Stewart (eds.). - Boca Raton : CRC Press, 2010. - P. 137-208.

283. Vessey J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers / J. K. Vessey / *Plant and Soil*. – 2003. – Vol. 255. – P. 571-586.

284. Visser, S. Soil biological criteria as indicators of soil quality: soil microorganisms / S. Visser, D. Parkinson // *Am J Altern Agric.* – 1992. – Vol. 7. – P. 33-37.
285. Wang, F. Effect of Prescribed Fire on Soil Properties and N Transformation in Two Vegetation Types in South China / F. Wang, J. Li, B. Zou, X. Xu, Z. Li. // *Environmental Management.* – 2013. – Vol. 51. – p.1164-1173
286. West, T. O. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis / T. O. West, W. M. Post. // *Soil Science Society of America Journal.* – 2002. – Vol. 66. – P. 1930-1946.
287. Whish, J. Modelling the effects of row configuration on sorghum in North-Eastern Australia / J. Whish, G. Butler, M. Castor, S. Cawthray, I. Broad, P. Carberry, G. L. Hammer, G. McLean, R. Routley, S. Yeates // *Australian Journal of Agricultural Research.* – 2005. – Vol. 56. – P. 11-23.
288. Whitfield, M. B. Processing of materials derived from sweet sorghum for biobased products / M. B. Whitfield, M. S. Chinn, M. W. Veal // *Industrial Crops and Products.* – 2012. – Vol. 37. – No. 1. – P. 362-375. doi: 10.1016/j.indcrop.2011.12.011
289. Wittwer S. H. The shape of things to come / S. H. Wittwer // *The Biology of Crop Productivity* / P. S. Carlson (ed.). - New York : Academic Press, 1980. - P. 412-459.
290. Wojcik, R. Linkages between geochemistry and microbiology in a proglacial terrain in the High Arctic /R. Wojcik, J. Donhauser, B. Frey, S. Holm, A. Holland, A. M. Anesio, D. A. Pearce, L. Malard, D. Wagner, L. G. Benning. // *Annals of Glaciology.* – 2019. – P. 1-16. doi: 10.1017/aog.2019.1
291. Wolińska, A. The impact of agricultural soil usage on activity and abundance of ammonifying bacteria in selected soils from Poland /A. Wolińska, A. Szafranek-Nakonieczna, A. Banach, M. Błaszczuk, Z. Stępniewska // *Springer Plus.* – 2016. – Vol. 5. – P. 565. DOI 10.1186/s40064-016-2264-8
292. Yan E. R. Decline of soil nitrogen mineralization and nitrification during forest conversion of evergreen broad-leaved forest to plantations in the subtropical area

of Eastern China /E. R. Yan, X. H. Wang, J. J. Huang, G. Y. Li, W. Zhou. // Biogeochemistry. – 2008. – Vol. 89. – No. 2. – P. 239-251.

293. Yan, Z. Effects of proline on photosynthesis, root reactive oxygen species (ROS) metabolism in two melon cultivars (*Cucumis melo* L.) under NaCl stress /Z. Yan, S. Guo, S. Shu, J. Sun, T. Tezuka. // African Journal of Biotechnology. – 2011. – 10. P. 18381-18390

294. Yang, L. Sorghum 3-deoxyanthocyanins possess strong phase II enzyme inducer activity and cancer cell growth inhibition properties / L. Yang, J. D. Browning, J. M. Awika. // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2009. – Vol. 57. – P.1797-1804.

295. Zhang, Z. Understanding the molecular mechanism of anther development under abiotic stresses. Review / Z. Zhang, M. Hu, W. Xu, Y. Wang, K. Huang, C. Zhang, J. Wen. // Plant Molecular Biology. – 2020. – Vol. 105. – No. 1-2. – P. 1-10. doi: 10.1007/s11103-020-01074-z

296. Zhuang, J. Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits / J. Zhuang, Y. Wang, Y. Chi, L. Zhou, J. Chen, W. Zhou, J. Song, N. Zhao, J. Ding // PeerJ – Life environment. Plant biology. – 2020. – Vol. 8. – P. e10046. DOI 10.7717/peerj.10046

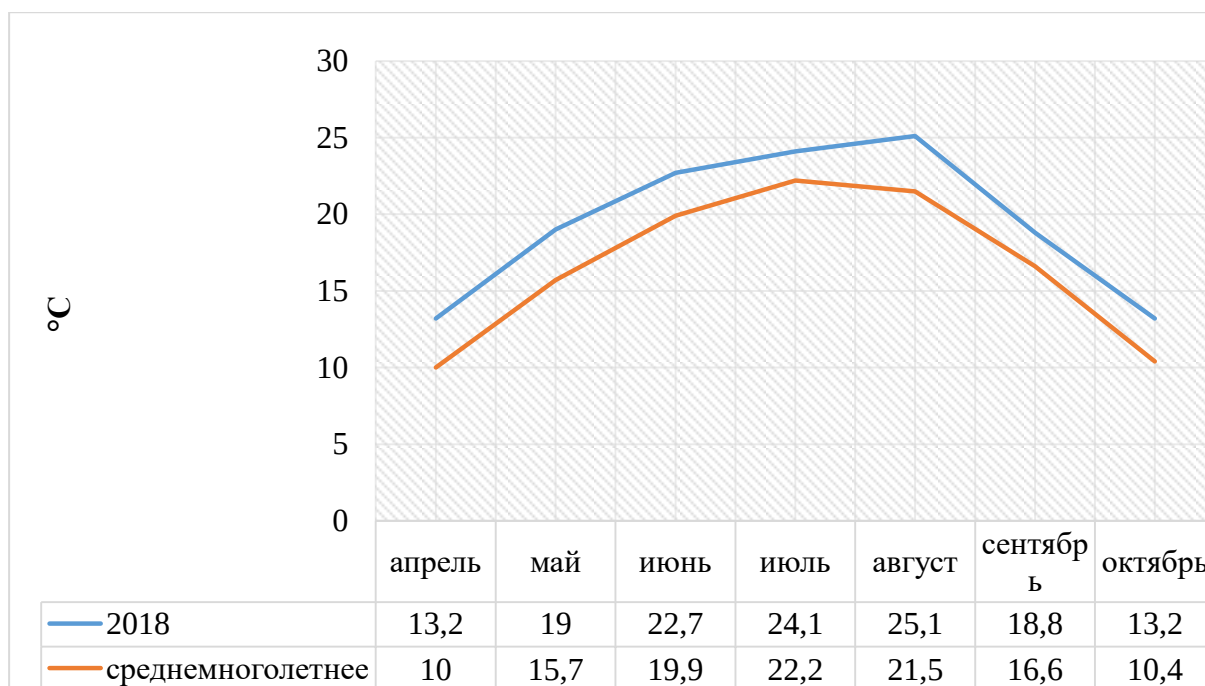
297. Zoz, T. Rubens FEY Peroxidase activity as an indicator of water deficit tolerance in soybean cultivars / T. Zoz, F. Steiner, V. F. Guimarães, D. D. Castagnara, C. C. Meinerz // Bioscience Journal. – 2013. – Vol. 29. – p. 1664-1671.

ПРИЛОЖЕНИЯ

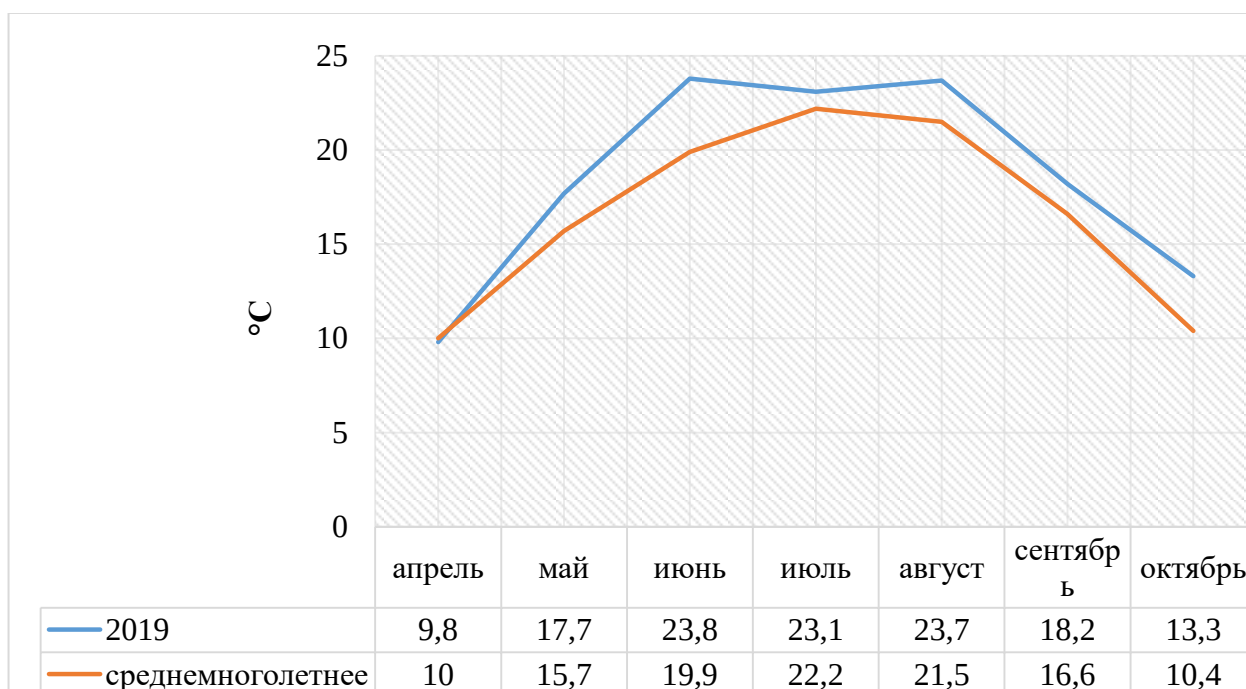
ПРИЛОЖЕНИЕ А



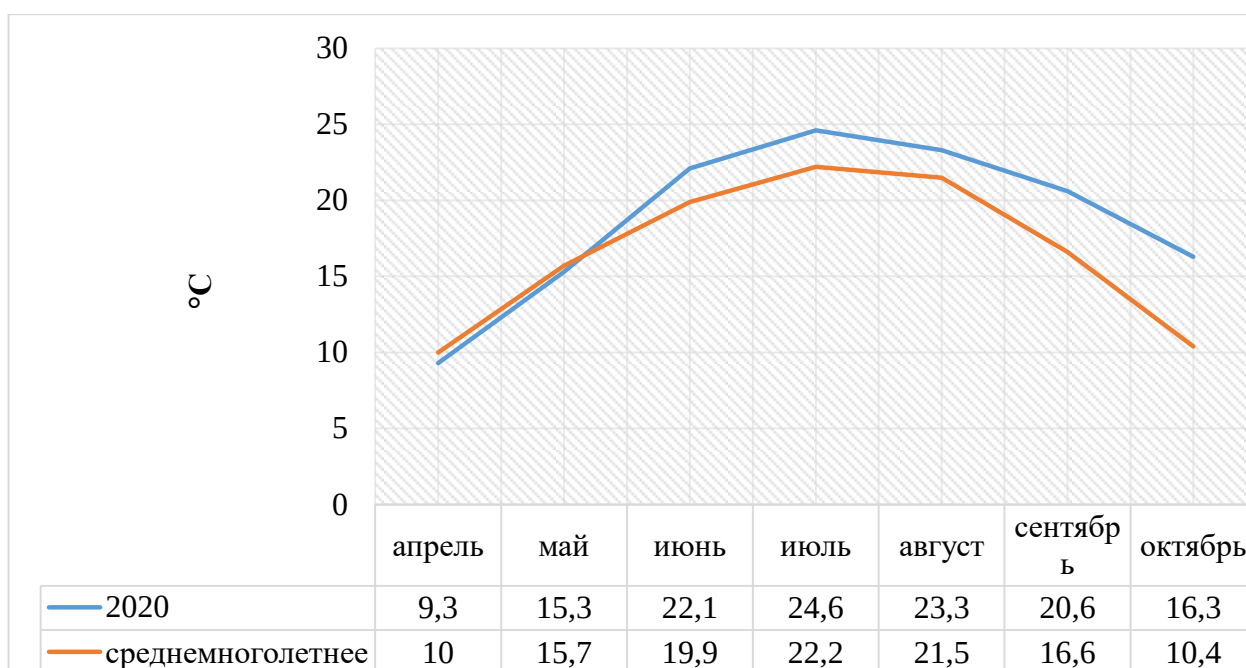
Приложение А1– Аттестат длительного опыта № 170.



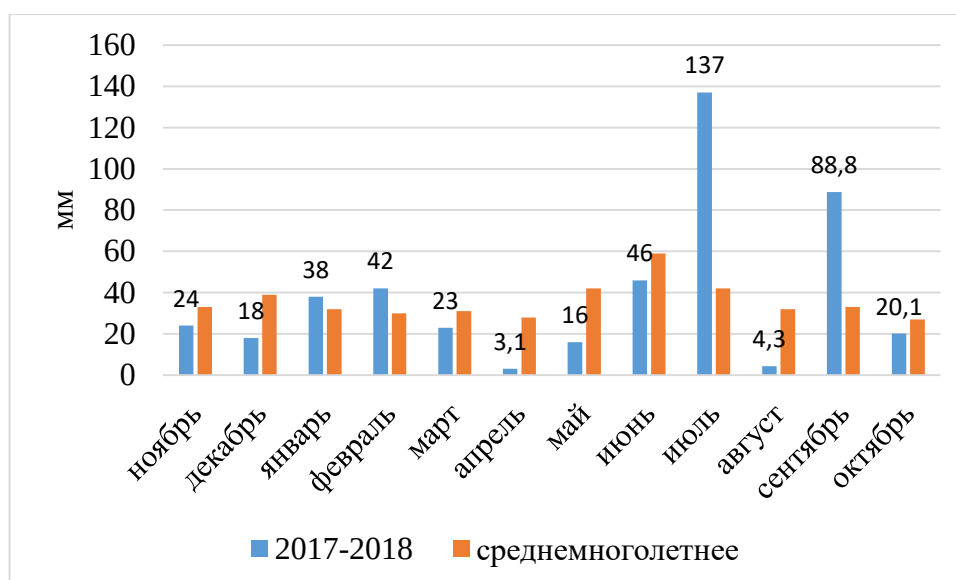
Приложение А2 – Среднемесячная температура воздуха за 2018 год проведения исследований в сравнении со среднемноголетними показателями



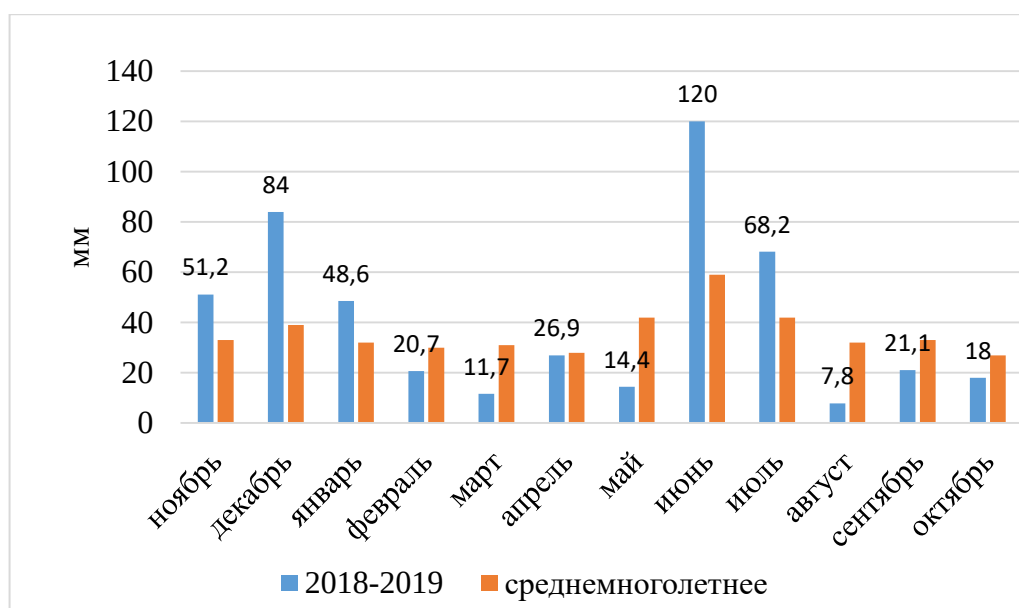
Приложение А3 – Среднемесячная температура воздуха за 2019 год проведения исследований в сравнении со среднемноголетними показателями



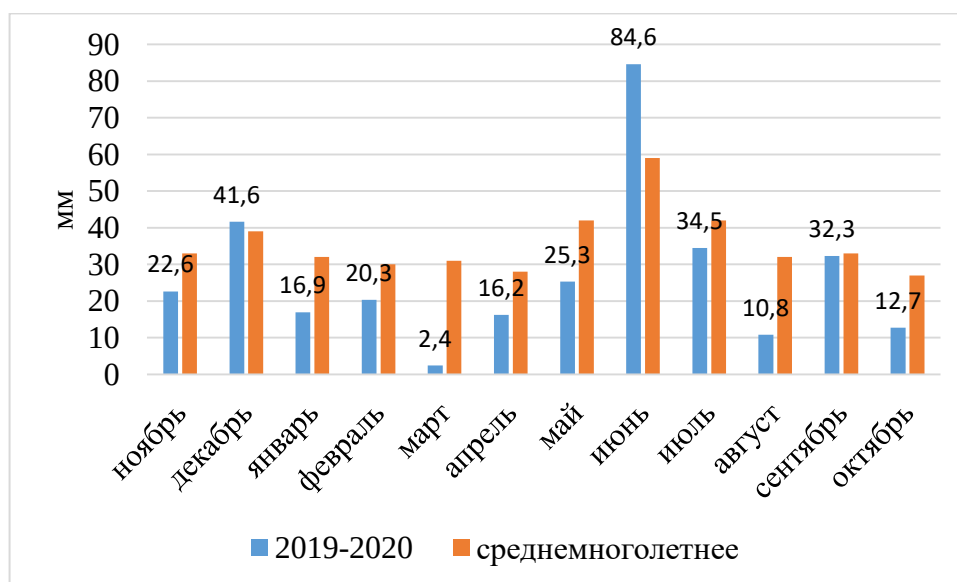
Приложение А4 – Среднемесячная температура воздуха за 2020 год проведения исследований в сравнении со среднеемноголетними показателями



Приложение А5 – Сумма атмосферных осадков помесечно за период 2017-2018 года проведения исследований в сравнении со среднеемноголетними показателями



Приложение А6 – Сумма атмосферных осадков ежемесячно за период 2018-2019 года проведения исследований в сравнении со среднемноголетними показателями



Приложение А7– Сумма атмосферных осадков ежемесячно за период 2019-2020 года проведения исследований в сравнении со среднемноголетними показателями

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Приложение Б1. Представленность микроорганизмов на уровне семейств в микробиоме в различных системах земледелия и целине (чернозем южный, 2018 г.)

Филы	Семейства	Доля представленности, %				
		Прямой посев	Прямой посев с КМ	Традиционная система	Традиционная система с КМ	Целина
1	2	3	4	5	6	7
	Unassigned	3,35±0,47	3,48±0,11	3,27±0,02	2,84±0,39	3,12±0,35
Ar- chaea	<i>Nitrososphaeraceae</i>	6,22±0,21	7,47±1,02	9,20±0,78	9,72±0,20	7,35±0,54
	<i>Archaea</i> менее 1%	0,0046	0,0014	0,0068	0,0155	0,0071
	<i>Bacteria</i> менее 1%	1,4502	1,4721	1,7669	1,5265	1,5271
Acidobacteria	NA_RB41	1,36±0,26	1,66±0,46	1,62±0,17	1,13±0,05	0,90±0,04
	NA_iii1-15	1,33±0,11	1,50±0,13	1,40±0,06	1,39±0,08	1,39±0,03
	NA_Solibacterales	1,12±0,10	1,20±0,14	1,70±0,12	1,28±0,00	1,11±0,06
	Ellin6075	1,00±0,07	1,08±0,06	1,21±0,11	1,05±0,08	0,72±0,02
	<i>Acidobacteria</i> менее 1%	1,6080	1,6730	1,3286	1,3254	1,2977
Actinobacteria	<i>Geodermatophilaceae</i>	1,81±0,72	1,35±0,52	2,49±0,43	3,34±0,34	5,40±0,14
	<i>Gaiellaceae</i>	3,13±0,06	2,81±0,00	4,40±0,06	4,82±0,42	5,01±0,16
	<i>Rubrobacteraceae</i>	3,07±0,28	3,24±0,40	4,13±0,16	4,02±0,09	3,50±0,18
	NA_Microccales	0,96±0,12	0,75±0,08	1,38±0,31	1,64±0,31	2,51±0,23
	<i>Micrococcaceae</i>	2,19±1,19	2,29±1,22	2,86±0,03	2,97±0,23	2,50±0,07
	NA_Solirubrobacterales	2,68±0,63	2,34±0,54	1,60±0,11	1,92±0,20	2,42±0,05
	<i>Nocardiodaceae</i>	2,92±0,14	2,44±0,15	2,15±0,13	2,05±0,08	2,30±0,11
	<i>Solirubrobacteraceae</i>	1,32±0,15	1,12±0,12	0,97±0,13	1,16±0,16	1,69±0,13
	<i>Micromonosporaceae</i>	2,03±0,29	1,99±0,38	1,23±0,07	1,18±0,10	1,28±0,06
	NA_Acidimicrobiales	0,80±0,06	0,73±0,05	0,76±0,05	0,85±0,07	1,00±0,05
	<i>Pseudonocardiaceae</i>	1,16±0,03	1,05±0,13	0,79±0,02	0,79±0,04	0,97±0,02
	<i>Actinobacteria</i> менее 1%	7,0034	6,1944	5,1183	5,6771	6,7810
Bacteroi- detes	<i>Chitinophagaceae</i>	5,88±0,08	6,78±0,32	6,65±0,55	4,92±0,73	3,77±0,35
	<i>Cytophagaceae</i>	2,73±0,29	2,93±0,44	2,90±0,15	2,87±0,37	2,09±0,15
	<i>Bacteroidetes</i> менее 1%	1,3402	1,3870	0,6835	0,4354	0,3862
Chloro- flexi	NA_Ellin6529	1,37±0,26	1,17±0,23	1,22±0,09	1,39±0,06	2,05±0,04
	<i>Chloroflexi</i> менее 1%	2,4540	2,4659	2,6572	2,8015	3,0815
Firmi- cutes	<i>Bacillaceae</i>	1,89±0,52	1,95±0,61	2,71±0,34	3,05±0,40	1,89±0,35
	<i>Firmicutes</i> менее 1%	0,6293	0,6217	0,7885	0,8399	0,6530
Gemma ti-	NA_Gemm1	1,06±0,16	1,08±0,17	1,64±0,10	1,69±0,07	1,66±0,03
	Продолжение на следующей странице					

	Окончание приложение Б1					
	<i>Gemmatimonadetes</i> менее 1 %	2,3126	2,0777	2,6941	2,4553	2,8820
<i>Planctomycetes</i>	NA_WD2101	1,28±0,02	1,26±0,06	1,34±0,08	1,43±0,03	1,85±0,18
	<i>Planctomycetes</i> менее 1%	2,5295	2,4100	1,6936	1,9609	2,4204
<i>Proteobacteria</i>	<i>Bradyrhizobiaceae</i>	2,93±0,30	2,60±0,21	2,80±0,15	2,95±0,04	3,07±0,08
	<i>Sphingomonadaceae</i>	2,80±0,51	2,48±0,42	2,40±0,13	3,01±0,09	3,05±0,08
	<i>Comamonadaceae</i>	2,33±0,22	2,21±0,09	1,99±0,00	1,77±0,00	1,73±0,02
	<i>Oxalobacteraceae</i>	2,07±1,02	2,07±0,95	2,48±0,19	1,93±0,26	1,61±0,22
	<i>Rhodospirillaceae</i>	2,01±0,37	2,03±0,37	2,52±0,01	2,39±0,01	2,04±0,00
	NA_Myxococcales	1,51±0,23	1,61±0,29	0,88±0,04	0,96±0,02	0,94±0,06
	<i>Hyphomicrobiaceae</i>	1,43±0,42	1,37±0,46	0,65±0,01	0,71±0,02	0,67±0,00
	<i>Sinobacteraceae</i>	1,18±0,11	1,22±0,17	1,04±0,00	1,16±0,00	1,01±0,09
	<i>Xanthomonadaceae</i>	0,97±0,08	0,80±0,10	0,23±0,01	0,40±0,13	0,41±0,11
	<i>Proteobacteria</i> менее 1%	9,1325	9,2327	8,7930	8,5842	8,5555
<i>Verrucomicrobia</i>	[<i>Chthoniobacteraceae</i>]	2,54±0,87	3,05±1,08	1,15±0,07	0,88±0,15	0,88±0,13
	<i>Verrucomicrobia</i> менее 1 %	1,0863	1,3612	0,7082	0,6910	0,5114

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Приложение С1– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодных-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность аммонификаторов (2018-2020 года)

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	1884,284	1	1884,284	804,5342	0,000000	1384,116	1	1384,116	836,4149	0,000000
Погодно-климатический	228,832	2	114,416	48,8523	0,000002	87,066	2	43,533	26,3069	0,000041
Обработка КМ	36,369	1	36,369	15,5285	0,001961	8,859	1	8,859	5,3536	0,039206
Погодно-климатический*обработка КМ	108,596	2	54,298	23,1837	0,000076	6,995	2	3,497	2,1134	0,163565
Error	28,105	12	2,342			19,858	12	1,655		

Приложение С2– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодных-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность амилаolitikов

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	1723,98	1,00	1723,98	1231,44	0,00	2292,10	1,00	2292,10	1557,35	0,00
Погодно-климатический	298,44	2,00	149,22	106,59	0,00	62,76	2,00	31,38	21,32	0,00
Обработка КМ	32,69	1,00	32,69	23,35	0,00	47,12	1,00	47,12	32,02	0,00
Погодно-климатический*обработка КМ	87,06	2,00	43,53	31,09	0,00	320,04	2,00	160,02	108,73	0,00
Error	16,80	12,00	1,40			17,661	12	1,472		

Приложение С3– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность олиготрофов

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr.of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	737,0803	1	737,0803	920,3015	0,000000	683,7861	1	683,7861	337,6390	0,000000
Погодно-климатический	410,3343	2	205,1672	256,1670	0,000000	463,6789	2	231,8394	114,4774	0,000000
Обработка КМ	5,5959	1	5,5959	6,9869	0,021444	0,6876	1	0,6876	0,3395	0,570889
Погодно-климатический*обработка	13,0636	2	6,5318	8,1554	0,005799	0,7012	2	0,3506	0,1731	0,843100
Error	9,6109	12	0,8009			24,3024	12	2,0252		

Приложение С4– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность педотрофов

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	3150,354	1	3150,354	1402,632	0,000000	3551,559	1	3551,559	1965,622	0,000000
Погодно-климатический	1127,724	2	563,862	251,048	0,000000	380,694	2	190,347	105,348	0,000000
Обработка КМ	144,755	1	144,755	64,449	0,000004	7,707	1	7,707	4,265	0,061199
Погодно-климатический*обработка	397,749	2	198,874	88,545	0,000000	86,036	2	43,018	23,808	0,000067
Error	26,952	12	2,246			21,682	12	1,807		

Приложение С5– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность азотфиксаторов

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	412,6777	1	412,6777	2021,761	0,000000	430,5254	1	430,5254	600,3171	0,000000
Погодно-климатический	191,5143	2	95,7572	469,127	0,000000	214,2831	2	107,1416	149,3963	0,000000
Обработка КМ	8,7794	1	8,7794	43,012	0,000027	5,9870	1	5,9870	8,3481	0,013594
Погодно-климатический*обработка	6,4624	2	3,2312	15,830	0,000431	4,0796	2	2,0398	2,8443	0,097483
Error	2,4494	12	0,2041			8,6060	12	0,7172		

Приложение С6– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность микромицетов

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	443704,0	1	443704,0	5948,294	0,000000	190939,3	1	190939,3	1851,912	0,000000
Погодно-климатический	21328,8	2	10664,4	142,967	0,000000	25960,1	2	12980,1	125,893	0,000000
Обработка КМ	1309,2	1	1309,2	17,551	0,001255	269,8	1	269,8	2,617	0,131696
Погодно-климатический*обработка	3824,5	2	1912,3	25,636	0,000047	3681,0	2	1840,5	17,851	0,000253
Error	895,1	12	74,6			1237,2	12	103,1		

Приложение С7– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на численность целлюлозолитиков

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	10793,87	1	10793,87	766,2279	0,000000	9332,649	1	9332,649	763,8710	0,000000
Погодно-климатический	1478,93	2	739,46	52,4925	0,000001	2108,229	2	1054,114	86,2786	0,000000
Обработка КМ	8,57	1	8,57	0,6086	0,450415	30,824	1	30,824	2,5230	0,138186
Погодно-климатический*обработка	408,27	2	204,13	14,4909	0,000630	100,541	2	50,271	4,1146	0,043572
Error	169,04	12	14,09			146,611	12	12,218		

Приложение С8– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на активность фермента каталаз

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	13956,25	1	13956,25	3572,302	0,000000	10396,82	1	10396,82	5363,794	0,000000
Погодно-климатический	940,65	2	470,32	120,386	0,000000	254,73	2	127,37	65,709	0,000000
Обработка КМ	1,27	1	1,27	0,326	0,578483	6,01	1	6,01	3,100	0,103728
Погодно-климатический*обработка	28,84	2	14,42	3,691	0,056327	9,14	2	4,57	2,358	0,136867
Error	46,88	12	3,91			23,26	12	1,94		

Приложение С9– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодных-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на активность фермента пероксидаз

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	146,2751	1	146,2751	32448,31	0,000000	277,2584	1	277,2584	91964,04	0,00
Погодно-климатический	3,7833	2	1,8917	419,63	0,000000	67,4048	2	33,7024	11178,78	0,00
Обработка КМ	0,2604	1	0,2604	57,77	0,000006	14,6437	1	14,6437	4857,18	0,00
Погодно-климатический*обработка	8,8012	2	4,4006	976,19	0,000000	28,9669	2	14,4834	4804,02	0,00
Error	0,0541	12	0,0045			0,0362	12	0,0030		

Приложение С10– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодных-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на активность фермента полифенолоксидаз

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	46,74349	1	46,74349	952,8735	0,000000	55,62277	1	55,62277	1125,951	0,000000
Погодно-климатический	5,04485	2	2,52242	51,4200	0,000001	15,87725	2	7,93862	160,699	0,000000
Обработка КМ	8,87581	1	8,87581	180,9348	0,000000	8,23355	1	8,23355	166,669	0,000000
Погодно-климатический*обработка	6,68969	2	3,34484	68,1852	0,000000	8,57120	2	4,28560	86,752	0,000000
Error	0,58866	12	0,04906			0,59281	12	0,04940		

Приложение С11– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на дыхание почвы

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	297985,7	1	297985,7	2564,325	0,000000	441809,8	1	441809,8	3840,647	0,000000
Погодно-климатический	8310,3	2	4155,1	35,757	0,000009	19252,9	2	9626,4	83,683	0,000000
Обработка КМ	1245,4	1	1245,4	10,718	0,006657	121,8	1	121,8	1,059	0,323732
Погодно-климатический*обработка	108,6	2	54,3	0,467	0,637617	243,6	2	121,8	1,059	0,377150
Error	1394,5	12	116,2			1380,4	12	115,0		

Приложение С12– Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по влиянию погодно-климатических условий и обработки комплексом микроорганизмов (КМ) на урожайность растений сорго зернового

Effect	Прямой посев					Традиционная система				
	SS	Degr. of	MS	F	p	SS	Degr. of	MS	F	p
Intercept	48,54409	1	48,54409	1984,541	0,000000	44,08605	1	44,08605	8309,413	0,000000
Погодно-климатический	0,30084	2	0,15042	6,149	0,014507	2,07943	2	1,03972	195,968	0,000000
Обработка КМ	0,23120	1	0,23120	9,452	0,009638	0,01805	1	0,01805	3,402	0,089929
Погодно-климатический*обработка	0,32973	2	0,16487	6,740	0,010912	0,02370	2	0,01185	2,234	0,149761
Error	0,29353	12	0,02446			0,06367	12	0,00531		