

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ ТОМАТА ОТ ФУЗАРИОЗНОЙ ИНФЕКЦИИ**Л. З. Каримова, Ш. З. Валидов, Г. Ф. Рахманова, А. Р. Валиев**

Реферат. Совместимость химических и биологических средств защиты растений – важный фактор эффективности биопрепаратов. Исследования проводили с целью изучения совместимости штаммов микроорганизмов *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393, *Pseudomonas fluorescens* WCS 365, *Trichoderma asperellum* T302 и *Pseudomonas putida* PCL 1760 с химическими пестицидами мандипропамид и дифеноконазол, а также оценки их совместного действия на патогенный гриб *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* ZUM2407. Работу выполняли в лабораторных условиях в 2025 году. Эксперименты проводили с использованием двухсекционных чашек Петри для оценки биологической активности летучих соединений. В первой секции культивировали штаммы микроорганизмов, во второй – размещали питательную среду с конидиями патогена или семенами томата для оценки ростостимулирующего эффекта. Концентрации пестицидов использовали в сниженных дозах (в 2 раза ниже рекомендуемых производителем). Даже при низких концентрациях пестицидов в комбинации с микроорганизмами-антагонистами достигается синергетический эффект, обеспечивающий эффективное подавление патогена. Летучие соединения исследуемых штаммов снижали прорастание конидий фитопатогенного гриба с 70,1% в контроле до 10,8...14,2% в опытных вариантах. Выявлены оптимальные комбинации: мандипропамид (2 мл/5 л) + *P. putida* PCL 1760 для стимуляции роста вегетативной части растений – увеличивала длину стебля на 69% и дифеноконазол (2,5 мл/5 л) + *P. aureofaciens* BS 1393 для развития корневой системы – повышала длину корня на 108,9%. Наибольшую в опыте устойчивость к химическим компонентам проявил штамм *P. aureofaciens* BS 1393. Полученные результаты имеют значение для разработки экологически безопасных стратегий защиты растений.

Ключевые слова: *Fusarium oxysporum*, биосовместимость, микроорганизмы-антагонисты, пестициды, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, летучие соединения, интегрированная защита растений, фунгицидное действие, росторегуляторная активность.

Введение. Современное сельское хозяйство сталкивается с серьезными вызовами, среди которых особое место занимают фитопатогенные микроорганизмы, наносящие значительный экономический ущерб агропромышленному комплексу. Одним из наиболее распространенных и вредоносных фитопатогенов выступает гриб *Fusarium oxysporum*, вызывающий фузариозное увядание многих сельскохозяйственных культур и приводящий к потере до 30...40% урожая в различных регионах мира [1]. Патоген обладает широким кругом растений-хозяев, включая томаты, перцы, бахчевые, зерновые и многие другие экономически значимые культуры.

Традиционный подход к защите растений от фитопатогенов основан преимущественно на применении химических пестицидов. Однако их систематическое использование сопряжено с рядом серьезных экологических и агрономических проблем. Формирование резистентности у патогенов к действующим веществам пестицидов значительно снижает эффективность химической защиты, а накопление их остаточных количеств в почве, водных ресурсах и сельскохозяйственной продукции представляет угрозу для здоровья человека и биоразнообразия экосистем [2]. Более того, многие химические пестициды оказывают негативное влияние на полезную почвенную микрофлору, что приводит к нарушению биологического равновесия агроценозов.

В контексте современных требований к экологической безопасности все большее значение приобретают альтернативные подходы к

защите растений. Биологический контроль фитопатогенов с использованием микроорганизмов-антагонистов рассматривается как перспективное направление, способное обеспечить эффективную защиту сельскохозяйственных культур при минимальном воздействии на окружающую среду [3]. Микроорганизмы-антагонисты обладают разнообразными механизмами действия против фитопатогенов, включая конкуренцию за питательные вещества и экологические ниши, продукцию антибиотических веществ и литических ферментов, а также индукцию системной устойчивости растений. Исследования последних лет демонстрируют значительный потенциал интегрированного подхода к защите растений, основанного на комбинированном применении биологических и химических средств. В работе [4] показано, что совместное использование *Trichoderma spp.* с фунгицидами в сниженных дозах обеспечивает эффективный контроль фитопатогенов при уменьшении экологической нагрузки. Подобный синергетический эффект происходит при комбинировании ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR), с химическими пестицидами. S. Com-pant и соавторы установили, что метаболиты *Pseudomonas fluorescens* способны усиливать фунгицидное действие триазолов против *Fusarium spp.* при сниженных концентрациях последних [5].

Цель исследования – изучение биосовместимости различных штаммов микроорганизмов с химическими действующими веществами пестицидов и определение их совместной

эффективности против патогенного гриба *Fusarium oxysporum* для разработки экологически безопасных и эффективных стратегий защиты растений.

Задачи исследования:

- оценить биосовместимость штаммов микроорганизмов-антагонистов (*P. aureofaciens* BS 1393, *P. fluorescens* WCS 365, *T. asperellum* T302, *P. putida* PCL 1760) с химическими действующими веществами фунгицидов (мандипропамид, дифеноконазол) и определить их комплексную эффективность против патогенного гриба *Fusarium oxysporum*;

- исследовать фунгицидное действие и росторегуляторную активность летучих соединений, продуцируемых штаммами микроорганизмов, на прорастание конидий и рост мицелия фитопатогенных грибов в условиях *in vitro*;

- определить оптимальные комбинации и концентрации химических пестицидов и биоагентов для разработки комплексных биопестицидных композиций, обеспечивающих эффективную защиту растений при сниженных дозах химических компонентов.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов на базе ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань, Россия) в 2025 году.

Использовали перспективные штаммы микроорганизмов с различными механизмами антагонизма к фитопатогенам:

- *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393 активно колонизирует корни растений и продуцирует феназиновые антибиотики, действует как агент биологической защиты растений, используя механизм антибиозиса [6];

- *Pseudomonas fluorescens* WCS 365 также активно колонизирует корневую систему растений и служит агентом их биологической защиты, использует механизм действия через индукцию системной устойчивости растений [7];

- *Trichoderma asperellum* T302 функционирует как агент биологической защиты растений, применяя механизмы паразитизма и хищничества по отношению к фитопатогенам [8];

- *Pseudomonas putida* PCL 1760 активно колонизирует корни растений и защищает их, используя механизм конкуренции за экологические ниши [9].

В качестве модельного фитопатогена использовали *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* ZUM 2407 (*Forl* ZUM 2407), который вызывает корневые гнили томата [10].

В эксперименте применяли два химических фунгицида: мандипропамид – представитель класса манделаминов, и дифеноконазол – триазольный компонент системного действия.

Концентрации пестицидов использовали в сниженных дозах (в 2 раза ниже рекомендуемых производителем): дифеноконазол –

2 мл на 5 л воды (вместо 4 мл/5 л), мандипропамид – 2,5...3,0 мл на 5 л воды (вместо 5...6 мл/5 л).

В качестве тест-культуры использовали томат (*Solanum lycopersicum*) сорта Хурма – среднеранний детерминантный сорт с плоско-округлыми желто-оранжевыми плодами (урожайность 4...5 кг с 1 растения). Сорт включен в Государственный реестр РФ и отличается восприимчивостью к фитофторозу и макроспориозу, что делает его подходящим для оценки эффективности защитных мероприятий.

При оценке биосовместимости микроорганизмов и пестицидов штаммы микроорганизмов и патогенный гриб *Forl* ZUM2407 культивировали на питательной среде Кинга Б следующего состава (г/л): пептон – 10, глицерин – 10, K_2HPO_4 – 1,5, $MgSO_4$ – 1,5, агар микробиологический – 20. В остывшие стерильные среды добавляли исследуемые химические действующие вещества в различных концентрациях. Чашки Петри с культурами инкубировали при температуре +28°C в течение 24...36 часов.

Для оценки биологической активности летучих соединений использовали двухсекционные чашки Петри. В одну секцию разливали смесь питательной среды Кинга Б с культурой исследуемого штамма. Во вторую секцию при определении фунгицидного действия помещали питательную среду Чапека с нанесенными на поверхность конидиями *Forl* ZUM2407, а при оценке росторегуляторной активности – ту же среду с выложенными на поверхность двумя проросшими стерильными семенами томата. Контролем в обоих случаях служила среда Чапека без внесения биопрепаратов. Чашки герметично закрывали парафином и инкубировали при +25°C. Для фунгицидного теста инкубацию проводили в течение 3 суток с последующим микроскопическим учетом проросших, непроросших и аномальных конидий, а для оценки росторегуляторной активности – в течение 7 суток в условиях 16/8-часового светового дня, измеряя изменение длины корня и стебля в сравнении с контролем.

Изучали активность штаммов микроорганизмов как в чистом виде, так и в сочетании с химическими действующими веществами. В качестве контроля во всех вариантах использовали воду. При исследовании эффективности сочетаний изучали варианты с применением химических веществ мандипропамид и дифеноконазол в качестве фонов, на которых оценивали действие каждого из исследуемых штаммов микроорганизмов.

В ходе эксперимента определяли следующие параметры: влияние летучих соединений штаммов на прорастание конидий *Forl* ZUM2407; влияние летучих соединений на развитие проростков томата; биометрические показатели растений томата при патогенной нагрузке.

Результаты и обсуждение. Биосовместимость микроорганизмов с пестицидами существенно зависит как от типа действующего вещества, так и от его концентрации (рис. 1).

В контрольном варианте все исследуемые штаммы демонстрировали нормальный рост, а патогенный гриб *Forl* ZUM2407 формировал характерный воздушный мицелий.

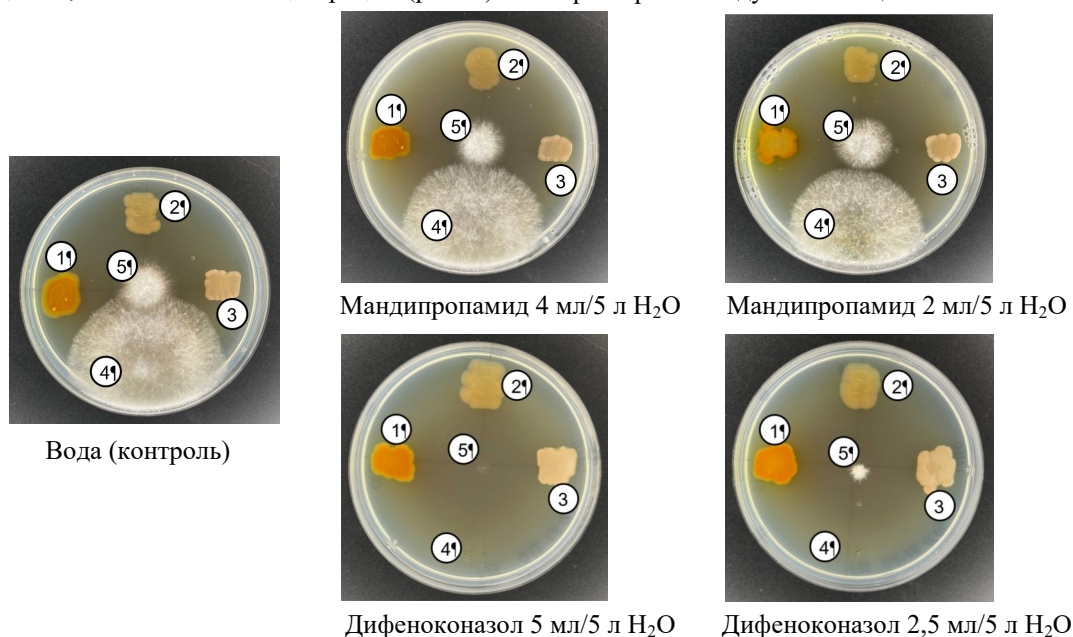


Рис. 1 – Определение совместимости химических действующих веществ различной концентрации с биологическими объектами защиты растений: 1 – *P. aureofaciens* BS 1393; 2 – *P. fluorescens* WCS 365; 3 – *P. putida* PCL 1760; 4. – *T. asperellum* T302; 5 – *Forl* ZUM2407

Стандартная концентрация мандипропамида (4 мл/5 л) позволяет всем четырем тестируемым штаммам сохранять жизнеспособность, однако размер колоний несколько уменьшается, в сравнении с контролем. В случае использования сниженной концентрации (2 мл/5 л) морфология колоний практически не отличается от контрольных образцов. Фунгицидное действие на патоген *Forl* ZUM2407 отмечено в обоих случаях, хотя сниженная концентрация демонстрирует менее выраженный эффект.

Механизм действия мандипропамида основан на ингибировании биосинтеза фосфолипидов и нарушении целостности клеточной стенки грибов, что объясняет его селективное действие против патогена при минимальном воздействии на бактериальные штаммы. Мандипропамид действует на специфические ферменты грибов, отсутствующие у бактерий, обуславливая его высокую биосовместимость с микроорганизмами-антагонистами [5].

Результаты совместимости с дифеноконазолом показали более выраженное воздействие на микроорганизмы. Стандартная концентрация (5 мл/5 л) существенно угнетала рост как патогена, так и биологических агентов. При этом сниженная концентрация (2,5 мл/5 л) улучшала выживаемость тестируемых штаммов, сохраняя при этом фунгицидное действие против патогена.

Дифеноконазол как триазольный фунгицид действует через ингибирование фермента C14-деметилазы, участвующего в биосинтезе

эргостерола – важного компонента клеточных мембран грибов. Как показали исследования [11], триазольные фунгициды могут оказывать неспецифическое воздействие на метаболические процессы микроорганизмов даже при отсутствии у них целевого фермента, что объясняет более низкую биосовместимость дифеноконазола с микробными агентами в наших опытах.

Наилучшую в эксперименте биосовместимость продемонстрировал мандипропамид в сниженной концентрации (2 мл/5 л), при которой все штаммы сохраняли морфологические характеристики, близкие к контролю, при сохранении умеренного фунгицидного действия. Среди исследуемых микроорганизмов наиболее стабильным ростом во всех вариантах отличался штамм *P. aureofaciens* BS 1393, что указывает на его высокую устойчивость к химическим компонентам. Этот феномен может объясняться наличием у этого штамма эффективных систем детоксикации ксенобиотиков, включая ферменты оксидоредуктазы и трансферазы, а также специфических транспортных белков, обеспечивающих выведение токсичных соединений из клетки [3].

Наименьшая в эксперименте биосовместимость отмечена у дифеноконазола в стандартной концентрации, который существенно угнетал рост всех микроорганизмов. Штамм *T. asperellum* T302 показал наименьшую устойчивость к пестицидам, особенно к дифеноконазолу, что объясняется его принадлежностью к грибам, против которых направлено действие триазольных фунгицидов.

Результаты исследования фунгицидного действия летучих соединений микроорганизмов (рис. 2.) демонстрируют их высокую эффективность в ингибировании роста *Forl* ZUM2407. В контрольном варианте проросло 70,1% конидий, тогда как под

влиянием летучих метаболитов исследуемых штаммов прорастание значительно снижалось (табл. 1). Наибольшее ингибирование показал штамм WCS 365, при воздействии которого проросло лишь 10,8% конидий.

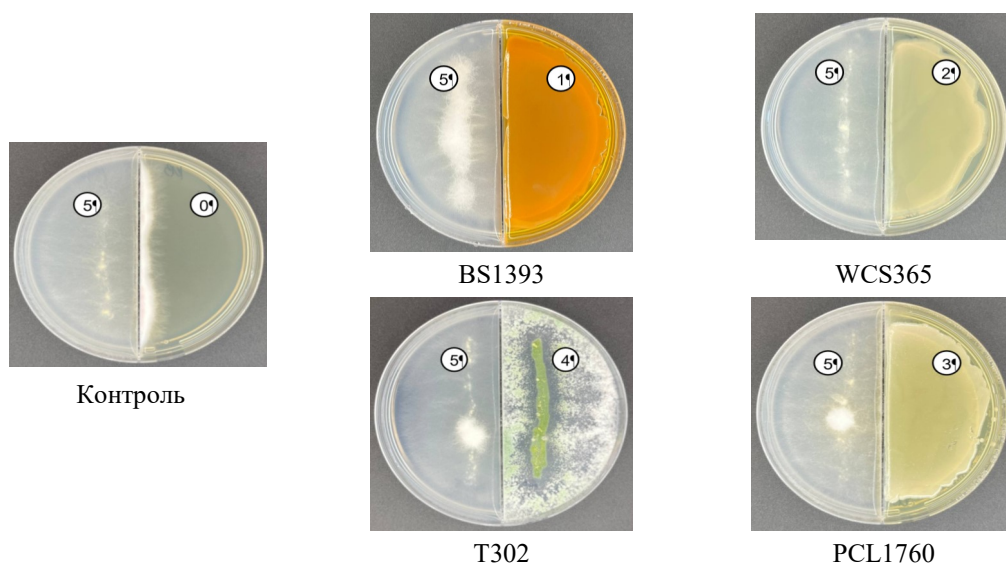


Рис. 2 – Фунгицидное действие летучих соединений штаммов на прорастание конидий и рост мицелия фитопатогенных грибов (без химических действующих веществ): 0 – чистая питательная среда; 1 – *P. aureofaciens* BS 1393; 2 – *P. fluorescens* WCS 365; 3 – *P. putida* PCL 1760; 4. – *T. asperellum* T302; 5 – *Forl* ZUM2407

Таблица 1 – Интенсивность нарастания конидий *Forl* ZUM2407 при взаимодействии с вариантами химических и биологических средств защиты растений

Вид конидий	Количество конидий, %				
	контроль	BS1393	WCS365	T302	PCL1760
Проросшие	70,1	12,5	10,8	14,2	11,3
Не проросшие	29,9	87,5	89,2	85,8	88,7

Механизмы фунгицидного действия летучих соединений микроорганизмов весьма разнообразны. *P. fluorescens* WCS 365, проявивший наибольшую в опыте активность, продуцирует целый комплекс летучих антимикробных соединений, включая цианистый водород, 2,4-диацетилфлороглюцинол, пиoluteорин и пирролнитрин. Эти вещества взаимодействуют с ключевыми ферментами дыхательной цепи грибов (в частности, с цитохром-с-оксидазой), нарушают целостность клеточных мембран и ингибируют синтез хитина – основного компонента клеточной

стенки грибов [12].

Данные таблицы 2, демонстрируют ростостимулирующую активность летучих соединений, продуцируемых исследуемыми штаммами. Обработка томатов микроорганизмами способствовала увеличению длины корня на 2,2...11,5 мм (17,6...92,0%), а стебля – на 14,5...18,5 мм (58,9...75,2%), по сравнению с контролем. Максимальные в опыте значения зафиксированы в варианте с применением штамма *P. fluorescens* WCS 365: длина корня увеличилась на 92,0%, а длина стебля – на 75,2%.

Таблица 2 – Действие летучих веществ изучаемых штаммов на развитие проростков томата

Вариант	Длина корня, мм	Длина стебля, мм
Контроль	12,5	24,6
WCS365	24,0	43,1
PCL1760	15,1	41,1
T302	17,7	39,1
BS1393	14,7	42,1
HCP ₀₅	1,7	2,9

Летучие соединения микроорганизмов оказывают ростостимулирующий эффект на растения благодаря нескольким взаимосвязанным механизмам. Они содержат предшественники

ауксинов, цитокининов и гиббереллинов, которые растения преобразуют в активные фитогормоны, стимулирующие клеточное деление и рост [13]. Бактериальные метаболиты, такие

как АЦК-деаминаза, регулируют уровень этилена в растениях, предотвращая его ингибирующее воздействие на корневую систему [14]. Микробные летучие соединения также запускают системную устойчивость растений, улучшая их общее физиологическое состояние. Кроме того,

они способствуют мобилизации питательных элементов в почве, делая их более доступными для растений – например, сидерофоры *Pseudomonas* повышают доступность железа, что положительно влияет на фотосинтез и жизнеспособность растений в целом [3].

Таблица 3 – Влияние мандипропамида на биометрические показатели томата при фузариозной инфекции

Вариант	Длина корня, мм	Длина стебля, мм
Контроль	39,5	24,5
Мандипропамид	42,0	23,5
Мандипропамид + WCS365	47,5	36,1
Мандипропамид + PCL1760	73,5	41,4
Мандипропамид + T302	63,0	39,2
Мандипропамид + BS1393	63,5	40,0
НСР ₀₅	3,9	2,7

Таблица 4 – Влияние дифеноконазола на биометрические показатели томата при фузариозной инфекции

Вариант	Длина корня, мм	Длина стебля, мм
Контроль	39,5	24,5
Дифеноконазол	49,1	24,1
Дифеноконазол + WCS365	47,0	35,7
Дифеноконазол + PCL1760	63,5	38,0
Дифеноконазол + T302	65,3	38,5
Дифеноконазол + BS1393	82,5	36,3
НСР ₀₅	2,9	3,6

Совместное применение химических пестицидов и микроорганизмов оказывает выраженное положительное влияние на биометрические показатели растений томата при патогенной нагрузке *Forl* ZUM2407 (табл. 3, 4).

Применение мандипропамида и штаммов микроорганизмов способствовало увеличению длины корня на 8,0...34,0 мм (20,3...86,1%), стебля – на 11,6...16,9 мм (47,3...69,0%), по сравнению с контролем. Наибольший эффект отмечен в варианте мандипропамид + PCL1760.

Синергетический эффект мандипропамида и микроорганизмов основан на комплексном взаимодействии, при котором мандипропамид, нарушающий целостность клеточной стенки грибов, усиливается антимикробными метаболитами микроорганизмов (антибиотиками, ферментами и сидерофорами), что позволяет эффективнее подавлять патогены при меньших дозах химического препарата [5]. Некоторые штаммы *Pseudomonas* способны метаболизировать пестициды, снижая их фитотоксичность через ферменты деградации ксенобиотиков [4]. Кроме того, микроорганизмы-антагонисты модифицируют физико-химические свойства ризосферы, улучшая поглощение и распределение пестицида в растении, что повышает его эффективность [15].

Дифеноконазол как отдельно, так и в комбинации с микроорганизмами также оказал значительное влияние на рост растений. Длина корня увеличилась на 9,6...43 мм (18,9...108,9%), длина стебля – на 11,2...14,0 мм (45,7...57,1%), по отношению к контролю.

Наилучшие в опыте результаты показали комбинации дифеноконазол + BS1393 (по длине корня) и дифеноконазол + T302 (по длине стебля).

Синергетическое действие дифеноконазола и микроорганизмов проявляется через два ключевых механизма. Дифеноконазол активирует защитные гены растений, что усиливается микроорганизмами-антагонистами через индукцию системной устойчивости, обеспечивая комплексную защиту от патогенов. Одновременно происходит модуляция гормонального баланса – триазольные фунгициды ингибируют биосинтез гиббереллинов, а микроорганизмы компенсируют этот дисбаланс, продуцируя фитогормоны, что поддерживает нормальный рост растений [16, 17].

Следует отметить, что мандипропамид в сочетании со всеми изучаемыми штаммами лучше влиял на рост и развитие вегетативной части растений, чем комбинации с дифеноконазолом. Это может быть связано с различными механизмами действия пестицидов и их влиянием на метаболизм растений и активность микроорганизмов.

Мандипропамид, выступая ингибитором синтеза фосфолипидов, имеет более узкий спектр действия, направленный преимущественно против оомицетов, и оказывает меньшее влияние на общий метаболизм растения. В сочетании с ростостимулирующими бактериями это приводит к усиленному росту вегетативных органов благодаря синергетическому эффекту метаболитов микроорганизмов и отсутствию ингибирующего

действия пестицида на синтез фитогормонов растения [1].

Дифеноконазол, напротив, как триазольный фунгицид влияет на метаболизм стеролов, что может опосредованно воздействовать на синтез гиббереллинов в растениях и замедлять рост вегетативных органов. Однако его комбинация с микроорганизмами-антагонистами обеспечивает более эффективную защиту от патогенов, что особенно важно для развития корневой системы в условиях патогенной нагрузки [3].

Можно также отметить несколько важных механизмов взаимодействия химических и биологических компонентов защиты растений. Химические пестициды и микроорганизмы-антагонисты воздействуют на разные молекулярные мишени в клетках патогена – мандипропамид нарушает целостность клеточной стенки гриба, тогда как метаболиты микроорганизмов ингибируют дыхательные ферменты, что снижает риск формирования резистентности. Микроорганизмы способны детоксифицировать химические пестициды через специфические ферментные системы, уменьшая их негативное влияние на растения. При этом биологические агенты индуцируют системную устойчивость растений через активацию сигнальных путей, а пестициды в малых дозах усиливают этот эффект. Комбинированное применение также положительно влияет на структуру микробиома ризосферы и оптимизирует гормональный баланс растений, компенсируя нарушения, вызванные пестицидами.

Выводы. Подтверждена эффективность совместного применения биологических агентов и химических пестицидов в сниженных концентрациях для защиты томата от фузариозной инфекции. Мандипропамид демонстрировал лучшую совместимость с исследуемыми штаммами микроорганизмов, по сравнению с дифеноконазолом, особенно в сниженной концентрации 2 мл/5 л, при которой все штаммы сохраняли морфологические характеристики, близкие к контролю. Наибольшую в опыте устойчивость к химическим компонентам проявил штамм *P. aureofaciens* BS 1393, что объясняется наличием у него эффективных систем детоксикации ксенобиотиков. Летучие соединения исследуемых штаммов продемонстрировали выраженное ингибирующее действие на прорастание конидий патогенного гриба, снижая их количество с 70,1% в контроле до 10,8...14,2% в экспериментальных вариантах, при этом максимальную в опыте активность продемонстрировал штамм *P. fluorescens* WCS 365. Оптимальные комбинации пестицидов и биоагентов: мандипропамид (2 мл/5 л) + *P. putida* PCL 1760 для стимуляции роста вегетативной части растений – способствовала увеличению длины стебля на 69% и дифеноконазол (2,5 мл/5л) + *P. aureofaciens* BS 1993 для развития корневой системы – обеспечивала повышение длины корня на 108,9%.

Сведения о финансировании. Работа выполнена в рамках Государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН № 124050300050-4.

Литература

1. Arie T. Fusarium diseases of cultivated plants, control, diagnosis, and molecular and genetic studies // Journal of pesticide science. 2019. Vol. 44. No. 4. P. 275–281. doi: 10.1584/jpestics.J19-03.
2. Helepciuc F.-E., Todor A. EU microbial pest control: A revolution in waiting // Pest Management Science. 2022. Vol. 78. No. 4: P.1314–325. doi: 10.1002/ps.6721.
3. Köhl J., Kolnaar R., Ravensberg W. J. Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. P. 845. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00845/full> (дата обращения: 04.06.2025). doi: 10.3389/fpls.2019.00845.
4. The Combination of a Biocontrol Agent *Trichoderma asperellum* SC012 and Hymexazol Reduces the Effective Fungicide Dose to Control Fusarium Wilt in Cowpea / C. Zhang, W. Wang, M. Xue, et. al. // Journal of fungi. 2021. Vol. 7 (9). P. 685. URL: <https://www.mdpi.com/2309-608X/7/9/685>. (дата обращения: 10.06.2025). doi: 10.3390/jof7090685.
5. Use of Plant Growth-Promoting Bacteria for Biocontrol of Plant Diseases: Principles, Mechanisms of Action, and Future Prospects / S. Compant, B. Duffy, J. Nowak, et. al. // Applied and Environmental Microbiology. 2005. Vol. 71. No. 9. P. 4951. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16151072>. (дата обращения: 04.06.2025). doi: 10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005.
6. Сизова О. И. Кочетков В. В., Боронин А. М. Ризосферные бактерии *Pseudomonas aureofaciens* и *Pseudomonas chlororaphis*, окисляющие нафталин в присутствии мышьяка // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46. № 1. С. 45–50.
7. The two-component colR/S system of *Pseudomonas fluorescens* WCS365 plays a role in rhizosphere competence through maintaining the structure and function of the outer membrane / S. de Weert, L. C. Dekkers, W. Bitter, et. al. // FEMS microbiology ecology. 2006. Vol. 58. No. 2. P. 205–213. doi: 10.1111/j.1574-6941.2006.00158.x.
8. Выделение, очистка и биологическая активность вторичных метаболитов *Trichoderma asperellum* F-1087 / Л. М. Залялютдинова, А. Г. Бикмуллин, Р. И. Тухбатова и др. // Прикладная биохимия и микробиология. 2018. Т. 54. № 2. С. 201–205. DOI 10.7868/S0555109918020101.
9. Persistence as a constituent of a biocontrol mechanism (competition for nutrients and niches) in *Pseudomonas putida* PCL1760 / A. K. Miftakhov, R. G. C. Diabankana, M. Frolov, et. al. // Microorganisms. 2022. Vol. 11. No. 1. P. 19. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36677311>. (дата обращения: 04.06.2025). doi: 10.3390/microorganisms11010019.
10. Genomic differences between two fusarium oxysporum formae speciales causing root rot in cucumber / E. N. Komissarov, R. G. C. Diabankana, I. Abdeeva, et. al. // J Fungi (Basel). 2025. Vol. 11. No. 2. P. 140. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39997434>. (дата обращения: 02.06.2025). doi: 10.3390/jof11020140.

11. Физиологические эффекты действия на растения фунгицидов триазольной природы / Т. П. Побежинова, А. В. Корсукова, Н. В. Дорофеев и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3. С. 461–476. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476.
12. Механизмы контроля *Pseudomonas fluorescens* корневой гнили ячменя, вызываемой *Fusarium culmorum* / В. Ю. Шахназарова, Д. С. Сырова, М. И. Лебединский и др. // Прикладная биохимия и микробиология. 2023. Т. 59. № 5. С. 494–501. doi: 10.31857/S0555109923050161.
13. Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) / G. Santoyo, C. A. Urtis-Flores, P. D. Loeza-Lara, et. al. // Biology. 2021. Vol. 10. No. 6. P. 475. URL: <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/6/475>. (дата обращения: 10.06.2025). doi: 10.3390/biology10060475.
14. Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агросистем и защите окружающей среды / 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.
15. Характеристика бактерий-антагонистов *Rhizoctonia solani*, выделенных из ризосферы растений перца / В. Ж. Нгуен, Т. О. Дао, Т. Х. Нгуен и др. // Вестник РГАТУ. 2019. № 3 (43). С. 28–35.
16. Сидорова Т. М., Асатурова А. М., Хомяк А. И. Биологически активные метаболиты *Bacillus subtilis* и их роль в контроле фитопатогенных микроорганизмов // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 29–37. doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.29rus.
17. Effects of pesticides on environment / I. Mahmood, S. R. Imadi, K. Shazadi, et. al. // Plant, Soil and Microbes. 2016. Vol. 1. P. 253–269. doi: 10.1007/978-3-319-27455-3_13.

Сведения об авторах:

Каримова Лилия Зяудатовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: Karimova-lcd@mail.ru
 Валидов Шамиль Завдатович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: sh.validov@knc.ru
 Рахманова Гульнара Фанисовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, e-mail: gulnara_rakhmanova@mail.ru
 Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия.
 Валиев Айрат Расимович – доктор технических наук, профессор, первый проректор, чл.-корр. АН РТ, e-mail: ayratvaliev@mail.ru
 Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

EFFICIENCY OF INTEGRATED USE OF BIOLOGICAL AND CHEMICAL AGENTS FOR TOMATO PLANT PROTECTION AGAINST FUSARIUM INFECTION L. Z. Karimova, Sh. Z. Validov, G. F. Rakhmanova, A. R. Valiev

Abstract. Compatibility of chemical and biological plant protection agents is an important factor in the effectiveness of biologicals. The study was conducted to investigate the compatibility of the microbial strains *Pseudomonas aureofaciens* BS 1393, *Pseudomonas fluorescens* WCS 365, *Trichoderma asperellum* T302 and *Pseudomonas putida* PCL 1760 with chemical pesticides mandipropamid and difenoconazole, as well as to evaluate their combined effect on the pathogenic fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* ZUM2407. The work was carried out at the laboratory in 2025. Experiments were conducted using two-section Petri dishes to assess the biological activity of volatile compounds. Microbial strains were cultivated in the first section, while a nutrient medium containing pathogen conidia or tomato seeds was placed in the second section to evaluate the growth-stimulating effect. Pesticide concentrations were used at reduced doses (2 times lower than those recommended by the manufacturer). Even at low pesticide concentrations, a synergistic effect was achieved in combination with antagonist microorganisms, ensuring effective pathogen suppression. Volatile compounds of the studied strains reduced germination of conidia of phytopathogenic fungus from 70.1% in the control to 10.8–14.2% in the experimental variants. Optimal combinations were identified: mandipropamid (2 ml/5 l) + *P. putida* PCL 1760 for stimulating vegetative growth, increasing stem length by 69%; and difenoconazole (2.5 ml/5 l) + *P. aureofaciens* BS 1393 for root development, increasing root length by 108.9%. *P. aureofaciens* BS 1393 demonstrated the highest resistance to the chemical components in the experiment. The obtained results are important for the development of environmentally friendly plant protection strategies.

Key words: *Fusarium oxysporum*, biocompatibility, antagonist microorganisms, pesticides, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, volatile compounds, integrated plant protection, fungicidal action, growth-regulating activity.

References

1. Arie T. Fusarium diseases of cultivated plants, control, diagnosis, and molecular and genetic studies. Journal of pesticide science. 2019; Vol.44. No.4. 275-281 p. doi: 10.1584/jpestics.J19-03.
2. Helepciuc FE, Todor A. EU microbial pest control: a revolution in waiting. Pest Management Science. 2022; Vol.78. No.4. 1314-325 p. doi: 10.1002/ps.6721.
3. Kohl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. [Internet]. Frontiers in Plant Science. 2019; Vol.10. 845 p. [cited 2025, June 04]. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00845/full>. doi: 10.3389/fpls.2019.00845.
4. Zhang C, Wang W, Xue M. The combination of a biocontrol agent *Trichoderma asperellum* SC012 and hymexazol reduces the effective fungicide dose to control fusarium wilt in cowpea. [Internet]. Journal of fungi. 2021; Vol.7 (9). 685 p. [cited 2025, June 10]. Available from: <https://www.mdpi.com/2309-608X/7/9/685>. doi: 10.3390/jof7090685.
5. Compant S, Duffy B, Nowak J. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. [Internet]. Applied and Environmental Microbiology. 2005; Vol.71. No. 9. 4951 p. [cited 2025, June 04]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16151072..> doi: 10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005.
6. Sizova OI, Kochetkov VV, Boronin AM. [Rhizosphere bacteria *Pseudomonas aureofaciens* and *Pseudomonas chlororaphis* oxidizing naphthalene in the presence of arsenic]. Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. 2010; Vol.46. 1. 45-50 p.

7. S. de Weert S, Dekkers LC, Bitter W. The two-component colR/S system of *Pseudomonas fluorescens* WCS365 plays a role in rhizosphere competence through maintaining the structure and function of the outer membrane. *FEMS microbiology ecology*. 2006; Vol.58. No.2. 205-213 p. doi: 10.1111/j.1574-6941.2006.00158.x.
8. Zalyalyutdinova LM, Bikmullin AG, Tukhbatova RI. [Isolation, purification and biological activity of secondary metabolites of *Trichoderma asperellum* F-1087]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2018; Vol.54. 2. 201-205 p. DOI 10.7868/S0555109918020101.
9. Miftakhov AK, Diabankana RGC, Frolov M. Persistence as a constituent of a biocontrol mechanism (competition for nutrients and niches) in *Pseudomonas putida* PCL1760. [Internet]. *Microorganisms*. 2022; Vol.11. No.1. 19 p. [cited 2025, June 04]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36677311>. doi: 10.3390/microorganisms11010019.
10. Komissarov EN, Diabankana RGC, Abdeeva I. Genomic differences between two *Fusarium oxysporum* formae speciales causing root rot in cucumber. [Internet]. *J Fungi (Basel)*. 2025; Vol.11. No.2. 140 p. [cited 2025, June 02]. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39997434>. doi: 10.3390/jof11020140.
11. Pobezhimova TP, Korsukova AV, Dorofeev NV. [Physiological effects of triazole fungicides on plants]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2019; Vol.9. 3. 461-476 p. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-461-476.
12. Shakhnazarova VYu, Syrova DS, Lebedinskiy MI. [Mechanisms of *Pseudomonas fluorescens* control of barley root rot caused by *Fusarium culmorum*]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2023; Vol.59. 5. 494-501 p. doi: 10.31857/S0555109923050161.
13. Santoyo G, Urtis-Flores CA, Loeza-Lara PD. Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). [Internet]. *Biology*. 2021; Vol.10. No.6. 475 p. [cited 2025, June 10]. Available from: <https://www.mdpi.com/2079-7737/10/6/475>. doi: 10.3390/biology10060475.
14. Korshunova TYu, Bakaeva MD, Kuzina EV. [Role of *Pseudomonas* genus bacteria in the sustainable development of agricultural systems and environmental protection]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2021; Vol.57. 3. 211-227 p. doi: 10.31857/S0555109921030089.
15. Nguen VZh, Dao TO, Nguen TKh. [Characteristics of *Rhizoctonia solani* antagonist bacteria isolated from rhizosphere of pepper plants]. *Vestnik RGATU*. 2019; 3 (43). 28-35 p.
16. Sidorova TM, Asaturova AM, Khomyak AI. [Biologically active metabolites of *Bacillus subtilis* and their role in the control of phytopathogenic microorganisms]. *Selskokhozyaystvennaya biologiya*. 2018; Vol.53. 1. 29-37 p. doi: 10.15389/agrobiology.2018.1.29rus.
17. Mahmood I, Imadi SR, Shazadi K. Effects of pesticides on environment. *Plant, Soil and Microbes*. 2016; Vol.1. 253-269 p. doi: 10.1007/978-3-319-27455-3_13.

Authors:

Karimova Liliya Zyaudatovna – Ph.D of Agricultural Sciences, senior researcher of Laboratory of Molecular-genetic and Microbiological Methods, e-mail: karimova-lcd@mail.ru
 Validov Shamil Zavdatovich – Ph.D. of Biological Sciences, Head of Laboratory of Molecular-genetic and Microbiological Methods, e-mail: sh.validov@knc.ru
 Rakhmanova Gulnara Fanisovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Laboratory of Molecular-genetic and Microbiological Methods, e-mail: gulnara_rakhmanova@mail.ru
 Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
 Valiev Ayrat Rasimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, corresponding member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, e-mail: ayratvaliev@mail.ru
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.