

МИКРОБИОЛОГИЯ И ВИРУСОЛОГИЯ

Статья поступила в редакцию: 19.06.2026

Статья принята к публикации: 04.07.2026

Статья опубликована: 07.08.2026

УДК 632.937

DOI: 10.32743/UniChem.2026.146.8.23139

Скрининг перспективных биоагентов против вирулентных фитопатогенов хлопчатника и статистическая оценка их эффективности

Алиев Зафар Зокирович

докторант (PhD)

Институт микробиологии Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: aliyevzafar24@gmail.com

Халилов Илхом Маматкулович

д-р биол. наук, заведующий

лабораторией биоконтроля фитопатогенов, Институт микробиологии Академии наук

Республика Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: ilkhom2002@yahoo.com

Усмонкулова Азиза Анвар кизи

канд. биол. наук

ст. науч. сотр., Научно-исследовательский институт карантина и защиты растений

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: usmonkulova.aziza@mail.ru

Азимова Нодира Шойим кизи

канд. биол. наук

ст. науч. сотр. Институт микробиологии АН РУз

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: azimovanodira@mail.ru

Абдуллаев Анвар Кадируллаевич

PhD, заведующий

лабораторией общего анализа, Научно-исследовательский институт рисоводства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: anvar_abdullaev_1974@mail.ru

Бобокулов Муродали Шавкат угли

докторант (PhD)

Научно-исследовательский институт рисоводства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: bmurodali97@gmail.com

Рустамова Нигора Актамовна

д-р биол. наук, вед. науч. сотр. Институт микробиологии АН РУз

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: n.rustamova@yahoo.com

Давранов Кахрамон Давранович
акад., директор
Институт Микробиология АН РУЗ
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: k-davranov@mail.ru

Screening of promising bioagents against virulent phytopathogens of cotton and statistical evaluation of their effectiveness

Aliyev Zafar
PhD Student
Institute of Microbiology
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Khalilov Ilkhom
doctor of Biological Sciences
Head of the Laboratory of Phytopathogen Biocontrol
Institute of Microbiology
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Usmonkulova Aziza
candidate of Biological Sciences
Senior Researcher
Research Institute of Plant Quarantine and Protection
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Azimova Nodira
candidate of Biological Sciences
Senior Researcher
Institute of Microbiology
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Abdullayev Anvar
PhD
Head of the General
Analysis Laboratory
Rice Research Institute
Uzbekistan, Tashkent

Bobokulov Murodali
PhD Student
Rice Research Institute
Uzbekistan, Tashkent

Rustamova Nigora
doctor of Biological Sciences
Leading Researcher, Institute of Microbiology
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent

Davranov Kakhramon
Academician, director of the Institute
of Microbiology of the Russian Academy of Sciences
Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования явилась сравнительная оценка антифунгальной активности перспективных бактериальных штаммов в отношении фитопатогенных грибов родов *Fusarium* и *Alternaria*. Установлено, что наиболее высокой антагонистической активностью характеризовался штамм *Azospirillum brasilense* 1–7, обеспечивший ингибирование радиального роста всех исследованных фитопатогенов с показателями RI 54,16–61,9 %, при максимальном значении 61,9 % для *Fusarium* sp.1. Высокую эффективность также продемонстрировали *Bacillus subtilis* 1 и *Bacillus thuringiensis* 1fo, при этом максимальный показатель RI у *B. subtilis* 1 достигал 64,1 % в отношении *Fusarium* sp.28. Штаммы *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas putida* проявили умеренную антифунгальную активность, тогда как *Bacillus safensis* MB26, *B. subtilis* 2 и *B. thuringiensis* 26 ингибировали рост лишь отдельных фитопатогенов. Штамм *Azotobacter chroococcum* sp. антагонистической активности не проявил. Антагонистическую активность определяли методом двойных культур на агаризованной питательной среде, а статистическую обработку результатов проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости $p < 0,05$.

Abstract

The aim of this study was to comparatively evaluate the antifungal activity of promising bacterial strains against phytopathogenic fungi of the genera *Fusarium* and *Alternaria*. The strain *Azospirillum brasilense* 1–7 exhibited the highest antagonistic activity, inhibiting the radial growth of all tested phytopathogens with RI values ranging from 54.16 to 61.9 %, with the highest value (61.9 %) recorded against *Fusarium* sp.1. High antifungal activity was also demonstrated by *Bacillus subtilis* 1 and *Bacillus thuringiensis* 1fo, with the maximum RI value of 64.1 % observed for *B. subtilis* 1 against *Fusarium* sp.28. *Pseudomonas aeruginosa* and *Pseudomonas putida* exhibited moderate antifungal activity, whereas *Bacillus safensis* MB26, *B. subtilis* 2, and *B. thuringiensis* 26 inhibited the growth of only selected phytopathogens. No antagonistic activity was detected for *Azotobacter chroococcum*. Antagonistic activity was assessed using the dual culture assay on solid agar medium, and the experimental data were statistically analyzed by analysis of variance (ANOVA) at a significance level of $p < 0.05$.

Ключевые слова: хлопчатник, агенты биологического контроля, фитопатогенные грибы, *Fusarium* spp, *Alternaria* sp, бактерии-антагонисты, антифунгальная активность.

Keywords: cotton, biological control agents, phytopathogenic fungi, *Fusarium* spp, *Alternaria* sp, antagonistic bacteria, antifungal activity.

Библиографическое описание: Скрининг перспективных биоагентов против вирулентных фитопатогенов хлопчатника и статистическая оценка их эффективности // *Universum: химия и биология : электрон. научн. журн.* Алиев З.З. [и др.]. 2026. 8(146). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23139>

Введение

Фитопатогенные грибы остаются одним из основных факторов, ограничивающих урожайность и фитосанитарную устойчивость сельскохозяйственных культур. По данным исследований, потери урожая вследствие болезней растений достигают 20–30 %, при этом значительная часть ущерба обусловлена развитием грибов родов *Fusarium*, *Alternaria*, *Verticillium*, *Rhizoctonia* и других [30]. Хлопчатник (*Gossypium hirsutum* L.) особенно подвержен грибным заболеваниям, распространяющимся через почву и семена, что существенно снижает его продуктивность [10].

Грибы родов *Fusarium* и *Alternaria* вызывают корневые гнили, трахеомикозное увядание, некрозы стеблей и листьев, нанося значительный экономический ущерб сельскому хозяйству [4, 19]. При фузариозном увядании хлопчатника поражаются корневая система и проводящие ткани, нарушается транспорт воды и питательных веществ, что приводит к увяданию и гибели растений [29]. Представители рода *Alternaria* вызывают некрозы листьев и стеблей, ухудшение качества семян и снижение урожайности [27]. Распространению заболеваний способствуют климатические изменения, длительное возделывание культур в условиях монокультуры и деградация почвенной микробиоты [31].

Продолжительное применение химических фунгицидов способствует формированию устойчивости патогенов, сокращению численности полезных микроорганизмов, нарушению экологического равновесия почвы и накоплению токсичных остатков в окружающей среде [17, 7, 33]. В связи с этим разработка экологически безопасных методов защиты растений на основе агентов биологического контроля (Biological Control Agents BCA), в частности ризобактерий, стимулирующих рост растений (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR), является актуальным направлением современной фитопатологии [11, 25, 5].

Бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum* и *Azotobacter* рассматриваются как перспективные агенты биологического контроля и стимуляции роста растений [1]. Представители рода *Bacillus* отличаются спорообразованием, устойчивостью к неблагоприятным условиям и высокой метаболической пластичностью [6]. Они синтезируют антифунгальные липопептиды — итурин, фенгицин, сурфактин и бацилломицин, эффективно ингибирующие развитие возбудителей фузариоза и альтернариоза [4, 15, 26, 14]. Биопрепараты на основе *Bacillus subtilis* успешно применяются для повышения устойчивости агроэкосистем и стабильности сельскохозяйственного производства [8, 23].

Представители рода *Pseudomonas* также обладают выраженной антагонистической активностью, обусловленной синтезом сидерофоров, феназинов, пиолитеорина, цианистого водорода и других вторичных метаболитов, подавляющих развитие фитопатогенов [7, 15, 9]. Эффективность штаммов *Pseudomonas putida* и *Pseudomonas aeruginosa* в качестве агентов биологического контроля против *Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata* и других фитопатогенных грибов подтверждена рядом исследований [3, 32].

Штаммы рода *Azospirillum*, традиционно рассматриваемые как продуценты фитогормонов и азотфиксирующие микроорганизмы, в последние годы привлекают внимание как перспективные агенты биоконтроля. Установлено, что *Azospirillum brasilense* синтезирует литические ферменты (хитиназу и β -1,3-глюканазу), антифунгальные

метаболиты и индуцирует системную резистентность растений (ISR), обеспечивая выраженный фунгистатический эффект [20, 2, 12]. Наряду с этим *Azotobacter chroococcum* рассматривается как многофункциональный микроорганизм, повышающий плодородие почвы, стимулирующий рост растений и обладающий биоконтрольным потенциалом [21]. Вместе с тем эффективность бактериальных антагонистов определяется их генетическими особенностями, штаммовой специфичностью и вирулентностью фитопатогенных изолятов, что может обуславливать вариабельность результатов *in vitro* [21].

Одним из наиболее информативных методов скрининга микроорганизмов-антагонистов является метод двойной культуры (*dual culture assay*) *in vitro* [24, 13, 28]. Он позволяет оценить ингибирование роста грибного мицелия, конкурентные взаимодействия за субстрат и влияние диффундирующих внеклеточных биоактивных метаболитов [15, 13, 28]. Для количественной оценки антагонистической активности широко применяют показатели ингибирования радиального роста (RI, %) и индекс зоны ингибирования (IZI) [28]. Высокую эффективность демонстрирует модификация метода «газон–лунка», обеспечивающая стабильное взаимодействие между антагонистом и патогеном и точную оценку действия диффундирующих метаболитов [4].

Достоверность результатов экспериментов методом двойной культуры оценивают с использованием дисперсионного анализа (ANOVA), критерия Тьюки (Tukey HSD) и критерия Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis), что соответствует современным требованиям микробиологических исследований [36, 19]. Изучение способности новых бактериальных изолятов, выделенных из агробиоценозов хлопчатника Сырдарьинской области, подавлять рост фитопатогенных грибов и статистическая оценка их штамм-специфических особенностей являются важным этапом разработки экологически безопасных биофунгицидов нового поколения.

Целью настоящего исследования являлась сравнительная оценка антифунгальной активности штаммов бактерий-антагонистов различных таксономических групп в отношении *Fusarium* spp. и *Alternaria* sp. с использованием модифицированного метода двойной культуры «газон–лунка», выявление перспективных агентов биологического контроля и статистическая оценка полученных результатов методом дисперсионного анализа в программной среде R.

Материалы и методы исследования

Антифунгальную активность бактериальных штаммов оценивали методом двойной культуры (*dual culture assay*), позволяющим исследовать прямые антагонистические взаимодействия между бактериями и фитопатогенными грибами, а также оценить способность бактерий к колонизации субстрата и синтезу диффундирующих биоактивных метаболитов *in vitro* [26, 13].

Фитопатогенные грибы культивировали на картофельно-декстрозном агаре (PDA), бактериальные штаммы — на питательном агаре (РА) методом газонного посева. После формирования бактериального газона стерильным пробойником вырезали агаровые блоки, переносили их в чашки Петри с PDA, дополненным пептоном (5 г/л), и размещали напротив грибного инокулюма. Инкубацию проводили при 27 °С в течение 10 суток [11, 26].

Антифунгальную активность оценивали по показателю ингибирования радиального роста (RI, %), который рассчитывали по формуле:

$$R_i (\%) = ((r_1 - r_2) / r_1) \times 100,$$

где R_1 — радиус грибной колонии в контроле; R_2 — радиус грибной колонии со стороны бактериального антагониста [11, 34, 16].

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы **RStudio** (версия 4.3.2). Данные представлены в виде **среднего значения $\pm$ стандартного отклонения (Mean $\pm$ SD)** по трём независимым повторностям. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования

В ходе исследования антифунгальная активность штаммов бактерий-антагонистов в отношении различных фитопатогенных грибов была оценена по показателю радиального ингибирования роста (RI, %). Полученные результаты показали существенные различия в уровне антагонистического потенциала между исследованными бактериями. Реакция каждого бактериального штамма по отношению к фитопатогенам была проанализирована отдельно.

Результаты оценки антагонистической активности бактериальных штаммов в отношении фитопатогенных грибов показали наличие существенных различий между исследуемыми штаммами (табл. 1).

Наиболее высокие показатели ингибирования радиального роста были отмечены у штамма *A. brasilense* 1–7. Данный штамм проявил стабильную антагонистическую активность в отношении всех исследованных фитопатогенов, при этом значения RI варьировали в пределах 54,16–61,90%. Наиболее выраженный уровень ингибирования был зарегистрирован в отношении изолята *Fusarium* sp.1 (61,9%), тогда как для остальных изолятов *Fusarium* значения RI также превышали 55% (рис. 1).

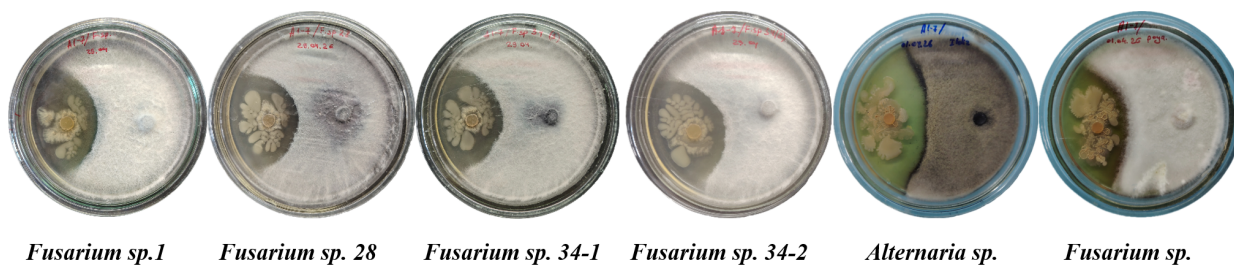


Рисунок 1. Активность штамма *A. brasilense* 1–7 против грибов

Штамм *B. thuringiensis* 1fo также продемонстрировал широкий спектр антагонистической активности. В отношении *Alternaria* sp. и *Fusarium* sp. значения RI составили соответственно 57,5 и 56,25%, тогда как для остальных изолятов *Fusarium* уровень ингибирования находился в диапазоне 47,76–53,84% (рис. 2).

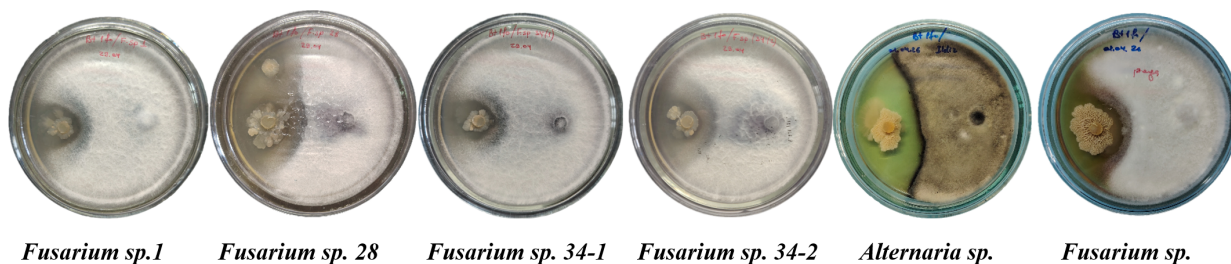


Рисунок 2. Активность штамма Bt 1fo против грибов

B. subtilis 1 проявил антагонистическую активность в отношении всех исследованных фитопатогенов. Наиболее высокая эффективность данного штамма была отмечена в отношении изолята *Fusarium* sp.28, где значение RI составило 64,1%. В отношении остальных фитопатогенов значения RI варьировали от 45,83 до 58,33%, что свидетельствует о наличии у данного штамма стабильного антагонистического потенциала в отношении различных фитопатогенов (рис. 3).

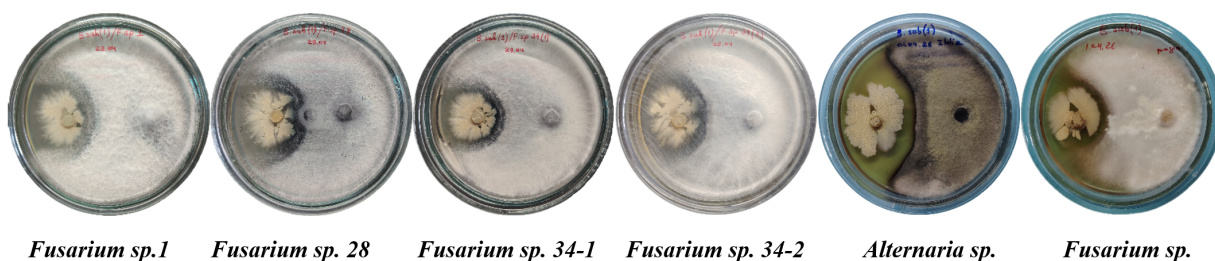


Рисунок 3. Активность штамма B. subtilis 1 против грибов

Штаммы *P. aeruginosa* и *P. putida* проявили антагонистическую активность средней степени в отношении всех фитопатогенов, использованных в эксперименте. Значения RI в отношении *Alternaria* sp. и *Fusarium* sp. составили соответственно 39,58 и 43,5%. Для отдельных изолятов *Fusarium* уровень ингибирования превышал 50%. В частности, штамм *P. putida* продемонстрировал одинаковые значения RI (59,52%) в отношении изолятов *Fusarium* sp.34-1 и *Fusarium* sp.34-2 (рис. 4 и 5).

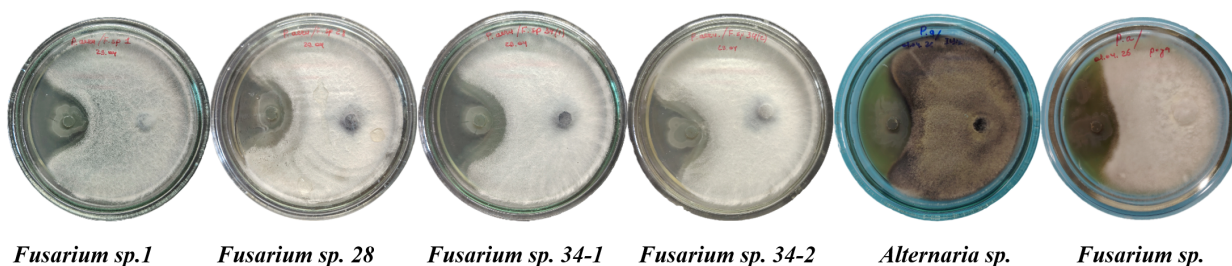


Рисунок 4. Активность штамма Pseudomonas aeruginosa sp. против грибов

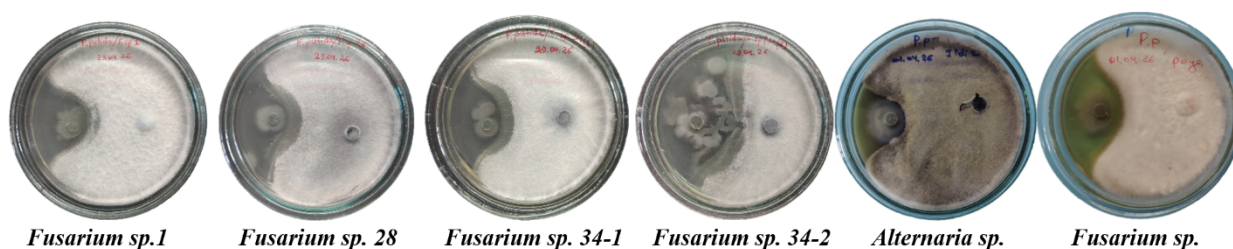


Рисунок 5. Активность штамма *Pseudomonas putida* против грибов

B. safiensis MB26 проявил антагонистическую активность только в отношении *Alternaria* sp. и общего изолята *Fusarium* sp., при этом значения RI составили соответственно 43,75 и 43,5%. Однако в отношении отдельных изолятов *Fusarium* антагонистическая активность не наблюдалась (рис. 6).

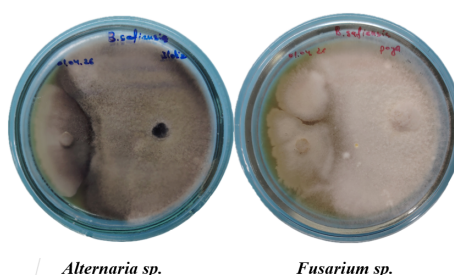
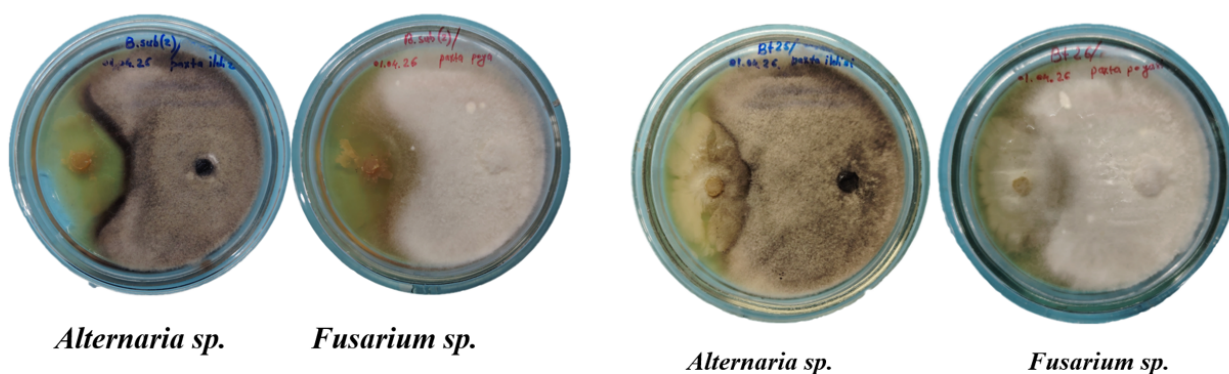


Рисунок 6. Активность штамма *B. safiensis* MB26 против грибов

Аналогичная картина была отмечена у штаммов *B. subtilis* sp.2 и *B. thuringiensis* 26. Данные штаммы проявили антагонистическую активность в отношении *Alternaria* sp. и общего изолята *Fusarium* sp., где значения RI составили соответственно 41,58 и 50 %, а также 27,5 и 45,75%, однако ингибирования роста отдельных изолятов *Fusarium* не наблюдалось (рис. 7 А и Б). Штамм *A. chroococcum* sp. не проявил антагонистической активности в отношении всех исследованных фитопатогенов.



А)

Б)

Рисунок 7. Активность штамма А) *B. subtilis* 2, Б) *Bt* 26 против грибов

Таблица 1.

Антифунгальная активность штаммов бактерий-антагонистов (RI, %, среднее значение $\pm$ SD, n = 3)

Бактериальный штамм	<i>Alternaria</i> sp.	<i>Fusarium</i> sp.	<i>Fusarium</i> sp. 1	<i>Fusarium</i> sp. 28	<i>Fusarium</i> sp. 34-1	<i>Fusarium</i> sp. 34-2
	Среднее значение RI (%)					
<i>A. brasilense</i> 1–7	56,25 $\pm$ 2,2	54,16 $\pm$ 1,4	61,9 $\pm$ 4,1	60,68 $\pm$ 0,9	56,55 $\pm$ 4,3	55,86 $\pm$ 3,6
<i>B. safiensis</i> MB26	43,75 $\pm$ 2,8	43,5 $\pm$ 3,2	0	0	0	0
<i>B. subtilis</i> 1	58,33 $\pm$ 2,3	45,83 $\pm$ 1,5	50,0 $\pm$ 0,0	64,1 $\pm$ 2,2	51,28 $\pm$ 4,4	51,28 $\pm$ 4,4
<i>B. subtilis</i> 2	50 $\pm$ 0,8	45,75 $\pm$ 1,5	0	0	0	0
<i>B. thuringiensis</i> 26	41,58 $\pm$ 0,4	27,5 $\pm$ 1,7	0	0	0	0
<i>P. aeruginosa</i> sp.	39,58 $\pm$ 1,6	41,66 $\pm$ 1,2	50,0 $\pm$ 7,1	54,76 $\pm$ 4,1	56,19 $\pm$ 1,6	52,38 $\pm$ 5,6
<i>P. putida</i> sp.	41,67 $\pm$ 0,9	43,5 $\pm$ 0,9	50,0 $\pm$ 7,1	54,38 $\pm$ 2,3	59,52 $\pm$ 4,1	59,52 $\pm$ 8,2
<i>B. thuringiensis</i> 1fo	57,5 $\pm$ 1,5	56,25 $\pm$ 1,8	50,0 $\pm$ 0,0	53,84 $\pm$ 3,1	47,76 $\pm$ 2,0	51,28 $\pm$ 4,4
<i>A. chroococcum</i> sp.	0	0	0	0	0	0

В целом среди исследованных штаммов наиболее высокая и стабильная антагонистическая активность была зарегистрирована у *A. brasilense* 1–7, *B. subtilis* sp.1 и *B. thuringiensis* 1fo. Штаммы рода *Pseudomonas* проявили антагонистическое действие средней степени, сохранявшееся в отношении всех исследованных фитопатогенов. В отличие от них, антагонистическая активность *B. safiensis* MB26, *B. subtilis* sp.2 и *B. thuringiensis* 26 была ограничена в отношении отдельных фитопатогенов, тогда как штамм *A. chroococcum* sp. в исследуемых условиях не проявил антагонистических свойств.

Обсуждение

Результаты исследования показали существенные различия в уровне антифунгальной активности между бактериями-антагонистами. Наиболее высокая активность была отмечена у штаммов *Azospirillum brasilense*, *Pseudomonas putida* и *Bacillus thuringiensis*, что свидетельствует о том, что антагонистические свойства зависят не столько от видовой принадлежности микроорганизма, сколько от генетических и метаболических особенностей конкретного штамма.

Высокая антифунгальная активность *Azospirillum brasilense* согласуется с данными Mehanni и El-Katatny [18]. Авторы установили, что штаммы *Azospirillum* обеспечивали ингибирование роста *Fusarium oxysporum* на уровне 95–100 %. Хотя полученные нами результаты были несколько ниже, различия могут быть обусловлены особенностями используемых штаммов бактерий и изолятов фитопатогенов. Тем не менее, полученные данные подтверждают высокий биоконтрольный потенциал представителей рода *Azospirillum* [18].

Согласно данным Yasmin и соавт. [34], штамм *Pseudomonas aeruginosa* Z5 ингибировал рост *Fusarium oxysporum* на 82,5 %, а в отношении некоторых других фитопатогенов уровень ингибирования достигал 86,5–91,5 %. В нашем исследовании антифунгальная активность *P.*

aeruginosa была ниже указанных значений, однако *Pseudomonas putida* продемонстрировал более высокую активность в отношении отдельных изолятов. Это подтверждает штаммоспецифический характер антагонистических свойств бактерий [34].

Liang и соавт. [16] показали, что штамм *Bacillus thuringiensis* GBAC46 эффективно подавляет развитие грибов рода *Fusarium*. Аналогично, в нашем исследовании штамм *B. thuringiensis* 1fo проявил высокую антифунгальную активность, тогда как другой штамм того же вида — *B. thuringiensis* 26 — характеризовался значительно более низкой активностью. Данный факт указывает на существенные различия биоконтрольного потенциала между штаммами одного вида [16].

По данным Zhang и соавт. [35], фэнгицины, продуцируемые *Bacillus subtilis*, практически полностью подавляют рост *Alternaria solani*. В нашем исследовании штамм *B. subtilis* 1 также проявил выраженную антифунгальную активность, тогда как *B. subtilis* 2 оказывал значительно более слабое воздействие на некоторые фитопатогенные грибы. Вероятно, это связано с различиями в экспрессии генов, отвечающих за синтез липопептидов [35].

Prakash и Arora [22] установили, что штамм *Bacillus safensis* STJP практически полностью подавляет мицелиальный рост и образование конидий *Alternaria alternata*. В отличие от этого, штамм *B. safensis* MB26, исследованный в нашей работе, проявил сравнительно более низкую антифунгальную активность, что, вероятно, обусловлено различиями в метаболической активности исследуемых штаммов [22].

У *Azotobacter chroococcum* антифунгальная активность не была выявлена. Полученные результаты согласуются с литературными данными, согласно которым основное значение представителей данного рода связано не с биоконтролем фитопатогенов, а с фиксацией атмосферного азота и стимуляцией роста растений.

Заключение

Результаты проведённого исследования показали, что антифунгальная активность бактериальных штаммов-антагонистов существенно варьирует в зависимости от вида фитопатогенного гриба. Наиболее высокую антагонистическую активность в отношении изолятов *Fusarium* sp.34-1 и *Fusarium* sp.34-2 продемонстрировали штаммы *Pseudomonas putida* sp. и *Azospirillum brasilense* 1–7. В отношении *Alternaria* sp. и *Fusarium* sp., выделенных из корневой системы и стеблей хлопчатника, наибольшая эффективность была зарегистрирована у штамма *B. thuringiensis* 1fo.

Статистический анализ подтвердил наличие достоверных различий между исследованными бактериальными штаммами по уровню антифунгальной активности в отношении отдельных фитопатогенов. В то же время штамм *Azotobacter chroococcum* sp. не проявил антифунгальной активности ни в одном из исследованных вариантов.

Полученные результаты позволяют рассматривать штаммы *Bacillus thuringiensis* 1fo, *Pseudomonas putida* и *Azospirillum brasilense* 1–7 в качестве перспективных агентов биологического контроля для защиты хлопчатника от фитопатогенных грибов.

Благодарность

Мы выражаем благодарность Институту микробиологии Академии наук Республики Узбекистан, который выполнил основную базовую работу по данной теме, за создание достаточных условий для проведения экспериментов в лаборатории.

Список литературы

1. Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S and Smith DL (2018) Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Front. Plant Sci.* 9:1473. doi: 10.3389/fpls.2018.01473.
2. Cassan, Fabricio & Coniglio, Anahí & Lopez, Gaston & Molina, Romina & Nievas, Sofia & Le Noir de Carlan, Coline & Donadio, Florencia & Torres, Daniela & Rosas, Susana & Pedrosa, Fabio & Souza, Emanuel & Díaz-Zorita, Martín & de-Bashan, Luz & Mora, V. (2020). Everything you must know about Azospirillum and its impact on agriculture and beyond. *Biology and Fertility of Soils*. 56. 10.1007/s00374-020-01463-y.
3. Castro Tapia MP, Madariaga Burrows RP, Ruiz Sepúlveda B, Vargas Concha M, Vera Palma C and Moya-Elizondo EA (2020) Antagonistic Activity of Chilean Strains of *Pseudomonas protegens* Against Fungi Causing Crown and Root Rot of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Front. Plant Sci.* 11:951. doi: 10.3389/fpls.2020.00951.
4. Duan, Y., Pang, Z., Yin, S., Xiao, W., Hu, H. & Xie, J. (2023). Screening and analysis of antifungal strains *Bacillus subtilis* JF-4 and *B. amylum* JF-5 for the biological control of *Fusarium* wilt of banana. *Journal of Fungi*, 9(9), 886 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
5. El-Saadony MT, Saad AM, Soliman SM, Salem HM, Ahmed AI, Mahmood M, El-Tahan AM, Ebrahim AAM, Abd El-Mageed TA, Negm SH, Selim S, Babalghith AO, Elrys AS, El-Tarabily KA and AbuQamar SF (2022) Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future perspectives. *Front. Plant Sci.* 13:923880. doi: 10.3389/fpls.2022.923880.
6. Etesami, Hassan & Jeong, Byoung Ryong & Glick, Bernard. (2023). Biocontrol of plant diseases by *Bacillus* spp.. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 126. 10.1016/j.pmpp.2023.102048.
7. Gharsallah H, Cheffi M, Mallek R, Omri N, Triki MA, Öztop MH and Zarai Z (2025) Antifungal potential of *Bacillus* strains: implications for biocontrol strategies in food safety and sustainable agriculture. *Front. Microbiol.* 16:1615252. doi: 10.3389/fmicb.2025.1615252.
8. Giri, B.R., Chattaraj, S., Rath, S., Pattnaik, M.M., Mitra, D. & Thatoi, H. (2025). Unveiling the Molecular Mechanism of *Azospirillum* in Plant Growth Promotion. *Bacteria*, 4(3), 36 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)

9. Hajji-Hedfi, L., Wannassi, T., Khlif, A., Kavhiza, N.J., & Rebouh, N.Y. (2025). Investigating the Biocontrol and Plant Growth-Promoting Potential of *Pseudomonas yamanorum* for Sustainable Management of Tomato Early Blight (*Alternaria alternata*). *Plants*, 14(20), 3117 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
10. Hillocks, R.J. (2012). *Cotton Diseases*. CAB International.
11. Jimenez-Quiros, C., Okechukwu, E.C., Hong, Y., Baysal, Ö., & Tör, M. (2022). Comparison of Antifungal Activity of *Bacillus* Strains against *Fusarium graminearum* In Vitro and In Planta. *Plants*, 11(15), 1999 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
12. Kerečki, Slavica & Pecinar, Ilinka & Karlicic, Vera & Mirkovic, Nemanja & Kljujev, Igor & Raičević, Vera & Jovicic-Petrovic, Jelena. (2022). *Azotobacter chroococcum* F8/2: A multitasking bacterial strain in sugar beet biopriming // *Journal of Plant Interactions*. 17. 719–730. – 2022. – DOI: 10.1080/17429145.2022.2091802.
13. Khan N, Martínez-Hidalgo P, Ice TA, Maymon M, Humm EA, Nejat N, Sanders ER, Kaplan D and Hirsch AM (2018) Antifungal Activity of *Bacillus* Species Against *Fusarium* and Analysis of the Potential Mechanisms Used in Biocontrol. *Front. Microbiol.* 9:2363. doi: 10.3389/fmicb.2018.02363.
14. Korangi Alleluya V, Argüelles Arias A, Ribeiro B, De Coninck B, Helmus C, Delaplace P and Ongena M (2023) *Bacillus* lipopeptide-mediated biocontrol of peanut stem rot caused by *Athelia rolfsii*. *Front. Plant Sci.* 14:1069971. doi: 10.3389/fpls.2023.1069971.
15. Li, Y., Zhang, X., He, K., Song, X., Yu, J., Guo, Z. & Xu, M. (2023). Isolation and Identification of *Bacillus subtilis* LY-1 and Its Antifungal and Growth-Promoting Effects. *Plants*, 12(24), 4158 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
16. Liang, Z., Ali, Q., Wu, H., Gu, Q., Liu, X., Sun, H. & Gao, X. (2025). Biocontrol mechanism of *Bacillus thuringiensis* GBAC46 against diseases and pests caused by *Fusarium verticillioides* and *Spodoptera frugiperda*. *Biomolecules*, 15(4), 519 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
17. Maake, T.W. & Sibisi, P. (2025). Microbial Antagonists for the Control of Plant Diseases in Solanaceae Crops: Current Status, Challenges, and Global Perspectives. *Bacteria*, 4(3), 29 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
18. Mehanni, M.M. & El-Katatny, M.H. (2023). Evaluation of the antifungal activity of some *Azospirillum* strains for their possible role as biocontrol agents. *Research Square* [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
19. Patel, Dhaval & Tetarwal, ML & Pandya, Kajal & Purohit, Jyotika & Meena, RL & Chattopadhyay, Anirudha. (2024). Status of *Alternaria* leaf blight in cotton and its fungicidal management. *JOURNAL OF MYCOLOGY AND PLANT PATHOLOGY*. 54. 279. 10.59467/JMPP.2024.54.279.
20. Pelagio-Flores, R., Ravelo-Ortega, G., García-Pineda, E., & López-Bucio, J. (2025). A century of *Azospirillum*: plant growth promotion and agricultural promise. *Plant signaling & behavior*, 20(1), 2551609 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)

21. Pirttilä, A.M. Mohammad Parast Tabas, H., Baruah, N., & Koskimäki, J.J. (2021). Biofertilizers and Biocontrol Agents for Agriculture: How to Identify and Develop New Potent Microbial Strains and Traits. *Microorganisms*, 9(4), 817 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
22. Prakash, J. & Arora, N.K. (2021). Novel metabolites from *Bacillus safensis* and their antifungal property against *Alternaria alternata*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 114, 1245–1260 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
23. Raaijmakers, J.M. & Mazzola, M. (2012). Diversity and natural functions of antibiotics produced by beneficial and plant pathogenic bacteria. *Annual review of phytopathology*, 50, 403–424 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
24. Rafanomezantsoa, P., Gharbi, S., Karkachi, N. & Kihal, M. (2022). Antifungal activity of *Bacillus* spp. against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and *Ascochyta* sp. *Journal of Plant Protection Research*, 62(1), 45–54 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
25. Raut L. S, Dalvi S. M, Rakh R.R. Antifungal Potential of *Bacillus subtilis* subsp. *inaquosorum* RLS76 for Management of *Fusarium* Wilt Disease of Bt- Cotton. *Curr Agri Res* 2024; 12(1). doi: [Электронный ресурс]. URL: <http://dx.doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
26. Russi, A., Almança, M.A. K., & Schwambach, J. (2022). *Bacillus subtilis* strain F62 against *Fusarium oxysporum* and promoting plant growth in the grapevine rootstock SO4. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 94(suppl 3), e20210860 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
27. Salotti I, Giorni P and Battilani P (2024) Biology, ecology, and epidemiology of *Alternaria* species affecting tomato: ground information for the development of a predictive model. *Front. Plant Sci.* 15:1430965. doi: 10.3389/fpls.2024.1430965.
28. Salotti, I., Giorni, P. & Battilani, P. (2024). Biology, ecology, and epidemiology of *Alternaria* species affecting tomato: ground information for the development of a predictive model. *Frontiers in plant science*, 15, 1430965 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
29. Sampaio, A.M., Araújo, S. d. S., Rubiales, D., & Vaz Pato, M.C. (2020). *Fusarium* Wilt Management in Legume Crops. *Agronomy*, 10(8), 1073 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
30. Savary, S., Ficke, A., Aubertot, J.N. & Hollier, C. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
31. Singh, B.K. Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J.E., Liu, H., & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature reviews. Microbiology*, 21(10), 640–656 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)

32. Tagoe, J.N. A., Ojha, B., Horne, S.M., & Prüß, B.M. (2026). Azospirillum brasilense and plant exudate components increase phytopathogen resistance and modulate the phyllosphere and rhizosphere. *Canadian Journal of Microbiology*, 72(1), 45–59 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
33. Verdadero, F.X. D., Agarap, A.Z., Macatingrao, C.N. E., Ordonez, I.A., Jr., Tavu, L.E. J., Pires, D., & Balendres, M.A. O. (2025). Pesticides in the Environment: Benefits, Harms, and Detection Methods. *Sci*, 7(4), 171 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
34. Yasmin, S., Hafeez, F.Y., & Rasul, G. (2014). Evaluation of *Pseudomonas aeruginosa* Z5 for biocontrol of cotton seedling disease caused by *Fusarium oxysporum*. *Biocontrol Science and Technology*, 24(11), 1227–1242.
35. Zhang, X. et al. (2022). Fengycin produced by *Bacillus subtilis* ZD01 inhibits *Alternaria solani* and alters fungal gene expression. *Frontiers in Microbiology*, 13, 861113 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)
36. Zhou, J., Zhang, X., Qu, Z., Zhang, C., Wang, F., Gao, T., Yao, Y. & Liang, J. (2024). Progress in Research on Prevention and Control of Crop Fungal Diseases in the Context of Climate Change. *Agriculture*, 14(7), 1108 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/>. (дата обращения 07.08.2026)