

Обзорная статья / Review article

УДК 579.64

DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-8



Составы биопестицидов для защиты сельскохозяйственных культур – современное состояние и перспективы (обзор)

Анна И. Хомяк, Анжела М. Асатунова

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений», Краснодар, Россия

Контактное лицо

Анна И. Хомяк, научный сотрудник ФГБНУ
ФНЦБЗР; 350039 Россия, г. Краснодар, п/о-39.
Тел. +79673115810
Email HomyakAI87@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9360-2323>

Формат цитирования

Хомяк А.И., Асатунова А.М. Составы биопестицидов для защиты сельскохозяйственных культур – современное состояние и перспективы (обзор) // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 3. С. 83-96.
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-8

Получена 5 апреля 2024 г.

Прошла рецензирование 24 мая 2024 г.

Принята 25 июня 2024 г.

Резюме

Цель: обобщить и проанализировать доступную информацию об исследованиях в области составов биопестицидов, которые направлены на усиление их эффективности, и оценить перспективы развития данного направления, для определения влияния компонентов на эффективность биопестицидов для защиты сельскохозяйственных культур.

В данной обзорной статье на основе системного анализа приведены результаты исследований компонентов, входящих в составы биопестицидов на основе микроорганизмов. Отмечено, что выбор компонентов биопестицидов необходимо осуществлять согласно требованиям, предъявляемым к продукции, рекомендованной для применения в системах экологического и органического земледелия. Указано, что выбор оптимальной рецептуры связан как с особенностями штаммов-продуцентов, их трофических потребностей и устойчивости по отношению к биотическим и абиотическим факторам, так и с особенностями технологии применения биопестицида (обработка семян, внесение в грунт или обработка растений в процессе вегетации), а также типом применяемой аппаратуры.

Знание основных требований, предъявляемых к препаративным формам биопестицидам, позволит поддерживать жизнеспособность и биологическую активность микробных агентов при хранении биопестицидов, учитывая чувствительность штаммов-продуцентов к условиям окружающей среды. Подбор оптимальных носителей, прилипателей, стабилизаторов, загустителей и синергистов с учетом технологии применения биопестицида и патогена-мишени будет способствовать разработке и появлению на рынке новых биопестицидов для защиты сельскохозяйственных культур от болезней.

Ключевые слова

Биопестицид, препаративная форма, срок хранения, консервант, прилипатель, носитель.

Composition of biopesticides for crop protection – current state and prospects (review)

Anna I. Homyak and Anzhela M. Asaturova

Federal Scientific Centre of Biological Plant Protection», Krasnodar, Russia

Principal contact

Anna I. Homyak, researcher FSBSI FSCBPP;

350039 Russia, Krasnodar, o/o-39.

Tel. +79673115810

Email HomyakAI87@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9360-2323>

How to cite this article

Homyak A.I., Asaturova A.M. Composition of biopesticides for crop protection – current state and prospects (review). *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(3):83-96. (In Russ.)
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-3-8

Received 5 April 2024

Revised 24 May 2024

Accepted 25 June 2024

Abstract

Aim. To summarise and analyse available information on research into biopesticide compositions aimed at enhancing their effectiveness and to assess prospects for the development of this field so as to determine the influence of components on the effectiveness of biopesticides for agricultural crop protection.

This review article presents the results of studies of components included in the compositions of microorganism-based biopesticides based on a system analysis. It is noted that the selection of biopesticide components must be carried out in accordance with the requirements for products recommended for use in ecological and organic farming systems. It is indicated that the choice of optimal formulation is associated with the characteristics of the producer strains, their trophic needs and resistance to biotic and abiotic factors and with the characteristics of the biopesticide application technology (seed treatment, application to the soil or treatment of plants during vegetation), as well as the type of equipment used.

Knowledge of the basic requirements for biopesticide formulations will help maintain the viability and biological activity of microbial agents during storage of biopesticides, taking into account the sensitivity of producer strains to environmental conditions. Selection of optimal carriers, adhesives, stabilisers, thickeners and synergists, taking into account the technology of application of the biopesticide and the target pathogen, will facilitate the development and appearance on the market of new biopesticides for protecting agricultural crops from diseases.

Key Words

Biopesticide, preparative form, shelf life, preservative, adhesive, carrier.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время потребность сельского хозяйства в средствах защиты растений увеличивается с каждым годом. Современное развитие биотехнологии способствовало появлению нового поколения высокоэффективных многофункциональных биопестицидов, применяющихся в различных отраслях сельскохозяйственного производства [1; 2]. Использование для создания таких препаратов природных штаммов микроорганизмов обеспечивает им высокую экологическую безопасность. Прогресс в производстве и применении биопестицидов, во многом, связан с разработкой высокотехнологичных, сохраняющих долгое время исходные свойства, препаративных форм [3–5].

Поддержание стабильности биопестицида (жизнеспособности микроорганизмов) во время хранения является основным требованием для последующей работы, но это сложнее, чем поддержание стабильности химического пестицида. Дополнительной проблемой является стабилизация продукта, который соответствует сертификации в качестве органического, что ограничивает перечень ингредиентов, которые могут быть использованы в рецептуре [6]. Различные ингредиенты, присутствующие в биопестицидах, могут регистрироваться по-разному, а некоторые даже не регистрируются, поскольку считаются «инертными» добавками. Однако исследования показали, что эти «инертные» компоненты могут быть токсичными, с многочисленными негативными последствиями для здоровья человека и окружающей среды [7]. Например, в прошлом в качестве консерванта в препаратах на основе *B. thuringiensis* использовался ксилит, но его отрицательное воздействие на окружающую среду впоследствии привело к снятию этого компонента [8]. Агентства по регистрации, такие как US Environmental Protection Agency (US EPA) регулируют включение определенных ингредиентов в составы биопестицидов, оказывающих минимальный риск или не имеющих риска [9]. Но ситуация осложняется тем, что идентификация этих «инертных» дополнительных ингредиентов в биопестицидных препаратах часто не разглашается, поскольку они считаются конфиденциальной коммерческой информацией [10].

Кроме того, в области пестицидных составов существует запутанная терминология адъювантов. Термин «адъювант» может относиться как к компоненту состава биопестицида, так и к отдельному препарату, вносимому в распылительный бак. Выбор адъювантов, входящих в состав биопестицида, не случаен, поскольку определяется составом зарегистрированного продукта. Его компоненты не могут быть изменены без уведомления и пересмотра формулы, что может привести к требованию о перерегистрации биопестицида [11].

В отличие от компонентов препарата адъюванты, смешанные в резервуарах, являются автономными продуктами, которые продаются отдельно от биопестицидов. Эти продукты предназначены для смешивания с одним или несколькими пестицидами. Они обеспечивают такие преимущества, как растекание по распыляемой поверхности, устойчивость к смыванию дождем, замедленная деградация при воздействии солнечного света. Недостатки использования адъюванта в баковой смеси включают в

себя дополнительные материальные расходы и дополнительные этапы в процессе смешивания [10].

ОБСУЖДЕНИЕ

Уникальность каждого микробного агента создает дополнительные сложности при рассмотрении конкурирующих ингредиентов, процессов и составов препарата [12; 13]. Например, биоинсектициды, полученные с использованием гомогенизированных трупов насекомых нуждаются в контроле микробов-загрязнителей в конечном продукте [14]. Культуры, которые являются гидрофобными, требуют тщательного подбора соответствующих поверхностно-активных веществ, легко смешивающихся с водой для распыления [15]. Эти различия между потребностями микроорганизмов демонстрируют необходимость в уникальных рецептурных решениях для разных микробных пестицидов.

С одной стороны, выбор оптимальной рецептурной формы зависит от физиолого-биохимических и экологических особенностей штамма-продуцента, трофических потребностей и устойчивости культуры микроорганизма по отношению к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды [16; 17]. С другой стороны, товарная форма обусловлена экологическими условиями и особенностями технологии применения биопестицида (обработка семян, внесение в грунт или обработка растений в процессе вегетирования), а также типом применяемой аппаратуры. Так, гранулированные биопестициды более удобны для внесения в борозду [18], а смачивающиеся порошки рационально использовать для удержания влаги корневой системой растений [19]. Кроме того, необходимо понимание взаимодействия биоагента с патогеном-мишенью. Энтомопатогенные препараты должны попасть внутрь насекомого-мишени, в то время как биопестициды для контроля грибов действуют при контакте или конкуренции с патогенами. Микробы, применяемые в качестве биостимулятора или биоудобрения для повышения устойчивости растений, проникают в листья растений через устьица [20].

Изменения в физических характеристиках составов биопестицидов, таких как слеживание порошков, отделение жидких компонентов, флокуляция ингредиентов, или оседание взвешенных частиц, часто приводит к плохому нанесению и снижению биологической активности [21; 22]. Эти проблемы могут возникнуть в результате чрезмерной влажности, несовместимых ингредиентов, неправильного распределения частиц по размерам, разной плотности между ингредиентами, микробного загрязнения продукта. Неблагоприятные изменения в физической структуре препарата могут препятствовать правильному применению биопрепаратов, что приводит к неэффективной борьбе с вредителями [23].

Поддержание жизнеспособности микроорганизмов часто считается синонимом стабильности при хранении биопестицидов [24]. Очевидно, что потеря жизнеспособности микроорганизмов приводит к снижению эффективности при применении. Стабильность при хранении может также относиться к физическому состоянию продукта независимо от жизнеспособности микробов [25]. Необходимо учитывать, что бактерии, грибы и нематоды нуждаются

в поддержании минимального уровня метаболизма, чтобы оставаться жизнеспособными. Приемлемое хранение микробных агентов определяется как поддержание более 90% жизнеспособных микробов по сравнению с исходной жизнеспособностью [26].

Для увеличения срока хранения биопрепаратов возможно применение *стабилизаторов и консервантов*. Грибные продукты обычно требуют минимальной концентрации колониеобразующих единиц или жизнеспособных спор. Для грибных конидий масляные составы наиболее предпочтительны для поддержания жизнеспособности, стабильности при хранении и остаточной активности, обеспечивая большую эффективность по сравнению с водными составами [27; 28]. Используемые масла не должны быть токсичными для микроорганизмов, растений, человека и животных. В целом составы на масляной основе подходят для опрыскивания листы в сухих условиях окружающей среды, поскольку масла обладают защитным эффектом, который продлевает срок хранения микроорганизмов [29]. Примером такой системы может служить состав для поддержания мицелиального гриба *Trichoderma harzianum*, эффективного антагониста для контроля гнили на яблоках, вызываемой грибами р. *Botrytis* [30]. Конидии *Metarhizium rileyi* Nm06, хранящиеся в масле, оставались жизнеспособными и активными в отношении осенней совки *Spodoptera frugiperda* после хранения при 8°C в течение 12 месяцев [31]. Применение кунжутного масла способствовало снижению прорастания конидий *Beauveria bassiana* F-HY006, обладающих инсектицидной активностью в отношении азиатской цитрусовой листоблошки *Diaphorina citri*, с 80,7 до 21,6 % [32]. Система вода-парафиновое масло с добавлением кремнезема, функционализированного амином, способствовала стабилизации биопрепарата на основе *M. brunneum*, что обеспечивало гибель личинок африканской хлопковой листовертки *Spodoptera littoralis* на 50 % выше по сравнению с контролем [33]. Применение этого состава для биопрепарата на основе *Bacillus thuringiensis aizawai* вызывало гибель 92 % личинок *Spodoptera littoralis* [34].

Низкий угол смачивания между маслом и липофильными поверхностями позволяет лучше распределяться по поверхности листа, дополнительно улучшая дисперсию и облегчая адгезию кутикулы [35]. Кроме того, масла могут обеспечить защиту конидий от УФ-повреждений, теплового стресса и низкой относительной влажности [36; 37].

В составах на водной основе биомасса отделяется и суспендируется в водной среде, которая может содержать один или несколько адъювантов для поддержания стабильности и физической целостности состава в процессе нанесения, а жидкостью-носителем является вода [38]. Для штамма *B. bassiana* Bv062 были предложены два типа жидких составов с маннитом и трегалозой в качестве стабилизаторов, способствующие поддержанию высокого состава конидий в сочетании с инсектицидной активностью в отношении личинок мотылька сахарного тростника *Diatraea saccharalis* после 30 дней хранения при 30°C [39]. Жидкий состав дрожжевого изолята *Hanseniaspora guilliermondii* YBB3 на основе глицерина был разработан для борьбы с аспергиллезной гнилью на винограде и продемонстрировал лучшие результаты, чем твердые составы [40].

Глицерин и трегалоза сохраняли жизнеспособность при хранении штамма *Pseudomonas fluorescens* Pf1 в герметичной упаковке. После 120 дней хранения при комнатной температуре было обнаружено 10⁸ КОЕ/мл, в то время как в контроле титр препарата постепенно снижался и через 90 дней жизнеспособные клетки не обнаруживались [41].

Влага влияет на биологическую активность биопестицидов несколькими способами. Так, для нематод влага необходима для предотвращения высыхания и обеспечения среды для поиска вредителя [42; 43]. Так, разработка препаративной формы на основе диоксида титана, функционализированного амином для энтомопатогенной нематоды *Steinernema carpocapsae* обеспечивала наиболее стабильную эмульсию с размером капель, подходящих для технологии применения биоинсектицида [44]. Применение таких компонентов, как гели, порошки и гранулы позволяет создавать составы со связанной водой, способствующие лучшему выживанию энтомопатогенных нематод, в отличие от сухих препаратов [45]. Было доказано, добавление вермикулита и полиакриламидного геля обеспечивает выживаемость *Steinernema feltiae* на 80 % выше в течение 241 дня при 15°C по сравнению с твердыми субстратами [46]. Добавление желатина в нанокompозитные шарики с *P. fluorescens* способствовало лучшему набуханию и содержанию влаги, что повышало выживаемость штамма до 91,3 %. Применение этого препарата снижало поражение картофеля *Fusarium solani* на 76 % [47].

Также необходимо определенное количество влаги для прорастания грибных конидий, чтобы инициировать процесс инфицирования. Активность водных составов может уменьшаться, если грибные конидии быстро впитывают воду или начинают метаболическую активность преждевременно, до контакта с вредителем-мишенью [48]. Даже при пониженной влажности споры грибов при достаточной влажности способны к прорастанию, что ведет к их гибели при отсутствии питания [49]. Всхожесть конидий снижается, когда конидии сушат и смешивают с холодной водой. Поэтому возможно, что добавление ингредиентов, способствующих быстрому смачиванию (желательная физическая характеристика смачиваемого порошка) может отрицательно повлиять на конидии при добавлении в распылительный бак. При смешивании с водой для распыления конидии могут стать метаболически активными и подверженными повреждениям при последующем высыхании после нанесения, что приводит к снижению активности [50].

Чрезмерная влажность в виде сильной росы или дождя может смыть биоагенты с поверхности листьев. Одним из способов удержания микроорганизмов на поверхности вегетативных частей растений является добавление *прилипателей* к баковой смеси для применения, тогда как другой способ включает клейкие агенты в состав биопестицидов [51]. Эти агенты обычно состоят из натуральных (углеводные, белковые или другие полимеры) или синтетических химических вещества (этоксифицированные феноксиалкилы, латексный полимер) [52]. Механизм защиты обеспечивается молекулами, которые являются гидрофобными или полимеризуются с образованием нерастворимого в воде остатка для эффективного захвата микробного

агента [53]. Так, добавление в питательную среду ксантановой камеди и патоки улучшает адгезию клеток *B. thuringiensis* subsp. *kurstaki* к кутикуле еловой листовертки *Choristoneura fumiferana* на 55 % [54]. Биопрепарат на основе *T. longibrachiatum*, в состав которого был включен полиуретан, обеспечивал биологическую эффективность в отношении *Rhizoctonia solani* на растениях томата на 43 % выше, чем в контроле [55].

Агрохимические прилипатели используются для увеличения эффективности препаратов на целевых видах, обычно за счет улучшения адгезии и/или удерживания препарата на поверхности листа или за счет увеличения проникновения препарата в растение [56]. Микроорганизмы обладают сильной гидрофобностью, образуют крупные частицы в растворах, что затрудняет использование биопестицидов в полевых условиях. На сегодняшний день составы прилипателей развиваются в сторону многофункциональных добавок с характеристиками, которые делают их трудосберегающими, легкоразлагаемыми и низкотоксичными [57]. Комбинация препарата Vertalec (*Akanthomyces dipterigenus*) с прилипателем на основе растительного масла повысила смертность капустной тли *Brevicoryne brassicae* в полевых условиях на 86 % [58]. Совместное применение препарата Sonata (*B. pumilis*) в сочетании с прилипателем Сильвет обеспечивало снижение развития мучнистой росы, вызываемой *Podosphaera aphanis* на растениях клубники до 3 % [59].

В некоторых случаях прилипатели не оказывают на эффективность биопрепаратов положительного эффекта. Так, в исследованиях 2017 года отмечено, что совместное применения биопрепарата Serenade (*B. subtilis* QST713) с прилипателем Сильвет Голд обеспечивало защитный эффект в отношении желтой пятнистости листьев *Puccinia striiformis* на уровне контроля [60].

Основная функция носителя – действовать как крошечный контейнер или разбавитель для штаммов-продуцентов микробных пестицидов. Массовая доля носителя может превышать массовую долю активного ингредиента в пестициде [61]. Такие носители, как диатомит, диоксид кремния и бентонит с высокой адсорбционной способностью, можно использовать для производства высококонцентрированных порошков, смачивающихся порошков или гранул [62–63]. Так, применение инкапсулированного препарата *P. fluorescens* в альгинатно-хитиновых микрогранулах, дополненных наночастицами оксида кремния снижало зараженность семян картофеля *F. solani* на 75 % [47]. Применение диатомита в качестве носителя для *B. bassiana* обеспечивало выживаемость конидий гриба при 35°C, и обеспечивало смертность 74,3 % личинок зернового точильщика *Rhyzopertha dominica* [64]. А применение смеси *B. bassiana* и 5 % наночастиц обеспечивало 53,3 % смертности личинок *S. litura*, в то время как смертность после обработки только *B. bassiana* составляла 6,6 % [65]. Совместное применение *P. fluorescens* и диатомита обеспечивало биологическую эффективность в отношении сетчатой пятнистости ярового ячменя на 21,3 % выше, чем препарата Псевдобактерин 2 [66]. Результаты исследований биологической активности *B. thuringiensis* и *B. bassiana*, иммобилизованных на бентонитовом носителе, в отношении личинок *Holotrichia parallela*

показали, что смертность личинок была в два раза выше, чем в варианте с применением порошка на основе *B. thuringiensis* и *B. bassiana* [67].

Такие носители, как тальк, пиррофиллит, сепиолит и глинистые материалы с низкой или средней адсорбционной способностью, обычно используются в качестве разбавителей и наполнителей для получения низкоконцентрированных порошков. Их пористая структура позволяет пестицидам высвобождаться в окружающую среду относительно медленно. Иммобилизация *P. synxantha* с использованием талька позволяла получить биофунгицид, стабильный в течение 180 дней хранения и проявляющий высокую колонизирующую активность корневой системы *Buglossoides arvensis* [68]. Протоксин и токсин *B. thuringiensis* быстро адсорбируются сепиолитом, достигая равновесного состояния в течение одного часа. Кроме того, сепиолит защищал токсин от повреждения УФ-облучением [69]. Гранулированный бактериальный препарат на основе монтмориллонита с высоким числом жизнеспособных клеток *P. aureofaciens* показал стабильность клеток при длительном хранении и высокую антифунгальную активность в отношении фитопатогенных грибов в течение 12 месяцев [70].

Микроорганизмы могут быть защищены от вредной коротковолновой световой энергии путем добавления к составам фотопротекторов. Воздействие солнечного света остается основным фактором снижения эффективности применения микробных пестицидов на полевых растениях. Многочисленные исследования показали, что солнечный свет приводит к быстрой потере жизнеспособности микробов. Естественный солнечный свет, особенно часть ультрафиолетового излучения УФ-В (280–310 нм) и УФ-А (320–400 нм) в основном отвечают за инактивацию биопрепаратов. УФ-В вызывает прямое повреждение ДНК в виде разрывов цепей и повреждений основания, что может привести к мутациям или нарушениям транскрипции. УФ-А вызывает косвенные повреждения за счет образования радикалов, которые также могут повредить ДНК [71; 72].

Фотопротекторы защищают микроорганизмы следующими способами: 1 – в качестве химического солнцезащитного средства, поглощающего коротковолновую энергию: оптические отбеливатели, химические красители, и поглотители (солнцезащитные средства); 2 – в качестве физического солнцезащитного средства, отражающего световую энергию: глины и диоксид титана [73].

В составы для фотопротекции включают хромофоры и пигменты. Так, установлено, что конго красный делает устойчивыми к УФ-излучению конидии *M. robertsii* [74]. Черный меланин, продуцируемый штаммом дрожжей *Hortaea werneckii* EGYNDA08, защищает штамм *B. thuringiensis* subsp. *aegypti* Bt-C18 от дезактивации солнечным светом и увеличивает его биологическую эффективность в отношении личинок хлопкового листового червя *Spodoptera littoralis* в девять раз [75]. Эти исследования подтверждены данными исследований влияния меланина на фотозащиту штамма *B. thuringiensis* BGC-1, согласно которым смесь биопрепарата с меланином обеспечивает смертность личинок хлопковой совки *Helicoverpa armigera* на уровне 86,6 % при пятичасовом воздействии солнечного света при температуре 43,6°C [76].

Оптические отбеливатели, которые поглощают ультрафиолетовую энергию и преобразуют ее в длину волн безопасного видимого света, могут быть включены в качестве компонентов биоpestицида или добавлены в бак для распыления в качестве адъювантов. Кроме того, оптические отбеливатели способны усиливать действие некоторых биоpestицидов. В исследованиях 2022 года было установлено, что совместное применение оптического отбеливателя и препарата Лепидоцид (*B. thuringiensis*) обеспечивает смертность личинок червонца непарного *Lycaena dispar* на 36,2 % по сравнению с применением только препарат Лепидоцид [77].

Для масляных составов в качестве солнцезащитных средств обычно используются органические соединения. Так модифицированное соевое масло, известное как соевый экран, защищает жизнеспособность грибных конидий при воздействии естественного и смоделированного солнечного света [78]. Конидиальный препарат *Cordyceps javanica* на масляной основе, стабилизированный кунжутным маслом, сохранял активность и вирулентность в отношении взрослых особей *D. citri* при УФ-В-стрессе до 16 недель [79]. Гуминовые кислоты доказали высокий потенциал защиты от УФ-излучения конидий *B. bassiana* на рапсе, количество конидий в варианте с применением гуминовых кислот превышало контроль в 7,8 раз [80].

В отличие от химических добавок, способных только поглощать УФ-лучи, физические добавки способны отражать и рассеивать УФ-лучи [81]. Так, внесение в препарат на основе *B. thuringiensis* аморфного диоксида кремния обеспечило жизнеспособность 79,7 % спор после воздействия ультрафиолета (УФ-А 385 нм), тогда как жизнеспособность незащищенных спор в этих условиях составила 41,3 % [82]. Иммобилизация *T. viride* и *B. bassiana* на гранулах полимочевины способствовала защите от УФ-излучения и выживаемости 90 % клеток [83].

Вязкость является важным свойством биоpestицида, влияющим на размер капель и их осаждение на обработанной поверхности. Составы с низкой вязкостью ниже 100 мПа·с имеют тенденцию образовывать мелкие капли и низкое отложение на обработанных поверхностях по сравнению с составами с низкой летучестью и повышенной вязкостью (130–150 мПа·с). Маленькие капли легче сносятся с обрабатываемой поверхности ветром или током воды. Они включают только несколько спор или клеток, или даже не содержат спор, если концентрация микробов недостаточно высока. Кроме того, более крупные капли дольше сохраняют влажную среду, что способствует поддержанию жизнеспособности клеток [84]. Такие загустители, как ксантановая камедь, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), меласса и силикат калия используются в биоpestицидных составах. Эти средства считаются безопасными для здоровья человека, животных, окружающей среды [85]. Применение ксантановой камеди и КМЦ способствовало лучшему распределению штамма *P. fluorescens* на поверхности семян перца чили (*Capsicum annuum*), что обеспечивало подавление развития *F. solani* на 41,2 % выше по сравнению с контролем [86]. Полианионы на основе лигнина обеспечивали сохранность спор *T. reesei* IBWF 034-05, активных в отношении *Phaeomonilla chlamydospora* и *P. minimum* путем последовательного

высвобождения спор на поверхности ствола винограда [87].

Одним из эффективных способов усиления действия биоpestицидов является применение синергистов. Они способны усиливать действие композиций на основе микробных биоагентов [88]. Исследования показали, что дазомет и *B. subtilis* NCD-2 продемонстрировали хорошую эффективность борьбы с фузариозным увяданием хризантемы. Применение дазомета значительно снизило активность каталазы и уреазы в почве, в то время как *B. subtilis* NCD-2 продемонстрировал фунгицидную активность в отношении *F. oxysporum* [89]. Синергетический препарат на основе *Trichoderma* spp. и метаболитов *Chaetomium* spp. оказался эффективным биофунгицидом для борьбы с болезнями растений. Нано-элиситоры *Chaetomium* spp. индуцировали иммунитет у растений, а грибы рода *Trichoderma* являются биодеструкторами, продуцирующими целлюлазу, гемицеллюлазу, лигниназу и протеазу [90]. Комбинация тебуконазола и *B. subtilis* H158 была оценена для борьбы с ложной головней риса, вызванной *Ustilaginoidea virens*. Тебуконазол в низких дозах стимулировал рост *B. subtilis*, продлевал период действия *B. subtilis* за счет повышения его прикрепляемости к поверхности растений риса, ускорял образование биопленки для облегчения колонизации, стимулировал индуцированную системную устойчивость риса, а также снижал естественную устойчивость патогена за счет подавления ключевого гена устойчивости грибов к тебуконазолу. Однако при высоких дозах применения тебуконазол оказывал неблагоприятное воздействие на эти факторы и проявлял антагонистическую активность в отношении *B. subtilis* [91].

Комбинация хитозана с другими агентами усиливает синергетический эффект за счет ингибирования прорастания спор и изменения морфогенеза клеточной стенки грибных патогенов [92]. Так, совместное применение хитозана и *T. atroviride* на растениях свеклы стимулировало прорастание семян, запускало защитные реакции и снижало заболеваемость церкоспорозом (*Cercospora beticola*). Хитозан запускал системную устойчивость и обладал биоцидным эффектом, в то время как *T. atroviride* индуцировала гены защиты от стресса у растений свеклы [93]. Композиция на основе *B. subtilis* M-22, *T. viride* T-36 и хитозана обеспечивала защитный эффект до 70 % в системах защиты овощных культур от почвенной фузариозной инфекции [94].

Добавки для стимулирования питания (вкусовая стимуляция) усиливают активность бактериальных агентов. Сахара, аминокислоты и крахмалы, как правило, могут стимулировать питание насекомых. Некоторые соединения могут быть использованы для борьбы с определенными вредителями [95]. Применение *Chromobacterium subtsugae* с добавлением кукурузного сиропа в качестве фагостимулятора снизило заражение осенней красной малины личинками *Drosophila suzukii* Matsuura на 61,1 % по сравнению с необработанной малиной [96]. В исследованиях 2019 года были протестированы приманки для азиатской хлопковой совки *Spodoptera litura* с использованием рисовых, кукурузных и пшеничных отрубей, а также пальмового сахара и воды. Среднее потребление приманки шестидневными

личинками *S. litura* через 48 часов показало преимущество пшеничных отрубей и кукурузных отрубей [97]. Хитозановый гидрогель в качестве фагостимулятора вместе с биоларвицидом на основе *B. thuringiensis* var. *israelensis* продемонстрировал заметно более высокий потенциал приманки по сравнению с целлюлозным, а также эффективно убивал личинок комаров *Aedes albopictus* уже через несколько часов после введения [98].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биопестициды являются ключевыми продуктами для развития устойчивого и эффективного сельского хозяйства. Эффективность биопестицидов для защиты сельскохозяйственных культур зависит не только от характеристики штаммов-продуцентов, но и от дозировки, способа и своевременности внесения. Чтобы добиться эффективности в полевых условиях, необходимо учитывать взаимодействие микробов-антагонистов с поверхностью листьев растений или вредителем-мишенью. Но необходимо учитывать, что в настоящее время большинство компонентов биопестицидов не проходят процедуру регистрации. Необходимо установить стандартные системы введения различных компонентов, используемых для микробных пестицидов. То есть все «инертные» добавки должны подвергаться той же оценке риска, что и активные ингредиенты. Поскольку активными ингредиентами микробных пестицидов являются микроорганизмы, следует учитывать влияние добавок на выживание и размножение микроорганизмов. Особое внимание следует уделить тому, что адъюванты должны обладать большей адсорбционной способностью и более высокими дисперсионными характеристиками. Это позволит улучшить физические и химические свойства биопестицидов и, как следствие, повысить их эффективность в полевых условиях.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП-20.1/22.9 «Оптимизация состава и препаративной формы нового биопрепарата на основе штамма *B. subtilis* BZR 336g для защиты сельскохозяйственных культур». Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

ACKNOWLEDGMENT

The research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific and innovation project Num. NIP-20.1/22.9 project "Optimization of the Composition and Preparative Form of a New Biological Product Based on the *B. subtilis* BZR 336g Strain for Crop Protection. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азизбеян Р.Р. Биологические препараты для защиты сельскохозяйственных растений (Обзор) // Биотехнология. 2018. Т. 34. N 5. С. 37–47. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2018-34-5-37-47>
2. Hernandez-Tenorio F., Miranda A.M., Rodríguez C.A., Giraldo-Estrada C., Sáez A.A. Potential Strategies in the

- Biopesticide Formulations: A Bibliometric Analysis // *Agronomy*. 2022. N 12. P. 2665. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112665>
3. Mascarín G.M., Jackson M.A., Behle R.W., Kobori N.N., Júnior Í.D. Improved shelf life of dried *Beauveria bassiana* blastospores using convective drying and active packaging processes // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. V.100. N 19. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7597-2>
 4. Маслиенко Л.В., Воронкова А.Х. Элементы лабораторного регламента производства микробиопрепаратов в препаративной форме «смачивающийся порошок» на основе бактерий-антагонистов из рода *Pseudomonas* при поверхностном культивировании на жидкой питательной среде // Масличные культуры. Научнотехнический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018. Т. 1. N 173. С. 87–93.
 5. Mishra J., Dutta V., Arora N.K. Biopesticides in India: technology and sustainability linkages // *Biotechnology*. 2020. N 10. P. 210. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02192-7>
 6. Damalas C.A., Koutroubas S.D. Current Status and Recent Developments in Biopesticide Use // *Agriculture*. 2018. N 8. P. 13. <https://doi.org/10.3390/agriculture8010013>
 7. Mesnage R., Bernay B., Seralini G. Ethoxylated adjuvants of glyphosate-based herbicides are active principles of human cell toxicity // *Toxicology*. 2013. N 313. P. 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2012.09.006>
 8. Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D., Valéro, J.R. Recent advances in downstream processing and formulations of *Bacillus thuringiensis* based biopesticides // *Process biochemistry*. 2006. V. 41. N 2. P. 323–342.
 9. Koul O. Biopesticides: commercial opportunities and challenges. In: *Development and Commercialization of Biopesticides; Costs and benefits*. Amsterdam: Elsevier Inc., AACC International, 2023. P. 1–23.
 10. Mesnage R., Antoniou M.N. Ignoring adjuvant toxicity falsifies the safety profile of commercial pesticides // *Frontiers in public health*. 2018. N 5. P. 361. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00361>
 11. Market and Markets. Agricultural Adjuvants Market by Type (Activator and Utility), Application (Herbicides, Fungicides, and Insecticides), Crop-Type (Cereals and Oilseeds and Fruits and Vegetables), and by Region. Global Trends and Forecast to 2021. 2016. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/adjuvant-market-1240.html> (дата обращения: 17.07.2023)
 12. Tijjani A., Bashir K.A., Mohammed I., Muhammad A., Gambo A., Musa H. Biopesticides for pests control: A review // *Journal of Biopesticides and Agriculture*. 2016. V. 3. N 1. P. 6–13.
 13. Хужаназарова М.К., Муронова С.С. Технология получения биопрепарата на основе ризобактерий, иммобилизованных флокулянтами Гипан // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. N 3. С. 34–38. <https://doi.org/10.17513/srbs.1281>
 14. Behle R., Borthel T. Formulations of entomopathogens as bioinsecticides. In: *Mass production of beneficial organisms*. USA: Academic Press, 2023. P. 407–429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822106-8.00010-5>
 15. do Nascimento Silva J., Mascarín G.M., de Castro R.P.V., Castilho L.R., Freire D.M.G. Novel combination of a biosurfactant with entomopathogenic fungi enhances efficacy against *Bemisia whitefly* // *Pest management science*. 2019. V. 75. N 11. P. 2882–2891. <https://doi.org/10.1002/ps.5458>
 16. Sachdev S., Singh R.P. Current challenges, constraints and future strategies for development of successful market for biopesticides // *Climate Change and Environmental*

- Sustainability. 2016. V. 4. N 2. P. 129–136.
<https://doi.org/10.5958/2320-642X.2016.00014.4>
17. Павлюшин В.А., Новикова И.И., Бойкова И.В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. N 3. С. 421–438.
<https://doi.org/10.15389/agrobiol.2020.3.421rus>
18. Huff Hartz K.E., Edwards T.M., Lydy M.J. Fate and transport of furrow-applied granular tefluthrin and seed-coated clothianidin insecticides: comparison of field-scale observations and model estimates // Ecotoxicology. 2017. N 26. P. 876–888. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1818-z>
19. Bharti V., Ibrahim S. Biopesticides: Production, formulation and application systems // International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 2020. V. 9. N 10. P. 3931–3946. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.453>
20. Preininger C., Sauer U., Bejarano A., Berninger T. Concepts and applications of foliar spray for microbial inoculants // Applied microbiology and biotechnology. 2018. N 102. P. 7265–7282. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9173-4>
21. Rumbos C.I., Athanassiou C.G. Use of entomopathogenic fungi for the control of stored-product insects: can fungi protect durable commodities? // Journal of Pest Science. 2017. N 90. P. 839–854. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0849-9>
22. de la Cruz Quiroz R., Cruz Maldonado J., Rostro Alanis M. Fungi-based biopesticides: shelf-life preservation technologies used in commercial products // Journal of Pest Science. 2019. N 92. P. 1003–1015.
<https://doi.org/10.1007/s10340-019-01117-5>
23. Essiedu J.A., Adepoju F.O., Ivantsova M.N. Benefits and limitations in using biopesticides: A review // In AIP Conference Proceedings. 2020. N 2313. Article id: 080002.
24. Alamprese C., Cappa C., Ratti S., Limbo S., Signorelli M., Fessas D., Lucisano M. Shelf life extension of whole-wheat breadsticks: Formulation and packaging strategies // Food chemistry. 2017. N 230. P. 532–539.
25. Keswani C., Sarma B.K., Singh H.B. Synthesis of policy support, quality control, and regulatory management of biopesticides in sustainable agriculture // Agriculturally Important Microorganisms. 2016. P. 3–12.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-2576-1_1
26. Zobot G.L., Schaefer Rodrigues F., Polano Ody L., Vinícius Tres M., Herrera, E., Palacin H., Córdova-Ramos J.S., Best I., Olivera-Montenegro L. Encapsulation of Bioactive Compounds for Food and Agricultural Applications // Polymers. 2022. N 14. P. 4194. <https://doi.org/10.3390/polym14194194>
27. Oliveira D.G.P., Lopes R.B., Rezende J.M., Delalibera Jr. I., Increased tolerance of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* conidia to high temperature provided by oil-based formulations // J. Invertebr Pathol. 2018. N 151. P. 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2017.11.012>
28. Lei C.J., Halim N.A., Asib N., Zakaria A., Azmi W.A. Conidial Emulsion Formulation and Thermal Storability of *Metarhizium anisopliae* against Red Palm Weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (Coleoptera: Dryophthoridae) // Microorganisms. 2022. N 10. P. 1460.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10071460>
29. Teixidó N., Usall J., Torres R. Insight into a Successful Development of Biocontrol Agents: Production, Formulation, Packaging, and Shelf Life as Key Aspects // Horticulturae. 2022. N 8. P. 305. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040305>
30. Fraceto L.F., Maruyama C.R., Guilger M., Mishra S., Keswani C., Singh H.B., de Lima R. Trichoderma harzianum-based novel formulations: potential applications for management of Next-Gen agricultural challenges // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2018. V. 93. N 8. P. 2056–2063. <https://doi.org/10.1002/jctb.5613>
31. Grijalba E.P., Espinel C., Cuartas P.E., Chaparro M.L., Villamizar L.F., *Metarhizium rileyi* biopesticide to control *Spodoptera frugiperda*: Stability and insecticidal activity under glasshouse conditions // Fungal Biology. 2018. V. 122. N 11. P. 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2018.08.010>
32. Awan U. A., Xia S., Meng L., Raza M. F., Zhang Z., Zhang H. Isolation, characterization, culturing, and formulation of a new *Beauveria bassiana* fungus against *Diaphorina citri* // Biological Control. 2021. N 158. Article id: 104586.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104586>
33. Yaakov N., Ananth Mani K., Felfbaum R., Lahat M., Da Costa N., Belausov E., Ment D., Mechrez G. Single Cell Encapsulation via Pickering Emulsion for Biopesticide Applications // ACS Omega. 2018. N 3. P. 14294–14301. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02225>
34. Yaakov N., Kottakota C., Mani K.A., Naftali S.M., Zelinger E., Davidovitz M., Ment D., Mechrez G. Encapsulation of *Bacillus Thuringiensis* in an Inverse Pickering Emulsion for Pest Control Applications. Colloids Surf // B Biointerfaces. 2022. N 213. Article id: 112427.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112427>
35. Birnbaum N., Reingold V., Matveev S., Kottakota C., Davidovitz M., Mani K.A., Feldbaum R., Yaakov N., Mechrez G., Ment D. Not Only a Formulation: The Effects of Pickering Emulsion on the Entomopathogenic Action of *Metarhizium brunneum* // Journal of Fungi. 2021. P. V. 7. N 7. P. 499.
<https://doi.org/10.3390/jof7070499>
36. Alves F.M., Bernardo C.C., Paixão F.R.S., Barreto L.P., Luz C., Humber R.A., Fernandes É.K.K. Heat-stressed *Metarhizium anisopliae*: Viability (*in vitro*) and virulence (*in vivo*) assessments against the tick *Rhipicephalus sanguineus* // Parasitology Research. 2017. N 116. P. 111–121.
<https://doi.org/10.1007/s00436-016-5267-z>
37. Muniz E.R., Paixão F.R.S., Barreto L.P., Luz C., Arruda W., Angelo I.C., Fernandes É.K.K. Efficacy of *Metarhizium anisopliae* conidia in oil-in-water emulsion against the tick *Rhipicephalus microplus* under heat and dry conditions // BioControl. 2020. N 65. P. 339–351.
38. Upadhyay H., Mirza A., Singh J. Impact of Biopesticides in Sustainable Agriculture // Advances in Plant Microbiome and Sustainable Agriculture. Microorganisms for Sustainability. Singapore: Springer, 2020. P. 281–296.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-3208-5_11
39. Mejía C., Espinel C., Forero M., Ramos F. A., Brandão P. F. B., Villamizar L. Improving ecological fitness of *Beauveria bassiana* conidia to control the sugar cane borer *Diatraea saccharalis* // Biocontrol Science and Technology. 2020. V. 30. N 6. P. 513–530.
<https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1738343>
40. Nandhini M., Harish S., Aiyannathan K.E.A., Durgadevi D., Beaulah A. Glycerol-based liquid formulation of the epiphytic yeast *Hanseniaspora guilliermondii* isolate YBB3 with multiple modes of action controls postharvest Aspergillus rot in grapes // The Plant Pathology Journal. 2021. N 103. P. 1253–1264.
<https://doi.org/10.1007/s42161-021-00909-y>
41. Nerek E., Sokołowska B. *Pseudomonas* spp. in biological plant protection and growth promotion // AIMS Environmental Science. 2022. V. 9. N 4. P. 493–504.
<https://doi.org/10.3934/environsci.2022029>
42. Saleh M.M.E., Metwally H.M.S., Abonaem M. Commercialization of biopesticides based on entomopathogenic nematodes. In: Cottage Industry of Biocontrol Agents and Their Applications: Practical Aspects to Deal Biologically with Pests and Stresses Facing Strategic Crops. Singapore: Springer, 2020. P. 253–275.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-33161-0_8
43. Hussaini S.S., Rajeshwari R., Rajeshwari R., Appanna V. Potential of Entomopathogenic Nematodes // Biopesticides in Horticultural Crops. 2021. N 17. P. 80–99.
44. Kotliarevski L., Cohen R., Ramakrishnan J., Wu S., Mani K. A. Amar-Feldbaum, R. Mechrez, G. Individual coating of entomopathogenic nematodes with titania (TiO₂)

- nanoparticles based on oil-in-water Pickering emulsion: A new formulation for biopesticides // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. V. 70. N 42. P. 13518–13527. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04424>
45. Panichikhal J., Prathap G., Nair R.A., Krishnankutty R.E. Evaluation of plant probiotic performance of *Pseudomonas* sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nanoparticles // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. N 166. P. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.110>
46. Leite L.G., Shapiro-Ilan D.I., Hazir S. Survival of *Steinernema feltiae* in different formulation substrates: Improved longevity in a mixture of gel and vermiculite // *Biological Control*. 2018. N 126. P. 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.05.013>
47. Pour M.M., Saberi-Riseh R., Mohammadinejad R., Hosseini A. Investigating the Formulation of Alginate-Gelatin Encapsulated *Pseudomonas Fluorescens* (VUPF5 and T17-4 Strains) for Controlling *Fusarium Solani* on Potato // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. N 133. P. 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.071>
48. Rodrigues J., Catão A.M.L., dos Santos A.S. Relative humidity impacts development and activity against *Aedes aegypti* adults by granular formulations of *Metarhizium humberi* microsclerotia // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2021. N 105. P. 2725–2736. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11157-6>
49. Маслиенко Л.В., Воронкова А.Х. Элементы лабораторного регламента производства микробиопрепаратов на основе грибных штаммов-продуцентов в препаративной форме "смачивающийся порошок" // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2016. Т. 4. N 168. С. 100–107.
50. Acheampong M.A., Coombes C.A., Moore S.D., Hill M.P. Temperature tolerance and humidity requirements of select entomopathogenic fungal isolates for future use in citrus IPM programmes // *Journal of Invertebrate Pathology*. 2020. N 174. Article id: 107436. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107436>
51. Atanasova-Pancevska N., Kungulovski D. Isolation, characterization and formulation of antagonistic bacteria against fungal plant pathogens // *AGROFOR*. 2018. V. 3. N 3. P. 80–89. <https://doi.org/10.7251/AGRENG1803080A>
52. Albuquerque P.B.S., de Oliveira W.F., dos Santos Silva P.M., dos Santos Correia M.T., Kennedy J.F., Coelho L.C.B.B. Epiphanies of well-known and newly discovered macromolecular carbohydrates – A review // *International journal of biological macromolecules*. 2020. N 156. P. 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.046>
53. Sahai P., Sinha V. B., Dutta R. Bioformulation and nanotechnology in pesticide and fertilizer delivery system for eco-friendly agriculture: a review // *Sci Agric*. 2019. N 3. P. 2–10. <https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0675>
54. Ndao A., Kumar L.R., Tyagi R.D., Valéro J. Biopesticide and formulation processes based on starch industrial wastewater fortified with soybean medium // *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. 2019. V. 55. N 2. P. 115–126. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1668225>
55. Mahde B.Y., Fayyadh M.A., Al-Luaibi S.S. Evaluation of Biofungicide Formulation of *Trichoderma longibrachiatum* in Controlling of Tomato Seedling Damping-off Caused by *Rhizoctonia solani* // *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2019. V. 32. N 2. P. 135–149. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.204>
56. Adusei-Fosu K., Rolando C.A., Richardson B. Evaluating the efficacy of potential fungicide-adjuvant combinations for control of myrtle rust in New Zealand // *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2021. V. 128. N 6. P. 1501–1515. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00523-1>
57. Lin F., Mao Y., Zhao F., Idris A.L., Liu Q., Zou S., Guan X., Huang T. Towards Sustainable Green Adjuvants for Microbial Pesticides: Recent Progress, Upcoming Challenges, and Future Perspectives // *Microorganisms*. 2023. N 11. P. 364. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020364>
58. Prince G., Chandler D. Susceptibility of *Myzus persicae*, *Brevicoryne brassicae* and *Nasonovia ribisnigri* to fungal biopesticides in laboratory and field experiments // *Insects*. 2020. V. 11. N 1. P. 55.
59. Berrie A., Xu, X. Developing biopesticide-based programmes for managing powdery mildew in protected strawberries in the UK // *Crop Protection*. 2021. N 149. Article id: 105766. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105766>
60. Reiss A., Jørgensen L.N. Biological control of yellow rust of wheat (*Puccinia striiformis*) with Serenade® ASO (*Bacillus subtilis* strain QST713) // *Crop Protection*. 2017. N 93. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.009>
61. Singh A., Dhiman N., Kar A.K., Singh D., Purohit M.P., Ghosh D., Patnaik S. Advances in controlled release pesticide formulations: Prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture // *Journal of hazardous materials*. 2020. N 385. Article id: 121525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121525>
62. Максимов И.В., Сорокань А.В., Шеин М.Ю., Хайруллин Р.М. Биологические методы защиты растений от вирусов: проблемы и перспективы (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2020. Т. 56. N 6. С. 536–550. <https://doi.org/10.31857/S0555109920060100>
63. Marzban R., Babaei J., Kalantari M., Saberi F. Preparation of wettable powder formulation of *Bacillus thuringiensis* KD2 // *Journal of Applied Biological Sciences*. 2021. V. 15. N 3. P. 285–293.
64. Zaman S., Rasul A., Khan A.G., Ali Q., Anwar T., Faisal M., Qasim M.U. Effect of abiotic factors on the efficacy of *Beauveria bassiana* and diatomaceous earth against *Rhyzopertha dominica* (F.): Efficacy of bio-pesticides against *R. dominica* under different abiotic factors // *Journal of Applied Biological Sciences*. 2020. V. 14. N 1. P. 98–112. <https://jabsonline.org/index.php/jabs/article/view/830>
65. An C., Sun C., Li N. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture // *Journal of Nanobiotechnology*. 2022. N 20. P. 11. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7>
66. Оленин О.А., Зудилин С.Н. Влияние инновационных органических удобрений и биопрепаратов на урожайность ярового ячменя в лесостепи среднего Поволжья // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. N 4. С. 17–23.
67. Liu Q., Geng L., Liu C., Wang Q., Zhang J., Bai X., Shu C. Study on the Granular Carrier to Enhance the Control Effect of *Bacillus thuringiensis* and *Beauveria bassiana* on Grubs[J] // *Chinese Journal of Biological Control*. 2021. V. 37. N 2. P. 193–200. <https://doi.org/10.16409/j.cnki.2095-039x.2021.05.003>
68. Novinscak A., Filion M. Long term comparison of talc- and peat-based phytobeneficial *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas synxantha* bioformulations for promoting plant growth // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. N 4. Article id: 602911. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.602911>
69. Zhou X., Li H., Liu Y., Hao J., Liu H., Lu X. Improvement of stability of insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* against UV-irradiation by adsorption on sepiolite // *Adsorption Science and Technology*. 2018. V. 36. N 56. P. 1233–1245. <https://doi.org/10.1177/0263617418759777>
70. Fomina M., Skorochod I. Microbial Interaction with Clay Minerals and Its Environmental and Biotechnological Implications // *Minerals*. 2020. N 10. P. 861. <https://doi.org/10.3390/min10100861>
71. Vanhaelewyn L., Van Der Straeten D., De Coninck B. Vandenbussche F. Ultraviolet Radiation From a Plant Perspective: The Plant-Microorganism Context // *Frontiers in*

- Plant Science. 2020. N 11. Article id: 597642. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597642>
72. Enwemeka C.S., Baker T.L., Bumah V.V. The role of UV and blue light in photo-eradication of microorganisms // Journal of Photochemistry and Photobiology. 2021. N 8. Article id: 100064. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100064>
73. do Nascimento Jn. D.R., Taberero A., Cabral Albuquerque E.C.d.M., Vieira de Melo S.A.B. Biopesticide Encapsulation Using Supercritical CO₂: A Comprehensive Review and Potential Applications // Molecules. 2021. N 26. Article id: 4003. <https://doi.org/10.3390/molecules26134003>
74. Licona-Juárez K.C., Bezerra A.V.S., Oliveira I.T., Massingue C.D., Medina H.R., Rangel D.E. Congo red induces trans-priming to UV-B radiation in *Metarhizium robertsii* // Fungal Biology. 2023. N 06. P. 21. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.06.005>
75. Saleh H., Abdelrazak A., Elsayed A. Optimizing production of a biopesticide protectant by black yeast // Egyptian Journal of Biological Pest Control. 2018. N 28. P. 72. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0078-4>
76. Kalmath B., Bheemanna M., Prabhuraj A. Evaluation of UV protectants for wettable powder formulation of native *Bacillus thuringiensis* (Berliner) isolate against *Helicoverpa armigera* (Hubner) in the Laboratory // Journal of Biological Control. 2018. V. 32. N 3. P. 179–186. <https://doi.org/10.18311/jbc/2018/21661>
77. Akhanaev Y., Pavlushin S., Polenogova O. The effect of mixtures of *Bacillus thuringiensis*-based insecticide and multiple nucleopolyhedrovirus of *Lymantria dispar* L. in combination with an optical brightener on *L. dispar* larvae // BioControl. 2022. N 67. P. 331–343. <https://doi.org/10.1007/s10526-022-10137-7>
78. Lee J. Y., Woo R. M., Woo S. D. Formulation of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* JN5R1W1 for the control of mosquito adults and evaluation of its novel applicability // Journal of Asia-Pacific Entomology. 2023. V 26. N 2. Article id: 102056. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2023.102056>
79. Awan U.A., Meng L., Xia S., Raza M.F., Zhang Z., Zhang H. Isolation, fermentation, and formulation of entomopathogenic fungi virulent against adults of *Diaphorina citri* // Pest Management Science. 2021. V. 77. N 9. P. 4040–4053. <https://doi.org/10.1002/ps.6429>
80. Kaiser D., Bacher S., Mène-Saffrané L., Grabenweger G. Efficiency of natural substances to protect *Beauveria bassiana* conidia from UV radiation // Pest management science. 2019. V. 75. N 2. P. 556–563. <https://doi.org/10.1002/ps.5209>
81. Feldbaum R.A., Yaakov N., Mani K.A., Yossef E., Metbeev S., Zelinger E., Mechrez G. Single cell encapsulation in a Pickering emulsion stabilized by TiO₂ nanoparticles provides protection against UV radiation for a biopesticide // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2021. N 206. Article id: 111958.
82. Jalali E., Maghsoudi S. Noroozian E. A novel method for biosynthesis of different polymorphs of TiO₂ nanoparticles as a protector for *Bacillus thuringiensis* from Ultra Violet // Scientific Reports. 2020. N 10. P. 426. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57407-6>
83. Жемчужина Н.С., Фокин А.О., Елизарова С.А., Горелов П.В. Новая форма биопрепаратов – микроконтейнеры из полимерного биоразлагаемого материала // Лаборатория и производство. 2018. Т. 1. N 1. P. 138–141.
84. Bueno M.R., da Cunha J.P.A.R., Santana D.G. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops // Biosyst Eng. 2016. N 154. P. 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017>
85. Ndao A., Sellamuthu B., Gnepe J.R., Tyagi R.D., Valero J.R. Pilot-scale biopesticide production by *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* using starch industry wastewater as raw material // Journal of Environmental Science and Health, Part B. 2017. V. 52. N 9. P. 623–630.
86. Chin J.M., Lim Y.Y., Ting A.S.Y. Biopriming *Pseudomonas fluorescens* to vegetable seeds with biopolymers to promote coating efficacy, seed germination and disease suppression // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2022. V. 21. N 8. P. 493–505. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.02.002>
87. Peil S., Beckers S.J., Fischer J., Wurm F.R. Biodegradable, lignin-based encapsulation enables delivery of *Trichoderma reesei* with programmed enzymatic release against grapevine trunk diseases // Materials Today Bio. 2020. N 7. Article id: 100061. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100061>
88. Abbey J.A., Percival D., Abbey L., Asiedu S.K., Prithiviraj B., Schilder A. Biofungicides as alternative to synthetic fungicide control of grey mould (*Botrytis cinerea*) – prospects and challenges // Biocontrol science and technology. 2019. V. 29. N 3. P. 207–228. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1548574>
89. Chen H., Zhao S., Zhang K., Zhao J., Jiang J., Chen F., Fang W. Evaluation of Soil-Applied Chemical Fungicide and Biofungicide for Control of the Fusarium Wilt of Chrysanthemum and Their Effects on Rhizosphere Soil Microbiota // Agriculture. 2018. N 8. P. 184. <https://doi.org/10.3390/agriculture8120184>
90. Soytong K., Song J.J., Dinh M.T., Hoang H. Research investigation of natural products from microorganisms for sustainable agriculture in Vietnam: A short communication // International Journal of Agricultural Technology. 2020. V. 16. N 2. P. 421–428.
91. Liu L., Zhao K., Cai L., Zhang Y., Fu Q., Huang S. Combination effects of tebuconazole with *Bacillus subtilis* to control rice false smut and the related synergistic mechanism // Pest Management Science. 2023. V. 79. N 1. P. 234–243. <https://doi.org/10.1002/ps.7193>
92. Trejo-Raya A.B., Rodríguez-Romero V.M., Bautista-Baños S., Quiroz-Figueroa F.R., Villanueva-Arce R., Durán-Páramo E. Effective *In Vitro* Control of Two Phytopathogens of Agricultural Interest Using Cell-Free Extracts of *Pseudomonas fluorescens* and Chitosan // Molecules. 2021. N 26. P. 6359. <https://doi.org/10.3390/molecules26216359>
93. Kappel L., Kosa N., Gruber S. The multilateral efficacy of chitosan and *Trichoderma* on sugar beet // Journal of Fungi. 2022. V. 8. N 2. P. 137. <https://doi.org/10.3390/jof8020137>
94. Колесников Л.Е., Попова Э.В., Новикова И.И., Прияткин Н.С., Архипов М.В., Колесникова Ю.Р., Потрахов Н.Н., Van Duijn B., Гусаренко А.С. Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. N 5. С. 1024–1040. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.1024rus>
95. Şengül Demirak M.Ş., Canpolat E. Plant-Based Bioinsecticides for Mosquito Control: Impact on Insecticide Resistance and Disease Transmission // Insects. 2022. N 13. P. 162. <https://doi.org/10.3390/insects13020162>
96. Fanning P.D., Grieshop M.J., Isaacs R. Efficacy of biopesticides on spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* Matsumura in fall red raspberries // Journal of Applied Entomology. 2017. V. 142. N 1-2. P. 26–32. <https://doi.org/10.1111/jen.12462>
97. Shahanaz M.R., Pathrose B., Chellappan M. A phagostimulant based bait composition for tobacco caterpillar *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae) // Journal of Tropical Agriculture. 2019. V. 57. N 1. P. 54–58.
98. Piazzoni M., Negri A., Brambilla E., Giussani L., Pitton S., Caccia S., Lenardi C. Biodegradable floating hydrogel baits as larvicide delivery systems against mosquitoes // Soft Matter. 2022. V. 18. N 34. P. 6443–6452. <https://doi.org/10.1039/D2SM00889K>

REFERENCES

1. Azizbekyan R.R. Biological preparations for the protection of agricultural plants (Review). *Biotechnology*, 2018, vol. 34, no. 5, pp. 37–47. (In Russian). <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2018-34-5-37-47>
2. Hernandez-Tenorio F., Miranda A.M., Rodríguez C.A., Giraldo-Estrada C., Sáez A.A. Potential Strategies in the Biopesticide Formulations: A Bibliometric Analysis. *Agronomy*, 2022, no. 12, p. 2665. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112665>
3. Mascarin G.M., Jackson M.A., Behle R.W., Kobori N.N., Júnior Í.D. Improved shelf life of dried *Beauveria bassiana* blastospores using convective drying and active packaging processes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, vol. 100, no. 19, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7597-2>
4. Maslienko L.V., Voronkova A.Kh. Elements of the laboratory regulations for the production of microbiological preparations in the preparative form "wetttable powder" based on antagonist bacteria from the genus *Pseudomonas* during surface cultivation on a liquid nutrient medium. *Maslichnyye kul'tury*. [Oilseeds]. 2018, vol. 1, no. 173, pp. 87–93. (In Russian)
5. Mishra J., Dutta V., Arora N.K. Biopesticides in India: technology and sustainability linkages. *Biotechnology*, 2020, no. 10, p. 210. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02192-7>
6. Damalas C.A., Koutroubas S.D. Current Status and Recent Developments in Biopesticide Use. *Agriculture*, 2018, no. 8, p. 13. <https://doi.org/10.3390/agriculture8010013>
7. Mesnage R., Bernay B., Seralini G. Ethoxylated adjuvants of glyphosate-based herbicides are active principles of human cell toxicity. *Toxicology*, 2013, no. 313, pp. 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2012.09.006>
8. Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D., Valéro J.R. Recent advances in downstream processing and formulations of *Bacillus thuringiensis* based biopesticides. *Process biochemistry*, 2006, vol. 41, no. 2, pp. 323–342.
9. Koul O. Biopesticides: commercial opportunities and challenges. In: *Development and Commercialization of Biopesticides; Costs and benefits*. Amsterdam: Elsevier Inc., AACC International, 2023, pp. 1–23.
10. Mesnage R., Antoniou M.N. Ignoring adjuvant toxicity falsifies the safety profile of commercial pesticides. *Frontiers in public health*, 2018, no. 5, p. 361. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00361>
11. Market and Markets. Agricultural Adjuvants Market by Type (Activator and Utility), Application (Herbicides, Fungicides, and Insecticides), Crop-Type (Cereals and Oilseeds and Fruits and Vegetables), and by Region. Global Trends and Forecast to 2021. 2016. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/adjuvant-market-1240.html> (accessed 17.07.2023)
12. Tijjani A., Bashir K. A., Mohammed I., Muhammad A., Gambo A., Musa H. Biopesticides for pests control: A review. *Journal of Biopesticides and Agriculture*. 2016, vol. 3, no. 1, pp. 6–13.
13. Khujanazarova M.K., Murodova S.S. Technology for obtaining a biological product based on rhizobacteria immobilized with Gipan flocculant. *Scientific review. Biological sciences*, 2022, no. 3, pp. 34–38. (In Russian). <https://doi.org/10.17513/srbs.1281>
14. Behle R., Birthisil T. Formulations of entomopathogens as bioinsecticides. In: *Mass production of beneficial organisms*. USA. Academic Press, 2023, pp. 407–429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822106-8.00010-5>
15. do Nascimento Silva J., Mascarin G.M., de Castro R. P.V., Castilho L.R., Freire D.M.G. Novel combination of a biosurfactant with entomopathogenic fungi enhances efficacy against *Bemisia whitefly*. *Pest management science*, 2019, vol. 75, no. 11, pp. 2882–2891. <https://doi.org/10.1002/ps.5458>
16. Sachdev S., Singh R.P. Current challenges, constraints and future strategies for development of successful market for biopesticides. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 129–136. <https://doi.org/10.5958/2320-642X.2016.00014.4>
17. Pavlyushin V.A., Novikova I.I., Boikova I.V. Microbiological protection of plants in technologies of phytosanitary optimization of agroecosystems: theory and practice (review). *Agricultural biology*, 2020. vol. 55, no. 3, pp. 421–438. (In Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2020.3.421rus>
18. Huff Hartz K.E., Edwards T.M., Lydy M.J. Fate and transport of furrow-applied granular tefluthrin and seed-coated clothianidin insecticides: comparison of field-scale observations and model estimates. *Ecotoxicology*, 2017, no. 26, pp. 876–888. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1818-z>
19. Bharti V., Ibrahim S. Biopesticides: Production, formulation and application systems. *International Journal of Current Microbiology and Applied Science*, 2020, vol. 9, no. 10, pp. 3931–3946. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.453>
20. Preininger C., Sauer U., Bejarano A., Berninger T. Concepts and applications of foliar spray for microbial inoculants. *Applied microbiology and biotechnology*, 2018, no. 102, pp. 7265–7282. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9173-4>
21. Rumbos C.I., Athanassiou C.G. Use of entomopathogenic fungi for the control of stored-product insects: can fungi protect durable commodities? *Journal of Pest Science*. 2017, no. 90, pp. 839–854. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0849-9>
22. de la Cruz Quiroz R., Cruz Maldonado J., Rostro Alanis M. Fungi-based biopesticides: shelf-life preservation technologies used in commercial products. *Journal of Pest Science*, 2019. no. 92. pp. 1003–1015. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01117-5>
23. Essiedu J.A., Adepoju F.O., Ivantsova M.N. Benefits and limitations in using biopesticides: A review. In *AIP Conference Proceedings*, 2020, no. 2313, article id: 080002.
24. Alamprese C., Cappa C., Ratti S., Limbo S., Signorelli M., Fessas D., Lucisano M. Shelf life extension of whole-wheat breadsticks: Formulation and packaging strategies. *Food chemistry*. 2017, no. 230, pp. 532–539.
25. Keswani C., Sarma B.K., Singh H.B. Synthesis of policy support, quality control, and regulatory management of biopesticides in sustainable agriculture. In: *Agriculturally Important Microorganisms*. 2016. pp. 3–12. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2576-1_1
26. Zabot G.L., Schaefer Rodrigues F., Polano Ody L., Vinicius Tres M., Herrera E., Palacin H., Córdova-Ramos J.S., Best I., Olivera-Montenegro L. Encapsulation of Bioactive Compounds for Food and Agricultural Applications. *Polymers*, 2022, no. 14. article id: 4194. <https://doi.org/10.3390/polym14194194>
27. Oliveira D.G.P., Lopes R.B., Rezende J.M., Delalibera Jr.I., Increased tolerance of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* conidia to high temperature provided by oil-based formulations. *J. Invertebr Pathol*, 2018, no. 151, pp. 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2017.11.012>
28. Lei C.J., Halim N.A., Asib N., Zakaria A., Azmi W.A. Conidial Emulsion Formulation and Thermal Storability of *Metarhizium anisopliae* against Red Palm Weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (Coleoptera: Dryophthoridae). *Microorganisms*, 2022, no. 10, article id: 1460. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071460>
29. Teixidó N., Usall J., Torres R. Insight into a Successful Development of Biocontrol Agents: Production, Formulation, Packaging, and Shelf Life as Key Aspects. *Horticulturae*, 2022, no. 8. p. 305. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040305>
30. Fraceto L.F., Maruyama C.R., Guilger M., Mishra S., Keswani C., Singh H.B., de Lima R. Trichoderma harzianum-based novel formulations: potential applications for management of Next-Gen agricultural challenges. *Journal of*

- Chemical Technology and Biotechnology*, 2018, vol. 93, no. 8, pp. 2056–2063. <https://doi.org/10.1002/jctb.5613>
31. Grijalba E.P., Espinel C., Cuartas P.E., Chaparro M.L., Villamizar L.F., *Metarhizium rileyi* biopesticide to control *Spodoptera frugiperda*: Stability and insecticidal activity under glasshouse conditions. *Fungal Biology*, 2018, vol. 122, no. 11, pp. 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2018.08.010>
32. Awan U.A., Xia S., Meng L., Raza M.F., Zhang Z., Zhang H. Isolation, characterization, culturing, and formulation of a new *Beauveria bassiana* fungus against *Diaphorina citri*. *Biological Control*, 2021, no. 158, article id: 104586. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104586>
33. Yaakov N., Ananth Mani K., Felfbaum R., Lahat M., Da Costa N., Belausov E., Ment D., Mechrez G. Single Cell Encapsulation via Pickering Emulsion for Biopesticide Applications. *ACS Omega*, 2018, no. 3, pp. 14294–14301. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02225>
34. Yaakov N., Kottakota C., Mani K.A., Naftali S.M., Zelinger E., Davidovitz M., Ment D., Mechrez G. Encapsulation of *Bacillus Thuringiensis* in an Inverse Pickering Emulsion for Pest Control Applications. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 2022, no. 213, article id: 112427. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112427>
35. Birnbaum N., Reingold V., Matveev S., Kottakota C., Davidovitz M., Mani K.A., Feldbaum R., Yaakov N., Mechrez G., Ment D. Not Only a Formulation: The Effects of Pickering Emulsion on the Entomopathogenic Action of *Metarhizium brunneum*. *Journal of Fungi*, 2021, vol. 7, no. 7, p. 499. <https://doi.org/10.3390/jof7070499>
36. Alves F.M., Bernardo C.C., Paixão F.R.S., Barreto L.P., Luz C., Humber R.A., Fernandes É.K.K. Heat-stressed *Metarhizium anisopliae*: Viability (*in vitro*) and virulence (*in vivo*) assessments against the tick *Rhipicephalus sanguineus*. *Parasitology Research*, 2017, no. 116, pp. 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00436-016-5267-z>
37. Muniz E.R., Paixão F.R.S., Barreto L.P., Luz C., Arruda W., Angelo I.C., Fernandes É.K.K. Efficacy of *Metarhizium anisopliae* conidia in oil-in-water emulsion against the tick *Rhipicephalus microplus* under heat and dry conditions. *BioControl*, 2020, no. 65, pp. 339–351.
38. Upadhyay H., Mirza A., Singh J. Impact of Biopesticides in Sustainable Agriculture. In: *Advances in Plant Microbiome and Sustainable Agriculture. Microorganisms for Sustainability*. Singapore: Springer, 2020, pp. 281–296. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3208-5_11
39. Mejía C., Espinel C., Forero M., Ramos F.A., Brandão P.F.B., Villamizar L. Improving ecological fitness of *Beauveria bassiana* conidia to control the sugar cane borer *Diatraea saccharalis*. *Biocontrol Science and Technology*, 2020, vol. 30, no. 6, pp. 513–530. <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1738343>
40. Nandhini M., Harish S., Aiyathan K.E.A., Durgadevi D., Beaulah A. Glycerol-based liquid formulation of the epiphytic yeast *Hanseniaspora guilliermondii* isolate YBB3 with multiple modes of action controls postharvest Aspergillus rot in grapes. *The Plant Pathology Journal*, 2021, no. 103, pp. 1253–1264. <https://doi.org/10.1007/s42161-021-00909-y>
41. Nerek E., Sokołowska B. *Pseudomonas* spp. in biological plant protection and growth promotion. *AIMS Environmental Science*, 2022, vol. 9, no. 4, pp. 493–504. <https://doi.org/10.3934/envirosci.2022029>
42. Saleh M.M.E., Metwally H.M.S., Abonaem M. Commercialization of biopesticides based on entomopathogenic nematodes. In: *Cottage Industry of Biocontrol Agents and Their Applications: Practical Aspects to Deal Biologically with Pests and Stresses Facing Strategic Crops*. Singapore: Springer, 2020, pp. 253–275. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33161-0_8
43. Hussaini S.S., Rajeshwari R., Rajeshwari R., Appanna V. Potential of Entomopathogenic Nematodes. *Biopesticides in Horticultural Crops*, 2021, no. 17, pp. 80–99.
44. Kotliarevski L., Cohen R., Ramakrishnan J., Wu S., Mani K.A. Amar-Feldbaum R. Mechrez G. Individual coating of entomopathogenic nematodes with titania (TiO₂) nanoparticles based on oil-in-water Pickering emulsion: A new formulation for biopesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, vol. 70, no. 42, pp. 13518–13527. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04424>
45. Panichikall J., Prathap G., Nair R.A., Krishnankutty R.E. Evaluation of plant probiotic performance of *Pseudomonas* sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, no. 166, pp. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.110>
46. Leite L.G., Shapiro-Ilan D.I., Hazir S. Survival of *Steinernema feltiae* in different formulation substrates: Improved longevity in a mixture of gel and vermiculite. *Biological Control*, 2018, no. 126, pp. 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.05.013>
47. Pour M.M., Saberi-Riseh R., Mohammadinejad R., Hosseini A. Investigating the Formulation of Alginate-Gelatin Encapsulated *Pseudomonas Fluorescens* (VUPF5 and T17-4 Strains) for Controlling *Fusarium Solani* on Potato. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, no. 133, pp. 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.071>
48. Rodrigues J., Catão A.M.L., dos Santos A.S. Relative humidity impacts development and activity against *Aedes aegypti* adults by granular formulations of *Metarhizium humeri* microsclerotia. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, no. 105, pp. 2725–2736. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11157-6>
49. Maslienko L.V., Voronkova A.Kh. Elements of laboratory regulations for the production of microbiological preparations based on fungal producing strains in the preparative form "wetttable powder". Maslichnyye kul'tury [Oilseeds]. 2016, vol. 4, no. 168, pp. 100–107. (In Russian)
50. Acheampong M.A., Coombes C.A., Moore S.D., Hill M.P. Temperature tolerance and humidity requirements of select entomopathogenic fungal isolates for future use in citrus IPM programmes. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2020, no. 174, article id: 107436. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107436>
51. Atanasova-Pancevska N., Kungulovski D. Isolation, characterization and formulation of antagonistic bacteria against fungal plant pathogens. *AGROFOR*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 80–89. <https://doi.org/10.7251/AGRENG1803080A>
52. Albuquerque P.B.S., de Oliveira W.F., dos Santos Silva P.M., dos Santos Correia M.T., Kennedy J.F., Coelho L.C.B.B. Epiphanies of well-known and newly discovered macromolecular carbohydrates – A review. *International journal of biological macromolecules*, 2020, no. 156, pp. 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.046>
53. Sahai P., Sinha V.B., Dutta R. Bioformulation and nanotechnology in pesticide and fertilizer delivery system for eco-friendly agriculture: a review. *Sci Agric*, 2019, no. 3, pp. 2–10. <https://doi.org/10.31080/ASAG.2019.03.0675>
54. Ndao A., Kumar L.R., Tyagi R.D., Valéro J. Biopesticide and formulation processes based on starch industrial wastewater fortified with soybean medium. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 115–126. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1668225>
55. Mahde B.Y., Fayyadh M.A., Al-Luaibi S.S. Evaluation of Biofungicide Formulation of *Trichoderma longibrachiatum* in Controlling of Tomato Seedling Damping-off Caused by *Rhizoctonia solani*. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 135–149. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.204>
56. Adusei-Fosu K., Rolando C.A., Richardson B. Evaluating the efficacy of potential fungicide-adjuvant combinations for control of myrtle rust in New Zealand. *Journal of Plant*

- Diseases and Protection*, 2021, vol. 128, no. 6, pp. 1501–1515. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00523-1>
57. Lin F., Mao Y., Zhao F., Idris A.L., Liu Q., Zou S., Guan X., Huang T. Towards Sustainable Green Adjuvants for Microbial Pesticides: Recent Progress, Upcoming Challenges, and Future Perspectives. *Microorganisms*, 2023, no. 11, p. 364. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020364>
58. Prince G., Chandler D. Susceptibility of *Myzus persicae*, *Brevicoryne brassicae* and *Nasonovia ribisnigri* to fungal biopesticides in laboratory and field experiments. *Insects*, 2020, vol. 11, no. 1, p. 55.
59. Berrie A., Xu X. Developing biopesticide-based programmes for managing powdery mildew in protected strawberries in the UK. *Crop Protection*, 2021, no. 149, article id: 105766. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105766>
60. Reiss A., Jørgensen L.N. Biological control of yellow rust of wheat (*Puccinia striiformis*) with Serenade® ASO (*Bacillus subtilis* strain QST713). *Crop Protection*, 2017, no. 93, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.009>
61. Singh A., Dhiman N., Kar A.K., Singh D., Purohit M.P., Ghosh D., Patnaik S. Advances in controlled release pesticide formulations: Prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture. *Journal of hazardous materials*, 2020, no. 385, article id: 121525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121525>
62. Maksimov I.V., Sorokan A.V., Shein M.Yu., Khairullin R.M. Biological methods of protecting plants from viruses: problems and prospects (review). *Applied Biochemistry and microbiology*, 2020, vol. 56, no. 6, pp. 536–550. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0555109920060100>
63. Marzban R., Babaei J., Kalantari M., Saberi, F. Preparation of wettable powder formulation of *Bacillus thuringiensis* KD2. *Journal of Applied Biological Sciences*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 285–293.
64. Zaman S., Rasul A., Khan A. G., Ali Q., Anwar T., Faisal M., Qasim M.U. Effect of abiotic factors on the efficacy of *Beauveria bassiana* and diatomaceous earth against *Rhyzopertha dominica* (F.): Efficacy of bio-pesticides against *R. dominica* under different abiotic factors. *Journal of Applied Biological Sciences*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 98–112. <https://jabsonline.org/index.php/jabs/article/view/830>
65. An C., Sun C., Li N. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, no. 20, p. 11. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7>
66. Olenin O.A., Zudilin S.N. Influence of innovative organic fertilizers and biological preparations on the yield of spring barley in the forest-steppe of the middle Volga region. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Proceedings of the Samara State Agricultural Academy]. 2021, no. 4, pp. 17–23. (In Russian)
67. Liu Q., Geng L., Liu C., Wang Q., Zhang J., Bai X., Shu C. Study on the Granular Carrier to Enhance the Control Effect of *Bacillus thuringiensis* and *Beauveria bassiana* on Grubs[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, vol. 37, no. 2, pp. 193–200. <https://doi.org/10.16409/j.cnki.2095-039x.2021.05.003>
68. Novinscak A., Filion M. Long term comparison of talc-and peat-based phytobeneficial *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas synxantha* bioformulations for promoting plant growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, no. 4, article id: 602911. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.602911>
69. Zhou X., Li H., Liu Y., Hao J., Liu H., Lu X. Improvement of stability of insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* against UV-irradiation by adsorption on sepiolite. *Adsorption Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 56, pp. 1233–1245. <https://doi.org/10.1177/0263617418759777>
70. Fomina M., Skorochod I. Microbial Interaction with Clay Minerals and Its Environmental and Biotechnological Implications. *Minerals*, 2020, no. 10, p. 861. <https://doi.org/10.3390/min10100861>
71. Vanhaelewyn L., Van Der Straeten D., De Coninck B. Vandebussche F. Ultraviolet Radiation From a Plant Perspective: The Plant-Microorganism Context. *Frontiers in Plant Science*, 2020, no. 11, article id: 597642. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597642>
72. Enwemeka C.S., Baker T.L., Bumah V.V. The role of UV and blue light in photo-eradication of microorganisms. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2021, no. 8, article id: 100064. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100064>
73. do Nascimento Jn. D.R., Tabernero A., Cabral Albuquerque E.C.d.M., Vieira de Melo S.A.B. Biopesticide Encapsulation Using Supercritical CO₂: A Comprehensive Review and Potential Applications. *Molecules*, 2021, no. 26, article id: 4003. <https://doi.org/10.3390/molecules26134003>
74. Licona-Juárez K.C., Bezerra A.V.S., Oliveira I.T., Massingue C.D., Medina H.R., Rangel D.E. Congo red induces trans-priming to UV-B radiation in *Metarhizium robertsii*. *Fungal Biology*, 2023, no. 06, p. 21. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2023.06.005>
75. Saleh H., Abdelrazak A., Elsayed A. Optimizing production of a biopesticide protectant by black yeast. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2018, no. 28, p. 72. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0078-4>
76. Kalmath B., Bheemanna M., Prabhuraj A. Evaluation of UV protectants for wettable powder formulation of native *Bacillus thuringiensis* (Berliner) isolate against *Helicoverpa armigera* (Hubner) in the Laboratory. *Journal of Biological Control*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 179–186. <https://doi.org/10.18311/jbc/2018/21661>
77. Akhnaev Y., Pavlushin S., Polenogova O. The effect of mixtures of *Bacillus thuringiensis*-based insecticide and multiple nucleopolyhedrovirus of *Lymantria dispar* L. in combination with an optical brightener on *L. dispar* larvae. *BioControl*, 2022, no. 67, pp. 331–343. <https://doi.org/10.1007/s10526-022-10137-7>
78. Lee J.Y., Woo R.M., Woo S.D. Formulation of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* JN5R1W1 for the control of mosquito adults and evaluation of its novel applicability. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2023, vol. 26, no. 2, article id: 102056. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2023.102056>
79. Awan U.A., Meng L., Xia S., Raza M.F., Zhang Z., Zhang H. Isolation, fermentation, and formulation of entomopathogenic fungi virulent against adults of *Diaphorina citri*. *Pest Management Science*, 2021, vol. 77, no. 9, pp. 4040–4053. <https://doi.org/10.1002/ps.6429>
80. Kaiser D., Bacher S., Mène-Saffrané L., Grabenweger G. Efficiency of natural substances to protect *Beauveria bassiana* conidia from UV radiation. *Pest management science*, 2019, vol. 75, no. 2, pp. 556–563. <https://doi.org/10.1002/ps.5209>
81. Feldbaum R.A., Yaakov N., Mani K.A., Yossef E., Metbeev S., Zelinger E., Mechrez G. Single cell encapsulation in a Pickering emulsion stabilized by TiO₂ nanoparticles provides protection against UV radiation for a biopesticide. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, no. 206, article id: 111958.
82. Jalali E., Maghsoudi S. Noroozian E. A novel method for biosynthesis of different polymorphs of TiO₂ nanoparticles as a protector for *Bacillus thuringiensis* from Ultra Violet. *Scientific Reports*, 2020, no. 10, p. 426. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57407-6>
83. Zhemchuzhina N.S., Fokin A.O., Elizaveta S.A., Gorelov P.V. A new form of biological products - microcontainers made of polymeric biodegradable material. *Laboratoriya i proizvodstvo* [Laboratory and production]. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 138–141. (In Russian)
84. Bueno M.R., da Cunha J.P.A.R., Santana D.G. Assessment of spray drift from pesticide applications in soybean crops.

- Biosyst Eng*, 2016, no. 154, pp. 35–45.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.017>
85. Ndao A., Sellamuthu B., Gnepe J.R., Tyagi R.D., Valero J.R. Pilot-scale biopesticide production by *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* using starch industry wastewater as raw material. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2017, vol. 52, no. 9, pp. 623–630.
86. Chin J.M., Lim Y.Y., Ting A.S.Y. Biopriming *Pseudomonas fluorescens* to vegetable seeds with biopolymers to promote coating efficacy, seed germination and disease suppression. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2022, vol. 21, no. 8, pp. 493–505.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.02.002>
87. Peil S., Beckers S.J., Fischer J., Wurm F.R. Biodegradable, lignin-based encapsulation enables delivery of *Trichoderma reesei* with programmed enzymatic release against grapevine trunk diseases. *Materials Today Bio*, 2020, no. 7, article id: 100061. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100061>
88. Abbey J.A., Percival D., Abbey L., Asiedu S.K., Prithiviraj B., Schilder A. Biofungicides as alternative to synthetic fungicide control of grey mould (*Botrytis cinerea*)—prospects and challenges. *Biocontrol science and technology*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 207–228.
<https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1548574>
89. Chen H., Zhao S., Zhang K., Zhao J., Jiang J., Chen F., Fang W. Evaluation of Soil-Applied Chemical Fungicide and Biofungicide for Control of the Fusarium Wilt of Chrysanthemum and Their Effects on Rhizosphere Soil Microbiota. *Agriculture*, 2018, no. 8, p. 184.
<https://doi.org/10.3390/agriculture8120184>
90. Soyong K., Song J.J., Dinh M.T., Hoang H. Research investigation of natural products from microorganisms for sustainable agriculture in Vietnam: A short communication. *International Journal of Agricultural Technology*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 421–428.
91. Liu L., Zhao K., Cai L., Zhang Y., Fu Q., Huang S. Combination effects of tebuconazole with *Bacillus subtilis* to control rice false smut and the related synergistic mechanism. *Pest Management Science*, 2023, vol. 79, no.1, pp. 234–243.
<https://doi.org/10.1002/ps.7193>
92. Trejo-Raya A.B., Rodríguez-Romero V.M., Bautista-Baños S., Quiroz-Figueroa F.R., Villanueva-Arce R., Durán-Páramo E. Effective *In Vitro* Control of Two Phytopathogens of Agricultural Interest Using Cell-Free Extracts of *Pseudomonas fluorescens* and Chitosan. *Molecules*, 2021, no. 26, article id: 6359. <https://doi.org/10.3390/molecules26216359>
93. Kappel L., Kosa N., Gruber S. The multilateral efficacy of chitosan and *Trichoderma* on sugar beet. *Journal of Fungi*, 2022, vol. 8, no. 2, p. 137. <https://doi.org/10.3390/jof8020137>
94. Kolesnikov L.E., Popova E.V., Novikova I.I., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Kolesnikova Yu.R., Potrakhov N.N., Van Duijn B., Gusarenko A.S. Joint use of strains of microorganisms and chitosan complexes to increase the yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agricultural biology*, 2019, vol. 54, no. 5, pp. 1024–1040. (In Russian).
<https://doi.org/10.15389/agrobiol.2019.5.1024rus>
95. Şengül Demirak M.Ş., Canpolat E. Plant-Based Bioinsecticides for Mosquito Control: Impact on Insecticide Resistance and Disease Transmission. *Insects*, 2022, no. 13, p. 162. <https://doi.org/10.3390/insects13020162>
96. Fanning P.D., Grieshop M.J., Isaacs R. Efficacy of biopesticides on spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* Matsumura in fall red raspberries. *Journal of Applied Entomology*, 2017, vol. 142, no. 1-2, pp. 26–32.
<https://doi.org/10.1111/jen.12462>
97. Shahanaz M. R., Pathrose B., Chellappan M. A phagostimulant based bait composition for tobacco caterpillar *Spodoptera litura* (Fabricius)(Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Tropical Agriculture*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 54–58.
98. Piazzoni M., Negri A., Brambilla E., Giussani L., Pitton S., Caccia S., Lenardi C. Biodegradable floating hydrogel baits as larvicide delivery systems against mosquitoes. *Soft Matter*, 2022, vol. 18, no. 34, pp. 6443–6452.
<https://doi.org/10.1039/D2SM00889K>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Анна И. Хомяк разработала концепцию статьи, собрала материал и подготовила статью. Анжела М. Асатунова руководила процессом подготовки статьи, проверяла данные. Оба автора в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anna I. Homyak developed the concept of the article, collected materials and prepared the article. Anzhela M. Asaturova managed the preparation of the article and data verification. Both authors are equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Анна И. Хомяк / Anna I. Homyak <https://orcid.org/0000-0001-9360-2323>

Анжела М. Асатунова / Anzhela M. Asaturova <https://orcid.org/0000-0002-0060-1995>