

Влияние бактерий рода *Bacillus* на рост гриба *Fusarium graminearum* и накопление микотоксинов *in vitro*

В. В. АЛЛАХВЕРДЯН¹, Т. М. СИДОРОВА¹, А. З. ТЕМЕРДАШЕВ², А. М. АСАТУРОВА¹

¹Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, п/о 39, 350039, Российская Федерация

²Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью выявления эффективности применения *in vitro* штаммов ризосферных бактерий рода *Bacillus* для подавления роста гриба *Fusarium graminearum* и накопления микотоксинов. Для постановки экспериментов использовали штаммы *Bacillus siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 (тест-объект – гриб *F. graminearum* 60318) из биоресурсной коллекции Федерального научного центра биологической защиты растений «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов». Исследования проводили методом двойных культур, а также путем совместного культивирования бактерий и гриба на зерне пшеницы. Оценивали влияние жидкой культуры бактерий и культуральных супернатантов. Оба штамма *in vitro* подавляли рост гриба *F. graminearum* 60318 на 40...50 %. Бактериальные культуры в значительной степени влияли на накопление микотоксинов в зерновом субстрате. Жидкая культура и супернатант бактерий *B. siamensis* BZR 86 снижали содержание дезоксиниваленола – соответственно на 87 % и 79 %; *B. amyloliquefaciens* BZR 277 – на 92 % и 100 %. Жидкая культура штамма *B. amyloliquefaciens* BZR 277 уменьшала содержание зеараленона на 79 %, супернатант – на 68 %. Жидкая культура штамма *B. siamensis* BZR 86 незначительно снижала накопление зеараленона на 8 %, супернатант не оказывал влияния на величину этого показателя. Установленный *in vitro* высокий потенциал бактериальных штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 в защите растений от возбудителей фузариоза колоса и микотоксिनотой контаминации позволяет рекомендовать их для дальнейших исследований *in planta*.

Ключевые слова: биоконтроль, токсигенные грибы, *F. graminearum*, контаминация растений микотоксинами, дезоксиниваленол, зеараленон, биотрансформация.

Сведения об авторах: В. В. Аллахвердян, аспирант (e-mail: lera_arm@mail.ru); Т. М. Сидорова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник; А. З. Темердашев, кандидат химических наук, старший научный сотрудник; А. М. Асатунова, кандидат биологических наук, зав. лабораторией.

Для цитирования: Влияние бактерий рода *Bacillus* на рост гриба *Fusarium graminearum* и накопление микотоксинов *in vitro* // В. В. Аллахвердян, Т. М. Сидорова, А. З. Темердашев и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. №7. С. 42–48. doi: 10.53859/02352451_2024_38_7_42

Impact of *Bacillus* species on the growth of *Fusarium graminearum* and mycotoxin accumulation *in vitro*

V. V. Allakhverdyan¹, T. M. Sidorova¹, A. Z. Temerdashev², A. M. Asaturova¹

¹Federal Scientific Center for Biological Plant Protection, Krasnodar, p/o 39, 350039, Russian Federation

²Kuban State University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation

Abstract. The studies were conducted to determine the efficiency of using *in vitro* strains of rhizosphere bacteria of the genus *Bacillus* to suppress the growth of the fungus *Fusarium graminearum* and the accumulation of mycotoxins. For the experiments, we used the strains *Bacillus siamensis* BZR 86 and *B. amyloliquefaciens* BZR 277 (test object – fungus *F. graminearum* 60318) from the bioresource collection of the Federal Scientific Center for Biological Plant Protection “State Collection of Entomocariphages and Microorganisms”. The studies were conducted using the double culture method, as well as by joint cultivation of bacteria and fungus on wheat grain. The effect of liquid bacterial culture and culture supernatants on the production of mycotoxins by *F. graminearum* 60318 was determined by culturing the fungus together with the studied strain or by adding the bacterial supernatant. Both strains inhibited the growth of the fungus *F. graminearum* 60318 by 40–50% *in vitro*. Bacterial cultures significantly affected the accumulation of mycotoxins in the grain substrate. The liquid culture and supernatant of *B. siamensis* BZR 86 bacteria *in vitro* reduced the content of deoxynivalenol by 87% and 79%, respectively; *B. amyloliquefaciens* BZR 277 – by 92% and 100%. The liquid culture of the strain *B. amyloliquefaciens* BZR 277 reduced the content of zearalenone by 79%, the supernatant – by 68%. The liquid culture of the strain *B. siamensis* BZR 86 slightly reduced the accumulation of zearalenone by 8%, the supernatant did not affect the value of this indicator.

Keywords: biocontrol; toxigenic fungi; *F. graminearum*; plant contamination with mycotoxins; deoxynivalenol; zearalenone; biotransformation.

Author Details: V. V. Allakhverdyan, post graduate student (e-mail: lera_arm@mail.ru); T. M. Sidorova, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow; A. Z. Temerdashev, Cand. Sc. (Chem.), senior research fellow; A. M. Asaturova, Cand. Sc. (Biol.), head of laboratory.

For citation: Allakhverdyan VV, Sidorova TM, Temerdashev AZ et al. [Impact of *Bacillus* species on the growth of *Fusarium graminearum* and mycotoxin accumulation *in vitro*]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(7):42–8. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_7_42

Производство продукции растениеводства неизбежно сопряжено с защитой растений от болезней и вредителей. Многие патогены растений угрожают сельскому хозяйству, особенно производству зерновых. Фитопатогенные грибы, способные продуцировать микотоксины, не только снижают урожайность и питательные свойства зерна, но и контаминируют его опасными для здоровья соединениями. Среди микотоксигенных грибов род *Fusarium* наиболее распространен и представляет значительный риск [1, 2]. Продуцируемые ими микотоксины представляют собой небольшие токсичные молекулы, образующиеся в результате вторичного метаболизма. *F. graminearum* способен продуцировать дезоксиниваленол (ДОН) и

его производные – 15- и 3-АДОН, а также зеараленон (ЗЕН). Микотоксины представляют собой довольно стабильные молекулы, которые очень трудно удалить или разложить [3]. Они встречаются в пищевой цепи, сохраняя при этом токсичные свойства, могут вызывать острую и хроническую интоксикацию как у человека, так и у животных. Иммунотоксичность, вызванная воздействием этих микотоксинов в низких дозах, часто не вызывает явных клинических симптомов в организме, хотя все же может привести к серьезным проблемам со здоровьем у людей и животных. Показано, что ЗЕН и ДОН уменьшают количество лейкоцитов, а также нарушают соотношение лимфоцитов в селезенке и уровни цитокинов в сыворотке крови животных. В результате

происходит снижение иммунитета, необходимого для подавления патогенных микроорганизмов. Хотя у животных не всегда проявляются явные клинические симптомы после приема микотоксина, иммунный барьер против патогена может быть нарушен [4].

Поскольку контаминация микотоксинами может произойти до или после сбора урожая, одним из лучших способов снизить присутствие микотоксинов в продуктах питания и кормах считают предотвращение их образования в урожае. Неблагоприятное воздействие химических средств защиты растений на окружающую среду, а также на здоровье людей и животных, привело к поиску альтернативных и экологически безопасных решений, таких как комплексная защита от вредителей и использование агентов биологической борьбы, способных предотвратить или уменьшить рост грибов и накопление микотоксинов в растениях с помощью различных механизмов. Эти механизмы очень разнообразны и могут использоваться биоконтролирующим микроорганизмом вместе или по отдельности в зависимости от агента биоконтроля [5]. Основные прямые механизмы могут быть связаны с антибиозом, конкуренцией, паразитизмом или биотрансформацией токсина в защищаемых растениях. Антибиоз включает выработку вторичных метаболитов, таких как антибиотики, ферменты, разрушающие клеточную стенку, подавляющие рост фитопатогенов. Микроорганизмы могут вступать в пищевую конкуренцию, когда им требуется одно и то же необходимое питательное вещество, или в пространственную конкуренцию, когда они занимают одно и то же ограниченное пространство. Косвенные механизмы состоят в том, что колонизация растения полезными микроорганизмами может вызвать местные или системные защитные реакции растения, повышая устойчивость к фитопатогенам [6, 7].

Хотя продуцирование микотоксинов токсигенными микроорганизмами имеет экономическое значение, во многих исследованиях это не учитывают при изучении стратегий биологического контроля. Эти исследования ограничиваются фунгицидным или фунгистатическим действием биологического агента, в то время как его влияние на выработку микотоксинов часто игнорируют. Несмотря на длительные интенсивные исследования и некоторые многообещающие результаты, сегодня на рынке доступно лишь несколько агентов биоконтроля фитопатогенных грибов, причем для грибов *Fusarium*, например, в Европе доступны только *Pseudomonas chroomaphis* и *Pythium oligandrum* в виде коммерческих продуктов Cerall® (Belchim Crop Protection) и Polyversum® (Biopreparaty/De Sangosse) соответственно. Это может быть связано с многочисленными факторами (нестабильная эффективность биоконтроля фитопатогенных микроорганизмов в полевых условиях, строгие условия хранения и транспортировки биопрепарата, сложность его регистрации) и, что более важно, с отсутствием знаний о механизмах биоконтроля фитопатогенов, особенно токсинопродуцирующих грибов, контаминирующих растения микотоксинами [8]. Понимание механизмов, позволяющих осуществлять биоконтроль патогенов, необходимо при выборе новых агентов для разработки эффективных биофунгицидов. Методы биологической детоксикации в основном зависят от микробных ферментов, расщепляющих микотоксины. В последние годы

для деградации ЗЕН было использовано несколько штаммов, таких как *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. licheniformis*, *B. natto*, *Rhizopus* spp., *Aspergillus oryzae*, *Acinetobacter* sp. и *Saccharomyces cerevisiae* [9]. Они продуцируют множество типов ферментов, которые расщепляют ЗЕН, включая лактонгидролазу, пероксидазу и лакказы. Пути деградации микотоксинов в основном включают восстановление кетон-карбонила, модификацию фенольных гидроксильных групп, гидролиз лактонного кольца и расщепление дифенол-бензольного кольца. Несмотря на важные достижения в области микробной детоксикации, относительно мало исследований было сосредоточено на выяснении механизма разложения микотоксинов [10].

Bacillus spp. эффективны в качестве агентов биоконтроля против патогенов растений, прежде всего, благодаря продукции различных циклических липопептидов [11]. Все они имеют общую структуру, состоящую из липидного хвоста, связанного с коротким циклическим пептидом. Среди липопептидов итурин и фенгицин обладают противогрибной активностью, тогда как сурфактин не проявляет заметной фунгитоксичности. Итурин образует ионопроводящие поры, которые увеличивают электрическую проводимость липидных мембран. Также известно, что итурин нарушает цитоплазматические мембраны дрожжевых клеток, вызывая утечку ионов K^+ и других жизненно важных компонентов параллельно с гибелью дрожжевых клеток. Итурин может быть использован для биологического контроля фузариоза колоса пшеницы и низкие уровни итурина на колосьях пшеницы могут быть основным фактором, ограничивающим контроль болезни. Фенгицин часто вызывает порообразование мембран, низкие концентрации фенгицина не оказывают воздействия на мембрану, тогда как при достаточно высоких концентрациях он создает поры, что позволяет полностью оттекать межклеточному содержимому пораженных клеток [11].

Ранее было обнаружено, что бактерии штаммов *B. velezensis* BZR 336g и *B. velezensis* BZR 517 в значительной степени подавляют *in vitro* рост гриба *F. graminearum* и контаминацию зерна ДОН и ЗЕН, что, вероятно, может обусловлено их способностью продуцировать набор антигрибных метаболитов [12]. Методами тонкослойной хроматографии и биоавтографии с тест-культурой гриба *F. oxysporum* var. *orthoceras*, а также ВЭЖХ-МС показано, что бактерии штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 также синтезируют при культивировании антигрибные соединения липопептидной природы (итурин, сурфактин и фенгицин) [13]. Эти метаболиты имеют амфифильную природу и действуют, нарушая биологические мембранные структуры. Эффективное совместное производство всех трех семейств липопептидов выгодно в связи с тем, что липопептиды разных структур могут, синергетически влияя друг на друга, повышать биологическую активность. Это свойство встречается у наиболее активных изолятов бактерий рода *Bacillus*, представленных на рынке в качестве агентов биологической борьбы. Итурины и фенгицины в основном известны сильной противогрибной активностью в отношении некоторых патогенных грибов растений. Кроме того, итуриноподобный микосубтилин, бацилломицин R, субтулен А и эумицин проявляют антибактериальные свойства. В отличие от итуринов и фенгицинов, сурфактины в

основном проявляют противовирусную и антибактериальную активность, однако способны усиливать антигрибные свойства итуринов и фенгицинов [14]. Поскольку все больше исследователей уделяют внимание биодетоксикации, необходимы данные об антигрибных и деконтаминирующих свойствах новых бактериальных штаммов, которые могут быть рекомендованы в качестве продуцентов биофунгицидов.

Цель исследования – выявление эффективности применения *in vitro* штаммов ризосферных бактерий рода *Bacillus* для подавления роста гриба *F. graminearum* и накопления микотоксинов.

Условия, материалы и методы. Объекты исследований – штаммы бактерий *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 из БРК ФГБНУ ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов». Тест-объект – грибной штамм *F. graminearum* 60318 из «Государственной коллекции микроорганизмов, патогенных для растений и их вредителей» Федерального научного центра биологической защиты растений (ФГБНУ ФНЦБЗР). Исследования проводили в лаборатории микробиологической защиты растений с использованием материально-технической базы Уникальной научной установки «Технологическая линия для получения микробиологических средств защиты растений нового поколения» (<https://ckp-rf.ru/usu/671367/>).

Культивирование бактерий осуществляли на оптимизированной питательной среде. Жидкая культура (ЖК) на основе штамма бактерий получена в ротационных шейкерах-инкубаторах New Brunswick Scientific Excella E25 в условиях периодического культивирования. Культивирование проводили в колбах объемом 1000 мл (объем питательной среды 300 мл) при 180 об/мин, + 25,0 °C и pH 7,0 в течение 48 часов [15].

Для оценки фунгицидной активности ЖК бактерий вносили в чашку Петри по 1,0 мл, добавляли по 9,0 мл охлажденной до 37,0...40,0 °C агаризованной оптимизированной питательной среды и после застывания инокулировали поверхность среды тест-культурой гриба *F. graminearum* 60318. Фунгицидную активность бактериальных штаммов определяли по степени развития тест-культуры, в сравнении с контролем, при температуре 26,0 °C. Контроль – тест-культура гриба *F. graminearum* 60318, посеянная на агаризованную среду. Учеты проводили на 5, 10, 15 и 20 сутки.

Расчет ингибирования гриба проводили по формуле [16]:

$$N = (1 - (A/B)) \times 100 \%,$$

где N – ингибирование роста колонии патогена, %; A – диаметр роста гриба в варианте с ЖК бактерий, см; B – диаметр роста гриба в контроле, см.

Влияние ЖК бактерий и культуральных супернатантов на продукцию микотоксинов *F. graminearum* 60318 наблюдали путем культивирования гриба совместно с исследуемым штаммом. Для этого 100 г здорового зерна пшеницы смешивали с 10 мл дистиллированной воды, дробно автоклавируют и смешивали с 2 мл ЖК либо супернатанта бактерий и 1 мл суспензии конидий гриба *F. graminearum* 60318. Для получения суспензии конидий *F. graminearum* 60318 мицелий инкубировали в среде, содержащей 7,5 г карбоксиметилцеллюлозы, 0,5 г NH_4NO_3 , 0,5 г KH_2PO_4 , 0,25 г $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и 0,5 г дрожжевого экстракта в 1000 мл дистиллированной воды в течение 7 дней при 25 °C при встряхивании со скоростью 150 об/мин [17]. В контрольной колбе ЖК или супернатант бактерий заменяли дистиллированной водой.

После инкубации при 25 °C в течение 18 дней и высушивания содержимое колб анализировали на содержание ДОН и ЗЕН методом ВЭЖХ [18]. Для чего навеску массой 1 г экстрагировали 5 мл смеси вода:ацетонитрил (2:3, v:v) с использованием орбитального шейкера в течение 5 мин, после чего центрифугировали с использованием центрифуги Hettich micro 220R 15 мин при 3000 об/мин с последующим переносом 1 мл супернатанта в стеклянную вialу. Анализ проводили с использованием квадруполь-времяпролетного масс-спектрометра Bruker MaXis Impact, оснащенного источником электроэрозионной ионизации в режиме положительных ионов. Разделение на колонке Phenomenex Kinetex C18 (2,1×75 мм, 2,6 мкм размер частиц сорбента), скорость потока подвижной фазы – 0,4 мл/мин, температура термостата – 40 °C. Состав подвижной фазы – вода, подкисленная муравьиной кислотой, и ацетонитрил. Градиентное элюирование, состав исходной подвижной фазы – 95 % воды, 5 % ацетонитрила, плато 1 мин с последующим увеличением ацетонитрила до 90 % за 3 мин, плато при этом составе элюента 3 мин, возврат к первой ступени элюента за 0,2 мин с регенерацией в течение 1 мин. Анализ полученных хроматограмм проводили с использованием программного обеспечения Bruker Compass Data Analysis 4.1.

Повторность во всех опытах трёхкратная, статистическую обработку данных осуществляли с использованием стандартных компьютерных программ

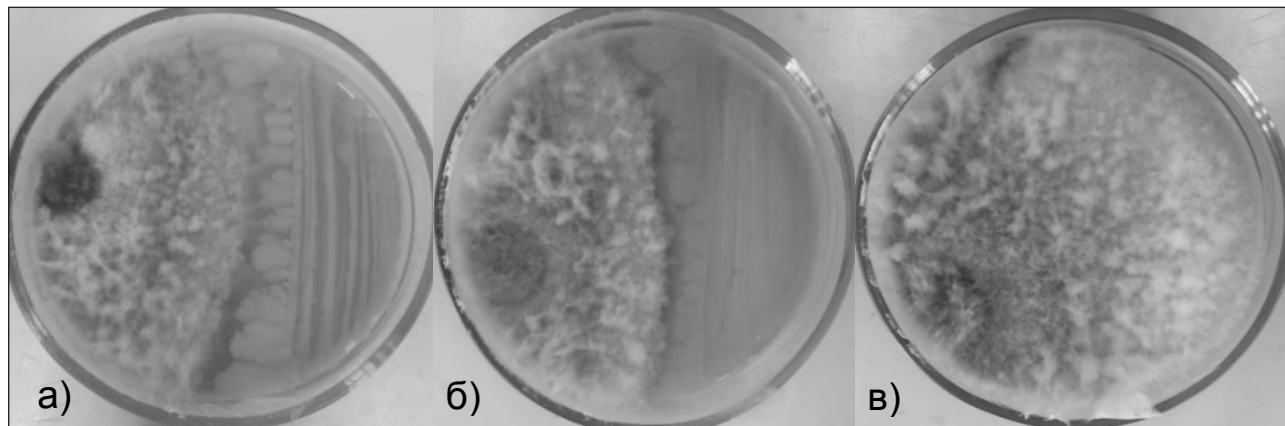


Рис. 1. Антигрибная активность бактерий рода *Bacillus* в отношении штамма *F. graminearum* 60318: а – *B. siamensis* BZR 86; б – *B. amyloliquefaciens* BZR 277; в – контроль (*F. graminearum* 60318 без бактерий).

и программы Statistica 13.3. Для сравнения опытных вариантов с контрольными применяли метод Дункана (при уровне вероятности 95 %).

Результаты и обсуждение. Бактерии штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 в значительной степени ингибируют рост гриба штамма *F. graminearum* 60318 в двойных культурах (рис. 1). Визуальный анализ зон взаимодействия гриба и бактерий позволяет сделать вывод о специфичности влияния как бактерий на рост гриба, так и гриба на бактерии. Бактерии *B. siamensis* BZR 86 в большей степени ингибируют рост грибного мицелия (см. рис. 1а). При этом гриб *F. graminearum* 60318 оказывает стимулирующее воздействие на рост штамма *B. amyloliquefaciens* BZR 277 (см. рис. 1б).

Причем штамм *B. amyloliquefaciens* BZR 277 на 10-е сутки ингибирует рост мицелия гриба более, чем наполовину, для штамма *B. siamensis* BZR 86 это подавление отмечено на уровне 61 % (рис. 2). К 15-ым суткам ингибирование незначительно снижается, по сравнению с 10-ми сутками.

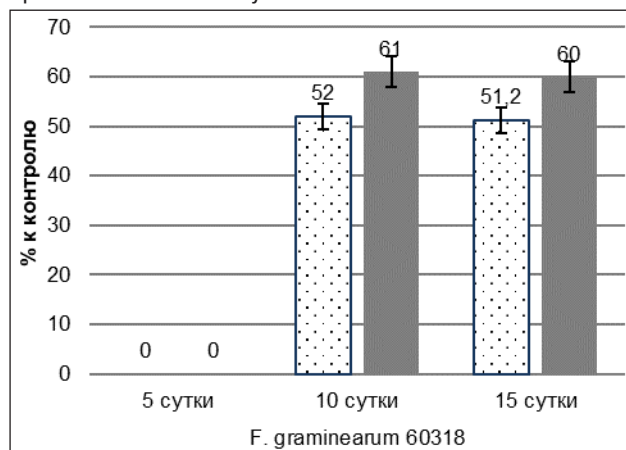


Рис. 2. Ингибирование роста гриба *F. graminearum* 60318 бактериями рода *Bacillus* (двойные культуры), % к контролю: – *B. amyloliquefaciens* BZR 277, – *B. siamensis* BZR 86.

Бактерии рода *Bacillus* – востребованные кандидаты в качестве агентов биоконтроля не только благодаря своей способности активно размножаться и устойчивости к неблагоприятным условиям окружающей среды, но и антагонистической активности этого рода бактерий, которая связана с продукцией метаболитов с антибиотическими свойствами. Штаммы *Bacillus* известны способностью продуцировать широкий спектр сильнодействующих антимикробных липопептидов, включая итурины, сурфактины, фенгицины, полимиксины и др., оказывающие широкое воздействие на фитопатогены [19]. Активность биоконтроля микробного штамма может быть опосредована его вторичными метаболитами. Чем больше метаболитов вырабатывает штамм, тем выше эффективность биоконтроля. Штаммы *Bacillus* продуцируют разные группы липопептидов, и их роль в подавлении роста фитопатогенов может различаться. Подобные липопептиды, продуцируемые различными штаммами *Bacillus*, могут подавлять и контролировать патогены,

имеющие экономическое значение. Антагонистический эффект штамма *B. Subtilis* NCD-2, мутанта с дефицитом фенгицина, был эффективен против *R. solani in vitro* и подавляет болезнь вымирания хлопка *in vivo*. Кроме того, *B. Amyloliquefacien* CM-2 и T-5 демонстрируют свою антагонистическую активность против бактерии *R. solanacearum* у томатов [19]. Оба штамма подавляют патоген более чем на 70 %, по сравнению с контролем. С другой стороны, сырые липопептидные экстракты *B. amyloliquefaciens* SS-12.6 успешно подавляют пятнистости листьев растений сахарной свеклы. Во многих исследованиях сообщается о применении бактерий рода *Bacillus* в качестве средства биологической борьбы с *F. graminearum* на различных сельскохозяйственных культурах [20, 21, 22]. Эти исследования показывают значительный антагонизм различных штаммов *Bacillus* против патогенов. Однако полностью не раскрыт потенциал различных штаммов бактерий *Bacillus*, поэтому их необходимо дополнительно изучать как продуценты средств биоконтроля против патогенных микроорганизмов. Бактерии штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 также способны продуцировать антигрибные метаболиты [13], что, вероятно, способствует усилению их ингибирующей способности роста токсигенного гриба *F. graminearum*.

Данные, полученные нами, в полной мере подтверждают результаты по изучению *in vitro* антигрибного и деконтаминирующего потенциала бактерий штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277. При визуальной оценке совместного роста гриба и бактерий на зерне пшеницы обнаружено, что как ЖК, так и супернатант штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 сдерживают рост фитопатогенного гриба *F. graminearum* 60318.

Изучено влияние бактерий *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 на накопление ДОН и ЗЕН грибом *F. graminearum* 60318 при культивировании *in vitro* на зерне пшеницы. Оба исследуемых штамма *Bacillus* снижают содержание ДОН и ЗЕН, которые синтезировал гриб *F. graminearum* 60318 при культивировании *in vitro* на зерне пшеницы. Причем этот результат зависит как от штамма *Bacillus*, так и от используемой бактериальной фракции (ЖК или супернатант).

Обнаруженная у штамма *B. siamensis* BZR 86 способность снижать накопление ДОН статистически недостоверна. Это было характерно как для ЖК, так и для супернатанта. ЖК штамма *B. amyloliquefaciens* BZR 277 практически полностью деконтаминирует от ДОНа зерно *in vitro*, супернатант этого же штамма оказывает на ДОН слабое влияние. Причем эти результаты статистически достоверны. Влияние штаммов на содержание ЗЕН также зависит от варианта опыта. У штамма *B. siamensis* BZR 86 супернатант

Таблица. Влияние бактерий рода *Bacillus* на накопление микотоксинов гриба *F. graminearum* 60318 *in vitro*

Вариант	Содержание, мкг/г	
	ДОН	ЗЕН
Контроль (чистое зерно)	0 ^{a*}	0 ^a
<i>F. graminearum</i> 60318	54 ^b	173 ^c
<i>F. graminearum</i> 60318 + ЖК <i>B. siamensis</i> BZR 86	7 ^{ab}	173 ^e
<i>F. graminearum</i> 60318 + супернатант <i>B. siamensis</i> BZR 86	11 ^{ab}	136 ^{cde}
<i>F. graminearum</i> 60318 + ЖК <i>B. amyloliquefaciens</i> BZR 277	0 ^a	36 ^{ab}
<i>F. graminearum</i> 60318 + супернатант <i>B. amyloliquefaciens</i> BZR 277	45 ^c	55 ^{ab}

*между вариантами, отмеченными одинаковыми буквами, при сравнении внутри столбцов нет статистически значимых различий по критерию Дункана при уровне вероятности 95 %.

незначительно (до 45 %) подавляет содержание ЗЕН. Бактерии штамма *B. amyloliquefaciens* BZR 277 *in vitro* достоверно снижают содержание ЗЕН более чем в 5 раз (см. табл.).

Полученные данные позволяют сделать вывод о различии механизмов действия исследуемых штаммов бактерий *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 на содержание микотоксинов. Возможно, что бактерии в разной степени воздействуют на рост и токсинотродную активность гриба. Так, способность ЖК бактерий *B. amyloliquefaciens* BZR 277 полностью подавлять накопление ДОН и значительно ингибировать содержание ЗЕН может свидетельствовать о том, что этот штамм ингибирует рост гриба. Продуктируемые бактериями *B. amyloliquefaciens* BZR 277 антигрибные метаболиты в меньшей степени влияют на содержание микотоксинов. Для штамма *B. siamensis* BZR 86 эти закономерности выглядят иначе – супернатант в большей степени, чем жидкая культура подавляет содержание обоих микотоксинов. Можно предположить, у этого штамма антигрибным метаболитам принадлежит основная роль в деконтаминации как из-за ингибирования роста гриба, так и подавляющего воздействия на ферменты биодegradации синтезированных токсичных соединений, что требует дальнейшего изучения.

Известно о способности некоторых бактериальных штаммов осуществлять деконтаминацию микотоксинами растительной продукции [23, 24]. Совместное присутствие микотоксинов в продукте вызывает серьезную озабоченность, поскольку из-за их синергетического взаимодействия неблагоприятное воздействие на здоровье может усиливаться, что в значительной степени повышает актуальность исследований. Однако многие авторы сообщают, что производные ДОН (ДОН-3-глюкозид, 3-ацетил-дезоксиниваленон, 15-ацетил-дезоксиниваленон) и производные ЗЕН (α -зеараленон, β -зеараленон) имеют меньшую токсичность [25]. Многие исследователи показывают, что дезоксиниваленон, зеараленон, фуномизин В1, инкубированные *in vitro* с содержимым микроорганизмов, исчезают в течение 24 ч [26]. Впоследствии было подтверждено, что микроорганизмы способны полностью трансформировать микотоксины в другие производные.

Так, штаммы *Pseudomonas* sp. Y1 и *Lysobacter* sp. S1, выделенные из образцов почвы, могут превращать ДОН в 3-кето-ДОН или 3-эпи-ДОН, менее токсичное производное. Несколько исследователей обнаружили, что эти штаммы приводят к снижению уровня ДОН на 74...100 %. Бактериальные изоляты LS100 и SS3, бактериальный штамм BBSH 797 и *Eggerthella* sp. DII-9 обладают высокой биотрансформационной активностью по превращению ДОН в диэпоксид-дезоксиниваленон. Штаммы, выделенные из образцов почвы, а именно *B. subtilis* ASAG 216 и *Aspergillus* (NJA-1), показывают снижение концентрации ДОН на 81,1 % и 94,4 %. Микроорганизмы метаболизируют ЗЕН главным образом путем превращения или разложения до α -зеараленола, β -зеараленола, сульфата и других вторичных метаболитов с низкой токсичностью [25]. Штамм *B. pumilus* ES-21 также разлагает ЗЕН с помощью активной эстеразы [26].

За последнее десятилетие знания о новых организмах и метаболических путях биологической деградации микотоксинов быстро возросли. Отслеживание судьбы преобразованных продуктов микотоксинов, образующихся в результате метаболизма живых организмов или ферментативной реакции, необходимо при соз-

дании биофунгицидов коммерческого применения. Однако в большинстве исследований сообщается о предварительном изучении способности к разложению без характеристики промежуточных метаболитов и конечных продуктов, которые иногда с трудом поддаются анализу в лабораторных условиях. Полное понимание структуры и стабильности продуктов разложения может предоставить полезную информацию для оценки их потенциальных побочных эффектов и воздействия на здоровье. Необходимо разработать новые стратегии для выяснения путей биоразложения. Таким образом, влияние каждого бактериального штамма на токсигенный гриб и его токсичные метаболиты может быть различным, поэтому необходимо исследовать потенциал каждого штамма. Полученные в данном исследовании результаты вселяют оптимизм относительно возможности использования бактерий штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 в качестве агентов биоконтроля фузариоза пшеницы озимой и контаминации микотоксинами. Продуктируемые бактериями вторичные метаболиты могут активировать защитную реакцию растения. Исследования по изучению потенциала бактериальных штаммов для защиты пшеницы озимой от болезней, вызываемых фузариевыми грибами, а также механизма действия бактерий на фитопатогенный гриб и его токсичные метаболиты продолжаются. Комплексное управление болезнями, основанное на микробных фунгицидах, считается особенно многообещающей стратегией, которую следует изучать в будущем [25, 27].

Выводы. Штаммы *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 *in vitro* на 40...50 % подавляют рост токсигенного гриба *F. graminearum*, что, вероятно, обусловлено их способностью продуцировать набор антигрибных метаболитов. ЖК и супернатант обоих штаммов бактерий *in vitro* снижают контаминацию зернового субстрата ДОН и ЗЕН. Жидкая культура и супернатант бактерий *B. siamensis* BZR 86 уменьшают содержание ДОН – соответственно на 87 % и 79 % *B. amyloliquefaciens* BZR 277 – на 92 % и 100 %. ЖК штамма *B. amyloliquefaciens* BZR 277 снижает концентрацию зеараленона на 79 %, супернатант – на 68 %. ЖК штамма *B. siamensis* BZR 86 незначительно влияет на накопление ЗЕН (подавление на 8 %), супернатант не оказывает воздействия на величину этого показателя.

Высокий потенциал бактериальных штаммов *B. siamensis* BZR 86 и *B. amyloliquefaciens* BZR 277 для защиты растений от возбудителей фузариоза колоса и контаминации микотоксинами, установленный *in vitro*, дает возможность рекомендовать их для проведения исследований *in planta*. По результатам полевого опыта будет принято решение о целесообразности использования этих штаммов в качестве агентов биофунгицидов для защиты растений пшеницы от заражения грибом *F. graminearum*.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Исследования выполнены согласно Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № 0495-2019-0005

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Comparison of *Bacillus* strains against *Fusarium graminearum* in vitro and in planta / C. Jimenez-Quiros, E. C. Okeschukwu, Y. Hong, et al. // *Plants*. 2022. Vol. 11. No. 15. Article 1999. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/15/1999> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3390/plants11151999.
2. Характеристика сортов озимой пшеницы по устойчивости к фузариозу зерна / Т. Ю. Гагкаева, А. С. Орина, О. П. Гаврилова и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018. Т. 22. № 6. С. 685–692. doi: 10.18699/VJ18.411.
3. Biocontrol rhizobacteria enhances growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) under field conditions against *Fusarium oxysporum* / S. I. Agha, M. Ullah, A. Khan, et al. // *Bioengineered*. 2023. Vol. 14. No. 1. Article 2260923. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21655979.2023.2260923> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1080/21655979.2023.2260923.
4. Zearalenone and deoxynivalenol reduced Th1 – cellular immune response after *Listeria monocytogenes* infection by inhibiting CD4+ T cell activation and differentiation / G. Cai, S. Xia, F. Zhong, et al. // *Env. Pollution*. 2021. Vol. 284. Article 117514. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121010964> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1016/j.envpol.2021.117514.
5. Functional characterization of potential PGPR exhibiting broad-spectrum antifungal activity / S. Ali, S. Hameed, M. Shahid, et al. // *Microbiological research*. 2020. Vol. 232. P. 126–139. doi: 10.1016/j.micres.2019.126389.
6. 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. № 3. С. 421–438. doi: 10.15389/agrobiology2020.3.42rus.
7. Commercial biocontrol agents reveal contrasting components against two mycotoxigenic fungi in cereals: *Fusarium graminearum* and *Fusarium verticillioides* / L. Pellán, N. Durand, V. Martinez, et al. // *Toxins*. 2020. Vol. 12. No. 3. Article 152. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/12/3/152> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3390/toxins12030152.
8. Strategies and methodologies for developing microbial detoxification systems to mitigate mycotoxins / Y. Zhu, Y. I. Hassan, S. Shao, et al. // *Toxins*. 2017. Vol. 9. No. 4. Article 130. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/9/4/130> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3390/toxins9040130.
9. In vitro degradation of zearalenone by culture supernatant of *Bacillus subtilis* / M. X. Xiang, P. Liu, H. Zhang, et al. // *Food bioprocess technol.* 2023. Vol. 17. P. 2206–2215. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-023-03254-3> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1007/s11947-023-03254-3.
10. Whole-genome sequencing and phylogenomic analyses of a novel zearalenone-degrading *Bacillus subtilis* B72 / K. Li, J. Jia, Q. Xu, et al. // *Biotech*. 2023. Vol. 13. P. 103–118. doi: 10.1007/s13205-023-035517-y.
11. Перспективы применения бактерий-продуцентов липопептидов для защиты растений (обзор) / И. В. Максимов, Б. П. Сингх, Е. А. Черепанова и др. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2020. Т. 56. № 1. С. 19–34. doi: 10.31857/S0555109920010134.
12. Аллахвердян В. В., Сидорова Т. М., Асатурова А. М. Перспективные штаммы бактерий рода *Bacillus* в защите растений от возбудителей фузариоза и контаминации микотоксинами // *Юг России: экология, развитие*. 2022. Т. 17. № 2. С. 91–101. doi: 10.18470/1992-1098-2022-2-91-101.
13. Изучение новых перспективных штаммов бактерий-антагонистов рода *Bacillus* для повышения эффективности биопрепаратов фунгицидного действия на их основе / Н. С. Томашевич, Т. М. Сидорова, В. В. Аллахвердян и др. // *Юг России: экология, развитие*. 2023. Т. 18. № 2 (67). С. 70–81. doi: 10.18470/1992-1098-2023-2-70-81.
14. Caulier S., Nannan C., Gillis A., et al. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group // *Front. Microbiol.* 2019. Vol. 10. Article 302. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.00302/full> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3389/fmicb.2019.00302.
15. Montealegre J. R., Reyes R., Perez L. M. Selection of antagonists to be used in biological control of *Rhizoctonia solani* in tomato // *Electronic Journal of Biotechnology*. 2003. Vol. 6. No. 2. P. 116–127.
16. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat grains using bacterial antagonisms / K. Shi, P. Yang, J. Li, et al. // *International journal of environmental research and public health*. 2014. Vol. 11. No. 1. P. 1094–1105. doi: 10.3390/ijerph110101094.
17. Тринеева О. В. Методы и перспективы определения микотоксинов в лекарственном растительном сырье // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2020. Т. 9. С. 67–109. doi: 10.33380/2305-2066-2020-9-3-67-109.
18. The mode of action of *Bacillus* species against *Fusarium graminearum*, tools for investigation and future prospects / K. Ntushelo, L. K. Ledwaba, M. E. Rauwane, et al. // *Toxins*. 2019. Vol. 11. No. 10. Article 606. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/11/10/606> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3390/toxins11100606.
19. Optimization of laboratory cultivation conditions for the synthesis of antifungal metabolites by *Bacillus subtilis* strains / T. M. Sidorova, A. M. Asaturova, A. I. Homyak, et al. // *Saudi journal of biological sciences*. 2020. Vol. 27. No. 7. P. 1879–1885. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20301728> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1016/j.sjbs.2020.05.002.
20. Fujita S., Yokota K. Disease suppression by the cyclic lipopeptides iturin A and surfactin from *Bacillus* spp. against *Fusarium* wilt of lettuce // *J Gen Plant Pathol.* 2019. Vol. 85. P. 44–48. doi: 10.1007/s10327-018-0816-1.
21. Сидорова Т. М., Асатурова А. М., Аллахвердян В. В. Особенности антагонизма бактерий рода *Bacillus* по отношению к токсигенным грибам *Fusarium* при защите растений от болезни и контаминации микотоксинами (обзор) // *Юг России: экология, развитие*. 2021. Т. 16. № 4. С. 86–103. doi: 10.18470/1992-1098-2021-4-86-103.
22. Characterization of *Bacillus amyloliquefaciens* DA 12 showing potent antifungal activity against mycotoxigenic *Fusarium* species / T. Lee, D. Park, K. Kim, et al. // *Plant pathology journal*. 2017. Vol. 33. No. 5. P. 499–507. doi: 10.5423/PPJ.
23. Isolation, Identification, and complete genome assembly of an endophytic *Bacillus velezensis* YB-130, potential biocontrol agent against *Fusarium graminearum* / W. Xu, L. Zhang, P. H. Goodwin, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 11. Article 598285. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.598285/full> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.3389/fmicb.2020.598285.
24. Invited review: remediation strategies for mycotoxin control in feed / M. Liu, L. Zhao, G. Gong, et al. // *Journal of animal science and biotechnology*. 2022. Vol. 13. Article 19. URL: <https://jasbsci.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40104-021-00661-4> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1186/s40104-021-00661-4.
25. The ability of *Bacillus subtilis* and *Bacillus natto* to degrade zearalenone and its application in food / J. Ju, S. E. Tinyiro, W. Yao, et al. // *Food processing and preservation*. 2019. URL: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.14122> (дата обращения: 29.04.2024). doi: 10.1111/jfpp.14122.
26. Esterase activity inspired selection and characterization of zearalenone degrading bacteria *Bacillus pumilus* ES-21 / G. Wang, M. Yu, F. Dong, et al. // *Food control*. 2017. Vol. 77. P. 57–64. doi: 10.1016/j.foodcont.2017.01.021.
27. Review: Biotechnology of mycotoxins detoxification using microorganisms and enzymes / F. B. Taheur, B. Kouidhi, Y. M. A. Al Qurashi, et al. // *Toxicon*. 2019. Vol. 160. P. 12–22. doi: 10.1016/j.toxicon.2019.02.001.

References

- Jimenez-Quiros C, Okechukwu EC, Hong Y, et al. Comparison of *Bacillus* strains against *Fusarium graminearum* in vitro and in planta. *Plants* [Internet]. 2022 [cited 2024 Apr 29];11(15): Article 1999. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/15/1999>. doi: 10.3390/plants11151999.
- Gagkaeva TYu, Orina AS, GavriloVA OP, et al. [Characteristics of winter wheat varieties by resistance to *Fusarium* wilt]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*. 2018;22(6):685-92. Russian. doi: 10.18699/VJ18.411.
- Agha SI, Ullah M, Khan A, et al. Biocontrol rhizobacteria enhances growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) under field conditions against *Fusarium oxysporum*. *Bioengineered* [Internet]. 2023 [cited 2024 Apr 29];14(1): Article 2260923. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21655979.2023.2260923>. doi: 10.1080/21655979.2023.2260923.
- Cai G, Xia S, Zhong F, et al. Zearalenone and deoxynivalenol reduced Th1 – cellular immune response after *Listeria monocytogenes* infection by inhibiting CD4+ T cell activation and differentiation. *Env. Pollution* [Internet]. 2021 [cited 2024 Apr 29];284: Article 117514. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121010964>. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117514.
- Ali S, Hameed S, Shahid M, et al. Functional characterization of potential PGPR exhibiting broad-spectrum antifungal activity. *Microbiological research*. 2020;232:126-39. doi: 10.1016/j.micres.2019.126389.
- Pavlyushin VA, Novikova II, Boikova IV. [Microbiological protection of plants in technologies of phytosanitary optimization of agroecosystems: Theory and practice (review)]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2020;55(3):421-38. Russian. doi: 10.15389/agrobiologiya2020.3.42/rus.
- Pellan L, Durand N, Martinez V, et al. Commercial biocontrol agents reveal contrasting components against two mycotoxigenic fungi in cereals: *Fusarium graminearum* and *Fusarium verticillioides*. *Toxins* [Internet]. 2020 [cited 2024 Apr 29];12(3): Article 152. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-6651/12/3/152>. doi: 10.3390/toxins12030152.
- Zhu Y, Hassan YI, Shao S, et al. Strategies and methodologies for developing microbial detoxification systems to mitigate mycotoxins. *Toxins* [Internet]. 2017 [cited 2024 Apr 29];9(4): Article 130. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-6651/9/4/130>. doi: 10.3390/toxins9040130.
- Xiang MX, Liu P, Zhang H, et al. In vitro degradation of zearalenone by culture supernatant of *Bacillus subtilis*. *Food bioprocess technol* [Internet]. 2023 [cited 2024 Apr 29];17:2206-15. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-023-03254-3>. doi: 10.1007/s11947-023-03254-3.
- Li K, Jia J, Xu Q, et al. Whole-genome sequencing and phylogenomic analyses of a novel zearalenone-degrading *Bacillus subtilis* B72. *Biotech*. 2023;13:103-18. doi: 10.1007/s13205-023-03551-y.
- Maksimov IV, Singkh BP, Cherepanova EA, et al. [Prospects for the use of lipopeptide-producing bacteria for plant protection (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2020;56(1):19-34. Russian. doi: 10.31857/S0555109920010134.
- Allakhverdyan VV, Sidorova TM, Asaturova AM. [Promising strains of *Bacillus* bacteria in plant protection against *Fusarium* pathogens and mycotoxin contamination]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2022;17(2):91-101. Russian. doi: 10.18470/1992-1098-2022-2-91-101.
- Tomashevich NS, Sidorova TM, Allakhverdyan VV, et al. [Study of new promising strains of antagonist *Bacillus* bacteria to improve the efficiency of fungicidal biopreparations based on them]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2023;18(2):70-81. Russian. doi: 10.18470/1992-1098-2023-2-70-81.
- Caulier S, Nannan C, Gillis A, et al. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group. *Front. Microbiol* [Internet]. 2019 [cited 2024 Apr 29];10: Article 302. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.00302/full>. doi: 10.3389/fmicb.2019.00302.
- Montealegre JR, Reyes R, Perez LM. Selection of antagonists to be used in biological control of *Rhizoctonia solani* in tomato. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2003;6(2):116-27.
- Shi K, Yang P, Li J, et al. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat grains using bacterial antagonisms. *International journal of environmental research and public health*. 2014;11(1):1094-105. doi: 10.3390/ijerph110101094.
- Trineeva OV. [Methods and prospects for determining mycotoxins in medicinal plant materials]. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*. 2020;9:67-109. Russian. doi: 10.33380/2305-2066-2020-9-3-67-109.
- Ntushelo K, Ledwaba LK, Rauwane ME, et al. The mode of action of *Bacillus* species against *Fusarium graminearum*, tools for investigation and future prospects. *Toxins* [Internet]. 2019 [cited 2024 Apr 29];11(10): Article 606. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-6651/11/10/606>. doi: 10.3390/toxins11100606.
- Sidorova TM, Asaturova AM, Hornyak AI, et al. Optimization of laboratory cultivation conditions for the synthesis of antifungal metabolites by *Bacillus subtilis* strains. *Saudi journal of biological sciences* [Internet]. 2020 [cited 2024 Apr 29];27(7):1879-85. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X20301728>. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.05.002.
- Fujita S, Yokota K. Disease suppression by the cyclic lipopeptides iturin A and surfactin from *Bacillus* spp. against *Fusarium* wilt of lettuce. *J Gen Plant Pathol*. 2019;85:44-8. doi: 10.1007/s10327-018-0816-1.
- Sidorova TM, Asaturova AM, Allakhverdyan VV. [Features of antagonism of *Bacillus* bacteria in relation to toxinogenic fungi *Fusarium* in plant protection from disease and contamination with mycotoxins (review)]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2021;16(4):86-103. Russian. doi: 10.18470/1992-1098-2021-4-86-103.
- Lee T, Park D, Kim K, et al. Characterization of *Bacillus amyloliquefaciens* DA 12 showing potent antifungal activity against mycotoxigenic *Fusarium* species. *Plant pathology journal*. 2017;33(5):499-507. doi: 10.5423/PPJ.
- Xu W, Zhang L, Goodwin PH, et al. Isolation, Identification, and complete genome assembly of an endophytic *Bacillus velezensis* YB-130, potential biocontrol agent against *Fusarium graminearum*. *Frontiers in Microbiology* [Internet]. 2020 [cited 2024 Apr 29];11: Article 598285. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.598285/full>. doi: 10.3389/fmicb.2020.598285.
- Liu M, Zhao L, Gong G, et al. Invited review: remediation strategies for mycotoxin control in feed. *Journal of animal science and biotechnology* [Internet]. 2022 [cited 2024 Apr 29];13: Article 19. Available from: <https://jasbsci.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40104-021-00661-4>. doi: 10.1186/s40104-021-00661-4.
- Ju J, Tinyiro SE, Yao W, et al. The ability of *Bacillus subtilis* and *Bacillus natto* to degrade zearalenone and its application in food. *Food processing and preservation* [Internet]. 2019 [cited 2024 Apr 29]. Available from: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.14122>. doi: 10.1111/jfpp.14122.
- Wang G, Yu M, Dong F, et al. Esterase activity inspired selection and characterization of zearalenone degrading bacteria *Bacillus pumilus* ES-21. *Food control*. 2017;77:57-64. doi: 10.1016/j.foodcont.2017.01.021.
- Taheur FB, Kouidhi B, Al Qurashi YMA, et al. Review: Biotechnology of mycotoxins detoxification using microorganisms and enzymes. *Toxicon*. 2019;160:12-22. doi: 10.1016/j.toxicon.2019.02.001.

Поступила в редакцию 28.05.2024 После доработки 20.06.2024 Принята к публикации 09.07.2024