

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>
<https://elibrary.ru/CXHSQZ>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Оценка антагонистических свойств представителей рода *Pantoea* в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур



Е. Р. Фасхутдинова^{1,*}, Ю. Е. Афонина¹,
А. А. Шевель¹, В. С. Евдокимов², Н. А. Нешумаева³,
Л. М. Аксенова⁴, А. М. Федорова¹

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² ООО «Азот-Агро», Кемерово, Россия

³ Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук^{ROR}, Красноярск, Россия

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Принята после рецензирования: 10.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

*e-mail: faskhutdinovae.98@mail.ru

© Е. Р. Фасхутдинова, Ю. Е. Афонина, А. А. Шевель,
В. С. Евдокимов, Н. А. Нешумаева, Л. М. Аксенова,
А. М. Федорова, 2026



Аннотация.

Грибы рода *Fusarium* выступают основными возбудителями заболеваний злаковых культур, продуцируя фито- и микотоксины, снижающие урожайность и качество зерна. В связи с этим актуальным направлением является поиск эффективных агентов биологического контроля среди растительно-ассоциированных бактерий. Цель исследования – оценить антагонистическую и ростостимулирующую активность штаммов *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756 в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium* и их способность снижать токсическое воздействие патогенов на злаковые культуры.

Объекты исследования – штаммы бактерий, депонированные в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия): *P. agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756. Антагонистическую активность оценивали в отношении *Fusarium culmorum*, *F. poae*, а также штамма, идентифицированного как представитель *F. tricinctum* species complex. Анализ проводили методом лунок и совместного культивирования; оценивали антагонистическую активность летучих органических соединений. Также изучено влияние штаммов *Pantoea* на прорастание семян при инфицировании фитопатогенами.

Установлено, что все исследуемые штаммы проявили антагонистическую активность в отношении фитопатогенов рода *Fusarium*. Выраженную эффективность показал штамм *P. vagans* B-14727, обеспечивший максимальное подавление роста представителя комплекса видов *F. tricinctum* при совместном культивировании (68,8 %) и максимальные зоны ингибирования методом лунок (до 6,0 см). Штамм *P. agglomerans* B-14726 характеризовался стабильной антифунгальной активностью и эффективным подавлением роста фитопатогенов летучими метаболитами. *P. pleuroti* B-14756 проявил выраженный защитный эффект при совместном культивировании и способствовал повышению всхожести семян в условиях заражения. Наиболее чувствительным фитопатогеном оказался представитель *F. tricinctum*, наименее чувствительным – *F. culmorum*.

Изученные штаммы рода *Pantoea* обладают выраженным биоконтрольным и ростостимулирующим потенциалом и могут рассматриваться в качестве перспективной основы биологических препаратов для защиты злаковых культур от фузариозной инфекции.

Ключевые слова. Антагонистическая активность, фитопатогенные грибы, ростостимулирующие бактерии, летучие органические соединения, ризобактерии, устойчивость растений, злаковые культуры

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда по теме научного проекта «Новые бактериальные штаммы рода *Pantoea* в повышении устойчивости злаковых культур к фитопатогенам» (№ 25-16-20076) при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 25-16-20076 от 17.04.2025 г.) и Министерства образования Кузбасса (соглашение № 01/2025 от 10.04.2025 г.).

Для цитирования: Фасхутдинова Е. Р., Афонина Ю. Е., Шевель А. А., Евдокимов В. С., Нешумаева Н. А. и др. Оценка антагонистических свойств представителей рода *Pantoea* в отношении фитопатогенов сельскохозяйственных культур. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 504–515. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>

Antagonistic Properties of *Pantoea* against Crop Phytopathogens



Elizaveta R. Faskhutdinova^{1,*}, Yulia E. Afonina¹,
Arina A. Shevel¹, Vitaly S. Evdokimov², Nadezhda A. Neshumaeva³,
Larisa M. Aksenova⁴, Anastasiya M. Fedorova¹

¹ Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

² Azot-Agro Ltd, Kemerovo, Russia

³ Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences^{ROR}, Krasnoyarsk, Russia

⁴ All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 01.06.2026

Revised: 10.08.2026

Accepted: 01.09.2026

*e-mail: faskhutdinovae.98@mail.ru

© E.R. Faskhutdinova, Yu.E. Afonina, A.A. Shevel, V.S. Evdokimov,
N.A. Neshumaeva, L.M. Aksenova, A.M. Fedorova, 2026



Abstract.

Fusarium fungi are among the most prevalent pathogens of cereal crops, producing phyto- and mycotoxins that severely reduce grain yield and quality. Developing novel, effective biocontrol agents is a pressing agricultural priority, and plant-associated bacteria offer a promising solution. This article evaluates the antagonistic and growth-promoting activities of *Pantoea* strains against phytopathogenic *Fusarium* species, as well as their capacity to mitigate pathogen-induced toxic effects on cereal crops.

The strains *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727, and *P. pleuroti* B-14756 were obtained from the National Bioresource Center of the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms at the Kurchatov Institute (Moscow, Russia). Their antagonistic activity was assessed against *Fusarium culmorum*, *F. poae*, and a strain belonging to the *F. tricinctum* species complex using well diffusion and co-cultivation methods. The study also evaluated the antifungal activity of volatile organic compounds and the effect of *Pantoea* strains on seed germination under phytopathogenic pressure.

All tested strains exhibited distinct antagonistic activity against the phytopathogens. *P. vagans* B-14727 demonstrated the highest efficacy, achieving maximum growth suppression of the *F. tricinctum* species complex during co-cultivation (68.8%) and producing the largest zones of inhibition (≤ 6.0 cm). *P. agglomerans* B-14726 showed stable antifungal activity and effective pathogen growth suppression via volatile metabolites. Meanwhile, *P. pleuroti* B-14756 exhibited a robust protective effect during co-cultivation and significantly enhanced seed germination under infestation conditions. Across all tests, the *F. tricinctum* complex proved to be the most sensitive pathogen, whereas *F. culmorum* was the most resistant.

In conclusion, these *Pantoea* strains possess reliable biocontrol and growth-promoting potential, making them promising candidates for developing commercial bioproducts to protect cereal crops against *Fusarium* infections.

Keywords. Antagonistic activity, phytopathogenic fungi, growth-promoting bacteria, volatile organic compounds, rhizobacteria, plant resistance, cereal crops

Funding. The study was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation on the scientific project «New bacterial strains of the genus *Pantoea* in increasing the resistance of cereal crops to phytopathogens» (№. 25-16-20076) with the financial support of the Russian Science Foundation (agreement №. 25-16-20076 dated 04/17/2025) and the Ministry of Education of Kuzbass (agreement №. 01/2025 dated 04/10/2025).

For citation: Faskhutdinova ER, Afonina YuE, Shevel AA, Evdokimov VS, Neshumaeva NA, *et al.* Antagonistic Properties of *Pantoea* against Crop Phytopathogens. 2026;56(3):504–515. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2656>

Введение

Грибы рода *Fusarium* относятся к числу наиболее распространенных и экономически значимых фитопатогенов сельскохозяйственных культур [1]. Их представители вызывают широкий спектр заболеваний растений, включая фузариоз колоса, корневые и стеблевые гнили, а также гниль проростков. Зачастую возбудителями фузариоза колоса выступают *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae*, *F. tricinctum* [2–6]. Распростра-

нение отдельных видов зависит от климатических условий, агротехнических факторов и восприимчивости растений-хозяев. Для более теплых и влажных регионов характерно доминирование *F. graminearum* [3], тогда как в умеренном и прохладном климате преобладают *F. culmorum*, *F. poae* и *F. tricinctum* [7].

Особую опасность род *Fusarium* представляет из-за способности продуцировать широкий спектр микотоксинов, загрязняющих зерно и продукты его

переработки [8]. Преимущественно распространены трихотецены типов А и В, в т. ч. дезоксиниваленол, ниваленол, токсины Т-2 и НТ-2, а также зеараленон, эниатины и боверицин [9–13]. Эти соединения обладают токсическим действием на растения, животных и человека, нарушают синтез белка, ингибируют клеточный метаболизм и способны вызывать острые и хронические микотоксикозы [14–17]. Загрязнение зерна микотоксинами приводит к значительным экономическим потерям из-за ограничения использования зараженного зерна в пищевых и кормовых целях [18].

Одним из наиболее опасных представителей рода является *F. culmorum* – гембиотрофный фитопатоген, вызывающий корневую гниль и фузариозное поражение колоса у пшеницы и других злаковых культур [19]. Для этого вида характерна короткая биотрофная стадия, сменяющаяся некротрофным типом паразитизма [20]. Симптомы заболевания проявляются в виде загнивания проростков, побурения корней и прикорневой зоны, а также формирования так называемых «белых колосьев». Кроме того, *F. culmorum* – активный продуцент дезоксиниваленола, зеараленона и ниваленола. В Российской Федерации данный фитопатоген не относится к доминирующим возбудителям фузариозных заболеваний и встречается реже, чем другие представители рода *Fusarium*. Тем не менее при благоприятных для развития инфекции условиях *F. culmorum* существенно снижает урожайность и качество зерна [21].

F. tricinctum входит в комплекс близкородственных видов (*F. tricinctum* species complex) и может участвовать в развитии фузариозных заболеваний злаковых культур [22]. Представители этого комплекса преимущественно распространены в регионах с умеренным и прохладным климатом, однако частота их выявления и хозяйственная значимость зависят от географических и погодных условий [23]. Помимо способности вызывать фузариоз колоса и снижение урожайности злаковых культур, *F. tricinctum* продуцирует микотоксины, в т. ч. эниатины, монилиформины и токсины Т-2 [24, 25]. Исследования показывают, что данный вид активно колонизирует листья и колосья пшеницы, формируя большое количество конидий и вызывая увядание растений [25]. Взаимодействия между различными видами *Fusarium* могут приводить к изменению уровня продукции микотоксинов и усилению патогенности в условиях совместного инфицирования [26].

В связи с высокой вредоносностью фузариозных заболеваний все большее внимание уделяется разработке экологически безопасных методов биологического контроля фитопатогенов [27]. Биологический контроль с использованием антагонистических микроорганизмов рассматривается как перспективная альтернатива химическим фунгицидам. На сегодняшний день описано более 30 видов микроорганизмов, которые могут ингибировать рост *F. graminearum* и других

представителей рода *Fusarium*, а также снижать уровень накопления микотоксинов в зерне [28]. Основные механизмы биологического контроля – продуцирование метаболитов с антимикробными свойствами, конкуренция за питательные вещества и экологические ниши, синтез сидерофоров, разрушение клеточной стенки фитопатогена литическими ферментами, а также индукция системной устойчивости растений [29, 30].

Среди перспективных агентов биологического контроля особый интерес представляют бактерии рода *Pantoea*, включающего широкий спектр растительно-ассоциированных микроорганизмов, встречающихся в ризосфере, филлосфере, семенах и внутренних тканях растений [31, 32]. *Pantoea* отличаются высокой экологической пластичностью, эффективно колонизируют поверхности растений и продуцируют разнообразные биологически активные соединения. Наиболее изученными видами являются *P. vagans* и *P. agglomerans*, обладающие выраженными антимикробными и ростостимулирующими свойствами [33, 34]. Вместе с тем представители рода характеризуются значительным внутривидовым разнообразием: наряду с ростостимулирующими встречаются фитопатогенные и условно-патогенные штаммы.

P. agglomerans относится к числу перспективных ризосферных и эндофитных бактерий, оказывающих комплексное положительное влияние на рост и развитие растений [35, 36]. Штаммы *P. agglomerans* принадлежат к семейству *Erwiniaceae* и определяются как грамотрицательные факультативно-анаэробные палочковидные бактерии, колонизирующие ризосферу и внутренние ткани растений. Установлено, что *P. agglomerans* обладает широким набором механизмов стимуляции роста растений, среди которых синтез фитогормонов, растворение труднорастворимых соединений фосфора, фиксация атмосферного азота и подавление развития фитопатогенных микроорганизмов [37].

Одним из важнейших механизмов положительного воздействия *P. agglomerans* является продуцирование фитогормонов, прежде всего индолил-3-уксусной кислоты и гиббереллинов, регулирующих клеточное деление и растяжение, развитие корневой системы и формирование надземных органов растений [38].

Бактерии повышают доступность элементов минерального питания за счет мобилизации фосфатов и фиксации атмосферного азота, что улучшает минеральное питание растений и повышает их продуктивность. Важное значение имеет также синтез *P. agglomerans* антимикробных соединений, обеспечивающих защиту растений от фитопатогенов и снижающих риск развития заболеваний [39].

В последние годы особое внимание уделяется изучению роли *P. agglomerans* в формировании и функционировании ризосферных микробных сообществ. Выявлено, что данные бактерии эффективно колонизируют корневую систему растений и образуют

устойчивые биопленки, поддерживающие длительное взаимодействие с растением-хозяином. Благодаря этому улучшается адаптация растений к неблагоприятным условиям среды, в т. ч. к засолению, дефициту влаги и другим абиотическим стрессам. Исследования показывают, что инокуляция растений штаммами *P. agglomerans* способствует повышению фотосинтетической активности, усилению антиоксидантной защиты, улучшению физико-химических свойств почвы и увеличению активности почвенных гидролитических ферментов [40].

Таким образом, *P. agglomerans* представляет значительный интерес как объект сельскохозяйственной биотехнологии за счет сочетания ростостимулирующих, адаптогенных и биоконтрольных свойств. Комплекс механизмов взаимодействия с растениями позволяет рассматривать безопасные штаммы данного вида в качестве перспективной основы для разработки микробных препаратов, направленных на повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и их устойчивости к биотическим и абиотическим стрессовым факторам [41].

Бактерия *P. pleuroti* (штамм В-14756) – грамотрицательный микроорганизм, обладающий большим потенциалом как агент биологического контроля и стимулятора роста злаковых культур. В рамках защиты растений от биотического стресса штамм проявляет выраженную антагонистическую активность в отношении широкого спектра фитопатогенных грибов, включая представителей родов *Fusarium* и *Bipolaris*. Особенностью биологического действия *P. pleuroti* является преобладание механизмов непосредственного взаимодействия с патогеном над диффузией метаболитов в среду. Помимо антифунгальных свойств, штамм характеризуется выраженной PGPB-активностью, обусловленной способностью к синтезу индольных соединений, что обеспечивает интенсификацию развития корневой системы и увеличение вегетативной массы растений. Сочетание антагонистических и ростостимулирующих свойств делает *P. pleuroti* перспективным компонентом биопрепаратов для повышения устойчивости и продуктивности злаковых агроценозов в условиях биотического вызова [41, 42].

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует о высокой перспективности представителей рода *Pantoea* в качестве агентов биологического контроля фитопатогенных грибов рода *Fusarium*. Комплексное действие, включающее продукцию антибиотических и летучих метаболитов, синтез сидерофоров, конкуренцию за экологические ниши и индукцию системной устойчивости растений, определяет высокий потенциал данных микроорганизмов для разработки экологически безопасных технологий защиты сельскохозяйственных культур.

Цель исследования – оценить антагонистическую и ростостимулирующую активность штаммов *P. agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti*

В-14756 в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium* и их способность снижать токсическое воздействие патогенов на злаковые культуры.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – штаммы бактерий, выделенные на начальном этапе работы¹ [43] и депонированные в Национальном биоресурсном центре Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия): *Pantoea agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756. Штаммы характеризуются идентичными культурально-морфологическими свойствами: это грамотрицательные палочки, которые при росте на агаризованной среде образуют желтые округлые колонии с гладким краем и блестящей ровной поверхностью.

Изучаемые штаммы обладают выраженными ростостимулирующими свойствами, включающими способность к фиксации атмосферного азота, мобилизации труднорастворимых фосфатов, а также к синтезу фитогормонов – индолил-3-уксусной и гиббереллиновой кислот. Кроме того, они проявляют высокую антагонистическую активность в отношении фитопатогенных грибов *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529 и *Botrytis cinerea* F-1006² [43].

Для проведения анализов готовили суспензию исследуемых штаммов на пептонной воде до достижения оптической плотности 0,8–1,0 ед. по шкале МакФарланда. Полученный инокулюм в объеме 1 мл вносили в 10 мл бульона Луриа-Бертани в модификации Миллера и культивировали 24 ч при температуре 28 ± 2 °C на орбитальном шейкере со скоростью 110 об/мин. По окончании инкубации бактериальные клетки отделяли от культуральной жидкости центрифугированием при 8000 об/мин в течение 10 мин. Для дальнейшего анализа использовали надосадочную жидкость, свободную от клеток микроорганизмов [43].

Антагонистическую активность исследовали в отношении: *F. culmorum* (W. G. Smith), Sacc.; *F. poae* (C. H. Peck) Wollenw. и штамма, который относится к *F. tricinctum* species complex (*F. tricinctum*). Выделение штаммов грибов *Fusarium* из семенного материала злаковых культур, выращенных на территории Красноярского края (Россия), проводили в соответствии с методикой, принятой в лаборатории микологии и фитопатологии ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (Санкт-Петербург, Россия)³. Таксономическую принадлежность выделенных изолятов определяли на основе комплекса макро- и микроморфологических характеристик, следуя методике [44].

¹ Фотина Н. В. Биотехнология получения биопрепарата на основе новых штаммов ризобактерий: дис. ... канд. биол. наук: 4.3.5. Кеморо, 2026. 174 с.

² Там же.

³ Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Левитин М. М., Новожилов К. В. Фузариоз зерновых культур. М.: ВИЗР; 2011. 140 с.

Антагонистическую активность штаммов оценивали методами лунок [43], совместного культивирования [45] и воздействия летучих органических соединений [46].

Согласно методу лунок, тест-культуры предварительно выращивали на картофельно-глюкозном агаре («Диа-М», Россия) в соответствии с методиками микологического культивирования. В чашках Петри с агаризованной средой, засеянной фитопатогенными микроорганизмами, вырезали лунки диаметром 6 мм и вносили в них по 300 мкл бесклеточной культуральной жидкости исследуемого штамма. Чашки инкубировали при температуре $26 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 5 суток, после чего измеряли зону подавления роста фитопатогена вокруг лунки [43].

При использовании метода совместного культивирования для опыта применяли чашки Петри с картофельно-глюкозным агаром. На одной половине чашки бактериальную культуру высевали прямым штрихом по поверхности среды, а на расстоянии 4 см от него помещали агаровый блок с мицелием фитопатогенного гриба. Посевы инкубировали при температуре $26 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 5 суток. По окончании культивирования антагонистическую активность оценивали по характеру роста мицелия гриба в направлении бактериального штриха и степени ингибирования его развития относительно контрольного варианта (без бактериальной культуры) [45].

Для оценки ингибирования летучими органическими соединениями использовали метод совместного культивирования в двухсекционных чашках Петри по методике W. Li et al. [46] в модификации. В одну секцию вносили картофельно-глюкозный агар, далее в ее центр помещали агаровый блок с активно растущим мицелием фитопатогенного гриба. Во вторую секцию вносили агаризованную среду Лурия-Бертани в модификации Миллера, на поверхность которой исследуемый бактериальный штамм высевали плотным штрихом. После инокуляции обеих секций чашки герметизировали парафином для накопления летучих метаболитов бактерий в замкнутом пространстве. Культивирование проводили при температуре $26 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 5 суток. Антагонистическую активность оценивали по степени подавления роста мицелия фитопатогенного гриба под воздействием летучих органических соединений бактериального происхождения. В качестве показателя использовали диаметр колонии гриба, который сравнивали с контрольным вариантом.

На следующем этапе исследования выявляли способность бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое действие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.). Для этого семена стерилизовали 5 % раствором гипохлорита натрия (10 мин) с последующей пятикратной промывкой стерильной дистиллированной водой и подсушиванием в асептических условиях в течение 2 ч⁴ [43].

Для создания инфекционного фона использовали суспензию фитопатогена с концентрацией, составляющей $2,5 \times 10^5$ спор/мл, полученную смывом мицелия и спор с семисуточной культуры, выращенной на скошенном агаре при $26 \pm 2^\circ\text{C}$. Семена инокулировали в этой суспензии в течение 2 ч, затем после подсушивания обрабатывали бактериальными изолятами из расчета 2 л/т. Обработанные семена помещали в чашках Петри на увлажненных фильтровальных дисках и инкубировали в климатической камере KBWF 720 (Binder, Германия) при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажности 40 % в течение 7 суток. В качестве контроля использовали семена, не обработанные ни фитопатогенами, ни консорциумом [47]. Все эксперименты проводили в трехкратной повторности.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения антагонистической активности штаммов *Pantoea* в отношении фитопатогенов методами лунок, совместного культивирования и подавления летучими органическими соединениями представлены на рисунках 1–3 и в таблице 1.

Сравнительный анализ антагонистической активности исследуемых штаммов рода *Pantoea* выявил различия в спектре и выраженности подавления фитопатогенных грибов в зависимости от штамма бактерии, вида фитопатогена и условий проведения эксперимента [48, 49].

По методу лунок наиболее выраженные ингибирующие свойства проявил штамм *P. vagans* B-14727. Максимальная зона ингибирования отмечена к *F. tricinctum* – 6,0 см. Для *F. poae* и *F. culmorum* этот показатель составил 4,8 и 3,5 см соответственно. По сравнению с *P. agglomerans* B-14726 активность *P. vagans* B-14727 выше в 1,4–2,4 раза: в отношении *F. poae* – 4,8 против 2,5 см, *F. culmorum* – 3,5 против 2,4 см. Высокая антагонистическая активность *P. vagans* соотносится с имеющимися литературными данными о способности представителей данного вида продуцировать антибиотики пантоцин, гербиколин и псенаназин-подобные соединения, подавляющие рост фитопатогенов [50].

Штамм *P. agglomerans* B-14726 при использовании метода лунок проявлял умеренную активность только к *F. culmorum* и *F. poae* с зонами ингибирования 2,4 и 2,5 см соответственно. Однако при совместном культивировании эффективность штамма значительно возрастала. Максимальный уровень ингибирования касательно *F. tricinctum* достиг 63,3 %, что на 5,5 % ниже, чем у *P. vagans* B-14727 (68,8 %).

Полученные результаты согласуются с литературными данными о высокой антагонистической активности *P. agglomerans* к фитопатогенным микромицетам. Показано, что данный вид эффективно подавляет рост грибов родов *Penicillium*, *Alternaria*, *Curvularia* и *Fusarium*. В частности, в случае с *Fusarium* наблюдалось уменьшение радиуса роста колоний фитопатогена

⁴ Гагкаева Т. Ю. ...

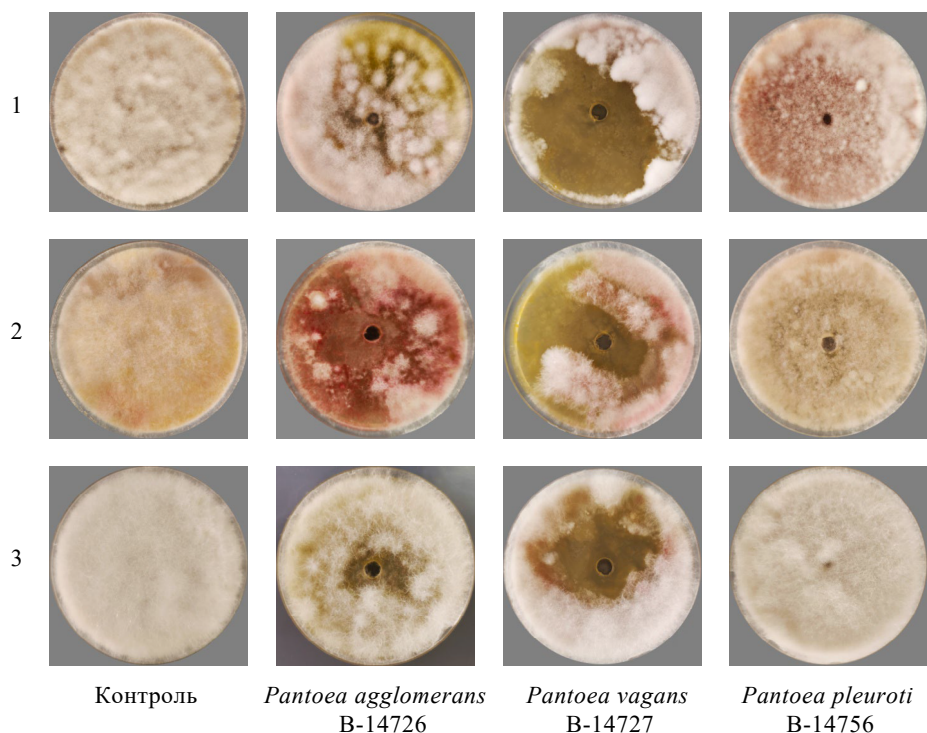


Рисунок 1. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом лунок) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 1. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (well diffusion): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*

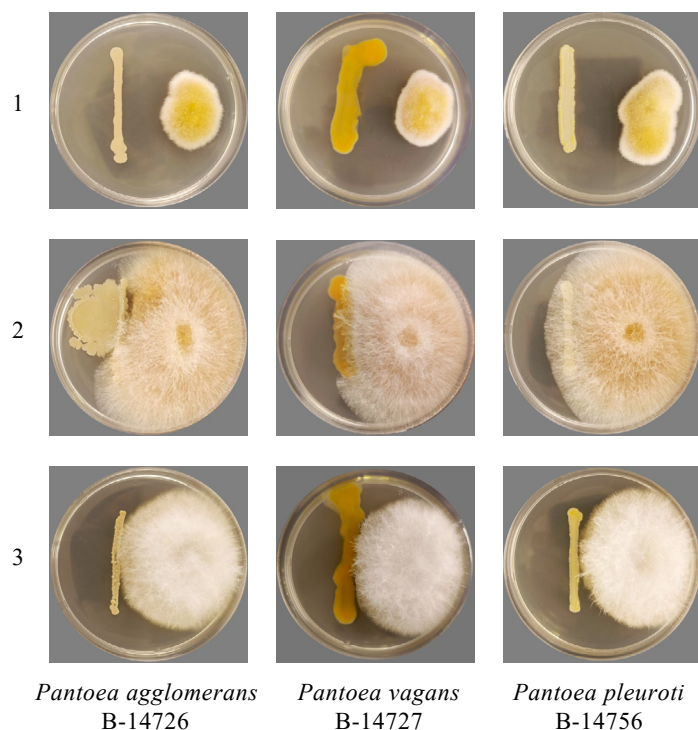


Рисунок 2. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом совместного культивирования) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 2. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (co-cultivation method): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*

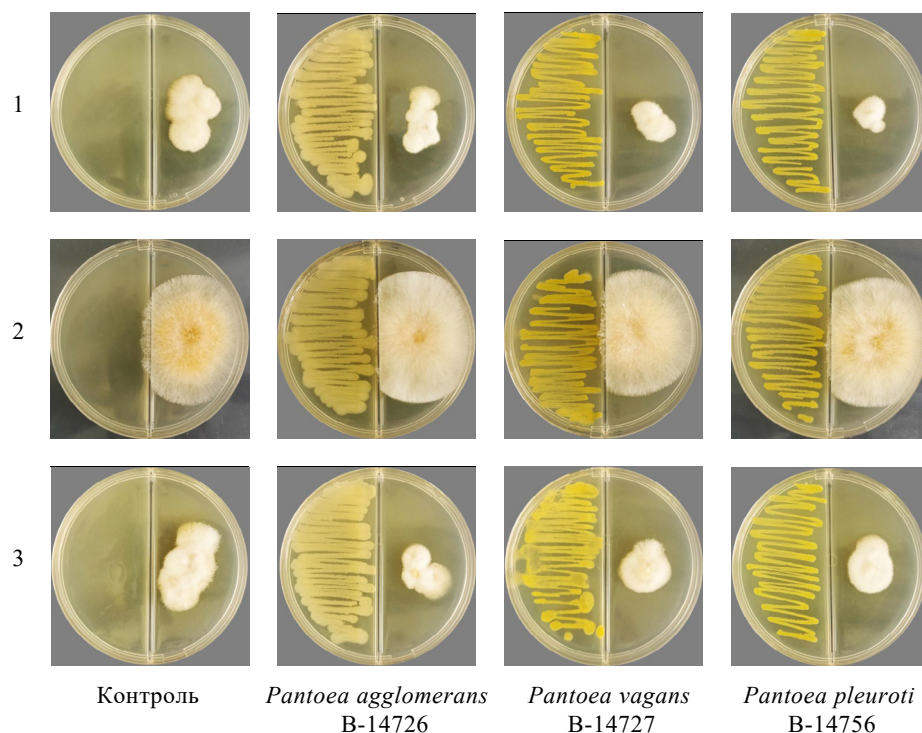


Рисунок 3. Антагонистическая активность штаммов *Pantoea* (методом ингибирования роста летучими органическими соединениями) в отношении фитопатогенов: 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; 3 – *Fusarium poae*

Figure 3. Antipathogenic activity of *Pantoea* strains (growth inhibition by volatile organic compounds): 1 – *Fusarium tricinctum*; 2 – *Fusarium culmorum*; and 3 – *Fusarium poae*

Таблица 1. Результаты определения антагонистической активности *Pantoea* в отношении фитопатогенов

Table 1. Antagonistic activity of *Pantoea* against phytopathogens

Фитопатоген	Штамм		
	<i>Pantoea agglomerans</i> B-14726	<i>Pantoea vagans</i> B-14727	<i>Pantoea pleuroti</i> B-14756
Метод лунок, см			
<i>Fusarium tricinctum</i>	0	$6,0 \pm 0,3$	0
<i>Fusarium culmorum</i>	$2,4 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,2$	0
<i>Fusarium poae</i>	$2,5 \pm 0,1$	$4,8 \pm 0,2$	0
Метод совместного культивирования, %			
<i>Fusarium tricinctum</i>	$63,3 \pm 3,1$	$68,8 \pm 3,4$	0
<i>Fusarium culmorum</i>	0	0	0
<i>Fusarium poae</i>	0	$42,2 \pm 2,1$	$42,2 \pm 2,1$
Метод ингибирования роста летучими органическими соединениями, %			
<i>Fusarium tricinctum</i>	$54,6 \pm 2,7$	$46,5 \pm 2,3$	$53,4 \pm 2,6$
<i>Fusarium culmorum</i>	$1,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$
<i>Fusarium poae</i>	$38,7 \pm 1,9$	$30,6 \pm 1,5$	$30,6 \pm 1,5$

до 27–35 см, что свидетельствует о выраженной антифунгальной активности штаммов *P. agglomerans* [51].

В работе М. Saadaoui et al. [52] эндофитные штаммы *P. agglomerans*, выделенные из корней пшеницы, эффективно подавляли рост *F. culmorum* при совместном культивировании. Авторы отмечают формирование выраженной зоны ингибирования между колониями микроорганизмов и связывают антифунгальный эффект с продукцией сидерофоров, гидролитических фер-

ментов и фитогормонов, участвующих в подавлении развития фитопатогена и повышении устойчивости растений к инфекции.

P. agglomerans продуцирует антибиотические соединения (гербиколины А, гербиколины В и андримин), обладающие выраженным фунгистатическим действием в отношении представителей рода *Fusarium* [53, 54]. В связи с этим можно предположить, что высокий антагонистический потенциал штамма *P. agglomerans*

В-14726, который выявлен в настоящей работе, обусловлен продуцированием аналогичных соединений. Тем не менее для понимания механизмов антагонистической активности требуется проведение дополнительных исследований.

Особый интерес представляет штамм *P. pleuroti* В-14756. При использовании метода лунок антагонистическая активность данного штамма не проявлялась ни в одном из исследованных вариантов. Однако в условиях совместного культивирования *P. pleuroti* В-14756 демонстрировал выраженное подавление роста фитопатогенов: в отношении *F. poae* уровень ингибирования составлял 42,2 %. Таким образом, активность *P. pleuroti* В-14756 сопоставима с эффективностью *P. agglomerans* В-14726 и лишь незначительно уступает *P. vagans* В-14727. Отсутствие зон ингибирования методом лунок при высокой активности в условиях совместного культивирования указывает на то, что антагонистический эффект данного штамма связан преимущественно с продуцированием летучих органических соединений или контактными механизмами взаимодействия. Аналогичные особенности описаны для растительно-ассоциированных представителей рода *Pantoea*, проявляющих выраженную биоконтрольную активность в отношении *Fusarium* spp. [55–57].

Максимальная антифунгальная активность среди всех исследованных вариантов зафиксирована у *P. vagans* В-14727 в отношении *F. tricinctum* (комплекс видов) при совместном культивировании – 68,8 %. Данный показатель превышал эффективность *P. agglomerans* В-14726 против *F. poae*, определенную методом лунок (2,5 см) более чем в 27 раз при сравнении относительных величин ингибирования.

Наибольшим антифунгальным потенциалом обладал штамм *P. vagans* В-14727, продемонстрировавший максимальный ингибирующий эффект по всем используемым методам (до 6,0 см методом лунок и до 68,8 % при сокультивировании). *P. agglomerans* В-14726 характеризуется умеренной, но стабильной активностью, особенно выраженной в условиях совместного роста (до 63,3 %). Эффективность *P. pleuroti* В-14756 носит избирательный характер и проявляется преимущественно при непосредственном контакте с патогеном, обеспечивая подавление роста на уровне 46,6 %. Полученные данные подтверждают перспективность использования изученных штаммов рода *Pantoea* в качестве агентов биологического контроля фитопатогенных грибов рода *Fusarium*.

Пик степени ингибирования роста фитопатогенов летучими органическими соединениями выявлен в отношении *F. tricinctum*. Для *P. agglomerans* В-14726 подавление роста составило 54,65 %; для *P. vagans* В-14727 – 46,5 %; для *P. pleuroti* В-14756 – 53,4 %, что свидетельствует о высокой чувствительности данного патогена к летучим метаболитам исследуемых бактерий.

В отношении *F. poae* также наблюдалось выраженное ингибирующее действие: степень подавления роста

составила 38,7 % для *P. agglomerans* В-14726 и 30,6 % для *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756.

Наименьшая чувствительность к летучим органическим соединениям бактерий отмечена у *F. culmorum*. Подавление роста данного фитопатогена не превышало 3,0 %, что указывает на практически полное отсутствие ингибирующего эффекта исследуемых штаммов.

Результаты анализа способности бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое воздействие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) представлены в таблице 2.

Анализ показал наличие выраженных ростостимулирующей и антагонистической активностей бактерий рода *Pantoea* в условиях заражения семян фитопатогенными грибами *Fusarium*. Исследуемые штаммы в различной степени способствовали повышению всхожести семян, стимуляции роста проростков и развитию корней по сравнению с инфицированным контролем.

Максимальный положительный эффект выявлен при заражении *F. culmorum*. В инфицированном контроле прорастание семян отсутствовало. Обработка штаммом *P. pleuroti* В-14756 обеспечивала прорастание в среднем 53,3 % семян, формирование ростков длиной 1,7 см и корней длиной 4,5 см. При обработке штаммом *P. vagans* В-14727 прорастало в среднем 30,0 % семян, а длина ростка и корня составляла 1,2 и 2,5 см соответственно. Штамм *P. agglomerans* В-14726 проявлял менее выраженное защитное действие: количество проросших семян достигало 13,3 %, длина ростка – 0,6 см, длина корня – 1,0 см. При этом доля зараженных семян во всех вариантах оставалась высокой (90,0–96,7 %).

При заражении *F. tricinctum* положительного влияния бактериальных штаммов на количество проросших семян не выявлено. В инфицированном контроле прорастало в среднем 36,7 % семян, тогда как после обработки *P. agglomerans* В-14726, *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756 данный показатель был равен 33,3; 26,7 и 23,3 % соответственно. Длина ростков также была ниже контрольного значения. Вместе с тем *P. vagans* В-14727 и *P. pleuroti* В-14756 способствовали увеличению средней длины корней до 5,3 и 5,9 см соответственно по сравнению с 4,8 см в инфицированном контроле. Обработка штаммом *P. pleuroti* В-14756 также сопровождалась снижением доли зараженных семян с 96,7 до 80,0 %.

В условиях заражения *F. poae* штаммы *P. agglomerans* В-14726 и *P. vagans* В-14727 повышали количество проросших семян с 33,3 % в контроле до 46,7 и 56,7 % соответственно. Штамм *P. pleuroti* В-14756 не изменял количество проросших семян, но обеспечивал увеличение средней длины корня до 7,1 см по сравнению с 6,3 см в инфицированном контроле. Более значительное снижение доли зараженных семян в опыте с *F. poae* зафиксировано при использовании *P. agglomerans* В-14726 – с 96,7 до 80,0 % по сравнению с другими вариантами.

Таблица 2. Способность бактерий рода *Pantoea* снижать токсическое воздействие фитопатогенов на пшеницу (*Triticum aestivum* L.)Table 2. The ability of bacteria of the genus *Pantoea* to reduce the toxic effects of phytopathogens on wheat (*Triticum aestivum* L.)

Показатель	Контроль	<i>Pantoea agglomerans</i> B-14726	<i>Pantoea vagans</i> B-14727	<i>Pantoea pleuroti</i> B-14756
<i>Fusarium tricinctum</i>				
Количество проросших семян, %	36,7 ± 1,2	33,3 ± 0,7	26,7 ± 1,0	23,3 ± 1,1
Количество зараженных семян, %	96,7 ± 3,3	95,0 ± 2,5	96,7 ± 3,3	80,0 ± 2,3
Длина ростка, см	3,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,5 ± 0,1
Длина корня, см	4,8 ± 0,1	4,7 ± 0,2	5,3 ± 0,2	5,9 ± 0,1
<i>Fusarium culmorum</i>				
Количество проросших семян, %	0	13,3 ± 0,4	30,0 ± 1,1	53,3 ± 1,7
Количество зараженных семян, %	96,7 ± 3,3	93,3 ± 2,4	96,7 ± 3,3	90,0 ± 1,9
Длина ростка, см	0	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,7 ± 0,1
Длина корня, см	0	1,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	4,5 ± 0,2
<i>Fusarium poae</i>				
Количество проросших семян, %	33,3 ± 1,4	46,7 ± 1,6	56,7 ± 2,3	33,3 ± 0,8
Количество зараженных семян, %	96,7 ± 3,3	80,0 ± 2,5	95,0 ± 2,0	90,0 ± 2,5
Длина ростка, см	5,9 ± 0,3	2,9 ± 0,1	2,2 ± 0,1	3,6 ± 0,1
Длина корня, см	6,3 ± 0,2	5,9 ± 0,2	3,2 ± 0,1	7,1 ± 0,3
Контроль без заражения				
Количество проросших семян, %	56,7 ± 1,7	23,3 ± 0,5	63,3 ± 2,0	76,7 ± 2,2
Количество зараженных семян, %	0	0	0	0
Длина ростка, см	7,1 ± 0,1	3,0 ± 0,1	6,4 ± 0,1	6,2 ± 0,1
Длина корня, см	6,0 ± 0,2	3,9 ± 0,2	5,9 ± 0,1	6,8 ± 0,2

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что штаммы *P. agglomerans* B-14726 и *P. vagans* B-14727 преимущественно проявляли ростостимулирующее действие, способствуя увеличению длины ростков и корней, тогда как *P. pleuroti* B-14756 отличался наиболее выраженными антагонистическими свойствами и обеспечивал повышение всхожести семян в условиях сильного фитопатогенного воздействия. Данные подтверждают перспективность использования исследуемых штаммов рода *Pantoea* в качестве агентов биоконтроля фитопатогенов злаковых культур.

Выводы

Установлено, что изученные штаммы *Pantoea agglomerans* B-14726, *P. vagans* B-14727 и *P. pleuroti* B-14756 обладают антагонистической активностью в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium*. Выраженность и характер наблюдаемого эффекта определялись видом фитопатогена, а также преобладающими механизмами бактериального антагонизма, которые по-разному проявлялись в различных экспериментальных моделях. Штамм *P. vagans* B-14727 превосходил другие штаммы по антифунгальной активности: максимальные показатели ингибирования получены в отношении *Fusarium tricinctum* методом лунок (6,0 см) и при совместном культивировании (68,8 %). Штамм *P. agglomerans* B-14726 обладал стабильной антагонистической активностью и обеспечивал высокий уровень подавления роста фитопатогенов как при совместном

культивировании (до 63,3 %), так и под действием летучих органических соединений (до 54,6 %). *P. pleuroti* B-14756 был лишен антагонистической активности при исследовании методом лунок, однако эффективно ингибировал рост фитопатогенов при совместном культивировании и воздействии летучих органических соединений, что свидетельствует о важной роли контактных взаимодействий и летучих метаболитов в механизме его антагонизма. Чувствительным к действию исследуемых штаммов оказался *F. tricinctum*, в то время как *F. culmorum* обладал наименьшей чувствительностью к летучим органическим соединениям бактерий. Максимальные защитные свойства зафиксированы у штамма *P. pleuroti* B-14756, в то время как у *P. agglomerans* B-14726 и *P. vagans* B-14727 обнаруживали преимущественно ростостимулирующее действие. Полученные результаты подтверждают перспективность использования изученных штаммов рода *Pantoea* в качестве основы биологического препарата для защиты злаковых культур от фузариозной инфекции и повышения устойчивости растений к фитопатогенам.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no potential conflict of interest regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

Список литературы / References

1. Schmidt R, Jager V, Dickschat JS, Garbeva P, *et al.* Deciphering the genome and secondary metabolome of the plant pathogen *Fusarium culmorum*. FEMS Microbiology Ecology. 2018;94(6):fiy078. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy078>
2. Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю., Нешумаева Н. А. Влияние фильтрата культуральной жидкости *Fusarium sporotrichioides* на каллусную культуру пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025. Т. 26. № 1. С. 129–140. [Stupko VYu, Lugovtsova SYu, Neshumaeva NA. Effect of culture filtrates of *Fusarium sporotrichioides* on wheat callus culture. Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):129–140. (In Russ.)] <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.129-140>
3. Birr T, Hasler M, Verreet JA, Klink H. Composition and predominance of *Fusarium* species causing *Fusarium* head blight in winter wheat grain depending on cultivar susceptibility and meteorological factors. Microorganisms. 2020;8(4):617. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040617>
4. Somma S, Logrieco AF, Moretti A, Scarpino V, Reyneri A, *et al.* Impact of fungicide application to control T-2 and HT-2 toxin contamination and related *Fusarium sporotrichioides* and *F. langsethiae* producing species in durum wheat. Crop Protection. 2022;159:106020. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106020>
5. Góral T, Grelewskia-Nowotko K, Ochodzki P, Wiewióra B. DNA-based quantification of *Fusarium* species in winter wheat grain in Poland from 2014 to 2017 and 2019. Agronomy. 2025;15(10):2430. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102430>
6. Mesterhazy A. What is *Fusarium* head blight (FHB) resistance and what are its food safety risks in wheat? Problems and solutions – a review. Toxins. 2024;16(1):31. <https://doi.org/10.3390/toxins16010031>
7. Nielsen LK, Cook DJ, Edwards SG, Ray RV. The prevalence and impact of *Fusarium* head blight pathogens and mycotoxins on malting barley quality in the UK. International Journal of Food Microbiology. 2014;179:38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.03.023>
8. Qu Z, Ren X, Du Z, Hou J, Li Y, *et al.* *Fusarium* mycotoxins: The major food contaminants. mLife. 2024;3(2):176–206. <https://doi.org/10.1002/mlf2.12112>
9. Torres AM, Palacios SA, Yerkovich N, Palazzini JM, Battilani P, *et al.* *Fusarium* head blight and mycotoxins in wheat: Prevention and control strategies across the food chain. World Mycotoxin Journal. 2019;12(4):333–355. <https://doi.org/10.3920/WMJ2019.2438>
10. Spanic V, Maricevic M, Ikic I, Sulyok M, Sarcevic H. Three-year survey of *Fusarium* multi-metabolites/mycotoxins contamination in wheat samples in potentially epidemic FHB conditions. Agronomy. 2023;13(3):805. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030805>
11. Pierzgalski A, Bryła M, Kanabus J, Modrzejewska M, Podolska G. Updated review of the toxicity of selected *Fusarium* toxins and their modified forms. Toxins. 2021;13(11):768. <https://doi.org/10.3390/toxins13110768>
12. Rachitha P, Krupashree K, Jayashree GV, Gopalan N, Khanum F. Growth inhibition and morphological alteration of *Fusarium sporotrichioides* by *Mentha piperita* essential oil. Pharmacognosy Research. 2017;9(1):74–79. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.199771>
13. Morcia C, Tumino G, Ghizzoni R, Badeck FW, Lattanzio VMT, *et al.* Occurrence of *Fusarium langsethiae* and T-2 and HT-2 toxins in Italian malting barley. Toxins. 2016;8(8):247. <https://doi.org/10.3390/toxins8080247>
14. Nossol C, Landgraf P, Barta-Böszörmenyi A, Kahlert S, Kluess J, *et al.* Deoxynivalenol affects cell metabolism *in vivo* and inhibits protein synthesis in IPEC-1 cells. Mycotoxin Research. 2023;39(3):219–231. <https://doi.org/10.1007/s12550-023-00489-z>
15. Li J, Wang Y, Deng Y, Wang X, Wu W, *et al.* Toxic mechanisms of the trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol on protein synthesis. Food and Chemical Toxicology. 2022;164:113044. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113044>
16. Gil-Serna J, Patiño B, Verheeeke-Vaessen C, Vázquez C, Medina Á. Searching for the *Fusarium* spp. which are responsible for trichothecene contamination in oats. Using metataxonomy to compare the distribution of toxigenic species in fields from Spain and the UK. Toxins. 2022;14(9):592. <https://doi.org/10.3390/toxins14090592>
17. Chastukhina IB, Ryazanov EA, Ponomarev SN, Ivanova IO, Pavlova SY, *et al.* *Fusarium* species associated with spikes and grains of cereal crops in the Volga region: Virulence and toxin-producing potential. Journal of Fungi. 2025;11(12):841. <https://doi.org/10.3390/jof11120841>
18. Johns LE, Bebbler DP, Gurr SJ, Brown NA. Emerging health threat and cost of *Fusarium* mycotoxins in European wheat. Nature Food. 2022;3(12):1014–1019. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00655-z>
19. Motallebi P, Tonti S, Niknam V, Ebrahimzadeh H, Pisi A, *et al.* Induction of basal resistance by methyl jasmonate against *Fusarium culmorum* in bread wheat. Cereal Research Communications. 2017;45(2):248–259. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.008>

20. Piasecka A, Sawikowska A, Witaszak N, Waśkiewicz A, Kańczurzeńska M, et al. Metabolomic aspects of conservative and resistance-related elements of response to *Fusarium culmorum* in the grass family. *Cells*. 2022;11(20):3213. <https://doi.org/10.3390/cells11203213>
21. Miedaner T, Vasquez A, Castiblanco V, Castillo HE, Foroung N, et al. Genome-wide association study for deoxynivalenol production and aggressiveness in wheat and rye head blight by resequencing 92 isolates of *Fusarium culmorum*. *BMC Genomics*. 2021;22:630. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07931-5>
22. Shi W, Tan Y, Wang S, Gardiner DM, De Saeger S, et al. Mycotoxigenic potentials of *Fusarium* species in various culture matrices revealed by mycotoxin profiling. *Toxins*. 2017;9(1):6. <https://doi.org/10.3390/toxins9010006>
23. Yan H, Nelson B. Effect of temperature on *Fusarium solani* and *F. tricinctum* growth and disease development in soybean. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2020;42(4):527–537. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1745893>
24. Hellin P, Dedeurwaerder G, Duvivier M, Scauflaire J, Huybrechts B, et al. Relationship between *Fusarium* spp. diversity and mycotoxin contents of mature grains in southern Belgium. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2016;33(7):1228–1240. <https://doi.org/10.1080/19440049.2016.1185900>
25. Wang Y, Wang R, Sha Y. Distribution, pathogenicity and disease control of *Fusarium tricinctum*. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:939927. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.939927>
26. Karlsson I, Persson P, Friberg H. *Fusarium* head blight from a microbiome perspective. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:628373. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628373>
27. Fotina NV, Serazetdinova YR, Kolpakova DE, Asyakina LK, Atuchin VV, et al. Enhancement of wheat growth by plant growth-stimulating bacteria during phytopathogenic inhibition. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2024;(60):103294. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103294>
28. Shi C, Yan P, Li J, Wu H, Li Q, et al. Biocontrol of *Fusarium graminearum* growth and deoxynivalenol production in wheat kernels with bacterial antagonists. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014;11(1):1094–1105. <https://doi.org/10.3390/ijerph110101094>
29. Awal MA, Abdullah NS, Prismantoro D, Dwisandi RF, Safitri R, et al. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against *Fusarium* in horticultural crops. *Cogent Food & Agriculture*. 2024;10(1):2394685. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2394685>
30. Villavicencio-Vásquez M, Espinoza-Lozano F, Espinoza-Lozano L, Coronel-León J. Biological control agents: Mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. *Frontiers in Agronomy*. 2025;7:1578915. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915>
31. Lorenzi AS, Bonatelli ML, Chia MA, Peressim L, Quecine MC. Opposite sides of *Pantoea agglomerans* and its associated commercial outlook. *Microorganisms*. 2022;10(10):2072. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10102072>
32. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):162–171. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
33. Kamber T, Lansdell TA, Stockwell VO, Ishimaru CA, Smits THM, et al. Characterization of the biosynthetic operon for the antibacterial peptide herbicolin in *Pantoea vagans* biocontrol strain C9-1 and incidence in *Pantoea* species. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012;78(12):4412–4419. <https://doi.org/10.1128/AEM.07351-11>
34. Quecine MC, Araújo WL, Rossetto PB, Ferreira A, Tsui S, et al. Sugarcane growth promotion by the endophytic bacterium *Pantoea agglomerans* 33.1. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012;78(21):7511–7518. <https://doi.org/10.1128/AEM.00836-12>
35. Kumar P, Rani S, Dahiya P, Kumar A, Dang AS, et al. Whole genome analysis for plant growth promotion profiling of *Pantoea agglomerans* CPHN2, a non-rhizobial nodule endophyte. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:998821. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.998821>
36. Luziatelli F, Ficca AG, Cardarelli M, Melini F, Cavalieri A, et al. Genome sequencing of *Pantoea agglomerans* C1 provides insights into molecular and genetic mechanisms of plant growth-promotion and tolerance to heavy metals. *Microorganisms*. 2020;8(2):153. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020153>
37. Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. How do plant growth-promoting bacteria use plant hormones to regulate stress reactions? *Plants*. 2024;13(17):2371. <https://doi.org/10.3390/plants13172371>
38. Li L, Huang T, Liu H, Zang J, Wang P, et al. Purification, structural characterization and anti-UVB irradiation activity of an extracellular polysaccharide from *Pantoea agglomerans*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;137:1002–1012. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.191>
39. Ansari FA, Ahmad I, Pichtel J, Husain FM. *Pantoea agglomerans* FAP10: A novel biofilm-producing PGPR strain improves wheat growth and soil resilience under salinity stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2024;222:105759. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105759>
40. Soltani H, Hassani A, Sari MBA, Hanifei M. The phosphate solubilizing and N fixing *Pantoea agglomerans* bacteria affecting yield and biochemical properties including nutrient uptake of different tomato genotypes. *Journal of Trace Elements and Minerals*. 2025;12:100225. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2025.100225>

41. Бородин Е. Е., Гордиенко А. В., Плешивцев И. И., Фотина Н. В., Федорова А. М. и др. Биологический потенциал нового бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 710–722. [Borodina EE, Gordienko AV, Pleshivtsev II, Fotina NV, Fedorova AM, et al. New *Pantoea* strain as antistress agent and growth stimulator in grain growing. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4):710–722. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>
42. Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Тупикин А. Е., Асякина Л. К., Любимова Н. А. Генетические детерминанты антагонистической и ростостимулирующей активности штамма *Pantoea pleuroti*. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 234–246. [Serazetdinova YuR, Fotina NV, Tupikin AE, Lyubimova NA, Asyakina LK. Genetic determinants of antagonistic and growth-stimulating activity of *Pantoea pleuroti*. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):234–246. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2645>
43. Asyakina LK, Serazetdinova YuR, Frolova AS, Fotina NV, Neverova OA, et al. Antagonistic activity of extremophilic bacteria against phytopathogens in agricultural crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):565–575. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2457>
44. Gerlach W, Nirenberg H. The genus *Fusarium*: A pictorial atlas. Hamburg: Paul Parey; 1982. 406 p.
45. Nysanth NS, Sivapriya SL, Natarajan C, Anith KN. Novel *in vitro* methods for simultaneous screening of two antagonistic bacteria against multiple fungal phytopathogens in a single agar plate. 3 Biotech. 2022;12(6):140. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03205-3>
46. Li W, Wang X, Jiang Y, Cui S, Hu J, et al. Volatile organic compounds produced by co-culture of *Burkholderia vietnamiensis* B418 with *Trichoderma harzianum* T11-W exhibits improved antagonistic activities against fungal phytopathogens. International Journal of Molecular Sciences. 2024;25(20):11097. <https://doi.org/10.3390/ijms252011097>
47. Goswami M, Deka S. Isolation of a novel rhizobacteria having multiple plant growth promoting traits and antifungal activity against certain phytopathogens. Microbiological Research. 2020;240. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126516>
48. Dutkiewicz J, Mackiewicz B, Lemieszek MK, Golec M, Milanowski J. *Pantoea agglomerans*: A mysterious bacterium of evil and good. Part IV. Beneficial effects. Annals of Agricultural and Environmental Medicine. 2016;23(2):206–222. <https://doi.org/10.5604/12321966.1203879>
49. Walterson AM, Stavrinos J. *Pantoea*: Insights into a highly versatile and diverse genus within the *Enterobacteriaceae*. FEMS Microbiology Reviews. 2015;39(6):968–984. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv027>
50. Bi W, Wang R, Yang Y, Wang Y, Ma Z, et al. *Pantoea vagans* strain BWL1 controls blue mold in mandarin fruit by inhibiting ergosterol biosynthesis in *Penicillium expansum*. Biological Control. 2021;163:104745. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104745>
51. Turaeva B, Zukhritdinova N, Kutlieva G, Makhkamov A, Keldiyorov X. Microflora and plant pathogenic fungi affecting bacteria in grape plantations in Uzbekistan. SABRAO Journal of Breeding and Genetics. 2023;55(6):2037–2051. <http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.6.17>
52. Saadaoui M, Faize M, Rifai A, Tayeb K, Omri Ben Youssef N, et al. Evaluation of Tunisian wheat endophytes as plant growth promoting bacteria and biological control agents against *Fusarium culmorum*. PLOS One. 2024;19(5):e0300791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300791>
53. Xu S, Liu YX, Cernava T, Wang H, et al. *Fusarium* fruiting body microbiome member *Pantoea agglomerans* inhibits fungal pathogenesis by targeting lipid rafts. Nature Microbiology. 2022;7:831–843. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01131-x>
54. Ma Y, Yin Y, Rong C, Chen S, Liu Y, et al. *Pantoea pleuroti* sp. nov., isolated from the fruiting bodies of *Pleurotus eryngii*. Current Microbiology. 2016;72:207–212. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0940-5>
55. Crosby KC, Rojas M, Sharma P, Johnson MA, et al. Genomic delineation and description of species and within-species lineages in the genus *Pantoea*. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1254999. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254999>
56. Duchateau S, Crouzet J, Dorey S, Aziz A. The plant-associated *Pantoea* spp. as biocontrol agents: Mechanisms and diversity of bacteria-produced metabolites as a prospective tool for plant protection. Biological Control. 2024;188:105441. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105441>
57. Guardiola-Márquez CE, Santos-Ramírez MT, Figueroa-Montes ML, Valencia-de Los Cobos EO, et al. Identification and characterization of beneficial soil microbial strains for the formulation of biofertilizers based on native plant growth-promoting microorganisms isolated from Northern Mexico. Plants. 2023;12(18):3262. <https://doi.org/10.3390/plants12183262>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Фасхутдинова Елизавета Рафаиловна / Elizaveta R. Faskhutdinova ORCID 0000-0001-9711-2145; eLIBRARY SPIN 6173-3576
Афони́на Ю́лия Евге́ньевна / Yulia E. Afonina ORCID 0009-0001-2669-7112; eLIBRARY SPIN 8622-1475
Шевель Арина Андреевна / Arina A. Shevel ORCID 0009-0000-3630-2826; eLIBRARY SPIN 5159-2151
Евдокимов Виталий Сергеевич / Vitaly S. Evdokimov
Нешумаева Надежда Алексеевна / Nadezhda A. Neshumaeva ORCID 0000-0002-7314-9418; eLIBRARY SPIN 5625-3519
Аксенова Лариса Михайловна / Larisa M. Aksenova ORCID 0009-0009-9927-3642; eLIBRARY SPIN 6604-7452
Федорова Анастасия Михайловна / Anastasiya M. Fedorova ORCID 0000-0002-8071-4411; eLIBRARY SPIN 4142-7468