

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>
<https://elibrary.ru/NEYDKD>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Биологический потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в защите от биотического стресса и стимуляции роста зерновых культур



Е. Е. Бородина^{1,*}, А. В. Гордиенко², И. И. Плешивцев¹,
Н. В. Фотина¹, А. М. Федорова¹, В. В. Мартиросян³

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

² ООО «Азот-Агро», Кемерово, Россия

³ Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 03.07.2025

Принята после рецензирования: 05.09.2025

Принята к публикации: 07.10.2025

*e-mail: kbordina1908@gmail.com

© Е. Е. Бородина, А. В. Гордиенко, И. И. Плешивцев,
Н. В. Фотина, А. М. Федорова, В. В. Мартиросян, 2025



Аннотация.

Овес (*Avena sativa* L.), являясь одной из важнейших сельскохозяйственных культур, подвержен воздействию широкого спектра фитопатогенных микроорганизмов, вызывающих значительные потери урожая. В связи с этим разработка эффективных и экологически безопасных методов защиты овса от инфекционных заболеваний представляет собой актуальную задачу современного сельского хозяйства. Цель исследования – изучить характеристики нового бактериального штамма рода *Pantoea*, выделенного из зерновых культур, для оценки его потенциала в качестве антагониста фитопатогенов и ростостимулятора растений.

Объект исследования – бактериальный штамм, изолированный из ярового овса сорта Маручак. Таксономическую идентификацию штамма проводили по последовательности гена 16S рПНК. Антагонистическую активность штамма оценивали в отношении фитопатогенов *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102. Способность штамма продуцировать фитогормоны и сидерофоры определяли спектрофотометрически. Способность штамма фиксировать атмосферный азот оценивали на анализаторе азота Rapid N Cube; солибилизацию неорганических фосфатов, калия и цинка, а также способность к формированию биопленок определяли культурально-зависимыми методами.

Выделенный штамм идентифицирован как *Pantoea pleuroti*. Штамм проявлял антагонистическую активность в отношении исследованных фитопатогенов; наибольший эффект отмечен в отношении *F. graminearum* F-877: зона ингибирования составила 62 мм (метод диффузии из агаровых блоков) и 12 мм (метод агаровых лунок). Штамм продуцировал фитогормоны: индолил-3-уксусную кислоту – 5,64 мг/мл, гиббереллиновую кислоту – 284,3 мкг/мл, кинетин – 9,46 мкг/мл; фиксировал атмосферный азот (680,0 мкг/мл); синтезировал сидерофоры (53,1 %); солибилизировал фосфаты (102,3 мкг/мл), калий и цинк, а также образовывал биопленки.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения штамма *P. pleuroti* в разработке биопрепаратов, направленных на повышение урожайности, для биологической защиты и стимуляции роста овса.

Ключевые слова. Овес, *Pantoea pleuroti*, ростостимулирующая активность, антагонистическая активность, фитопатогены, *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Erwinia rhapontici*, *Xanthomonas campestris*

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: Бородина 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. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2606>

New *Pantoea* Strain as Antistress Agent and Growth Stimulator in Grain Growing

Ekaterina E. Borodina^{1,*}, Andrey V. Gordienko²,
Ivan I. Pleshivtsev¹, Nataliya V. Fotina¹,
Anastasiya M. Fedorova¹, Vladimir V. Martirosyan³

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

² Azot-Agro Ltd, Kemerovo, Russia

³ Scientific Research Institute for the Baking Industry^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 03.07.2025

Revised: 05.09.2025

Accepted: 07.10.2025

*e-mail: kborodina1908@gmail.com

© E.E. Borodina, A.V. Gordienko, I.I. Pleshivtsev, N.V. Fotina,
A.M. Fedorova, V. V. Martirosyan, 2025



Abstract.

Oats (*Avena sativa* L.) is an important agricultural crop. Unfortunately, it is exposed to a wide range of phytopathogenic microorganisms that cause significant yield losses. As a result, agricultural science is on the outlook for new effective and sustainable pesticide methods. This research focused on a new bacterial strain of the *Pantoea* genus isolated from grain crops to assess its potential as an antagonist of phytopathogens and a plant growth stimulator.

The strain was isolated from the Maruchak spring oats variety. The taxonomic identification relied on the 16S rRNA gene sequence. The antagonistic activity was assessed against the phytopathogens *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292, and *Xanthomonas campestris* B-4102. The ability of the strain to produce phytohormones and siderophores was determined spectrophotometrically. The biological nitrogen fixation was assessed using a Rapid N Cube nitrogen analyzer. A set of culture-dependent methods made it possible to measure the zinc, phosphorus, and potassium solubilization activity, as well as the biofilm-forming potential.

The isolated strain was identified as *Pantoea pleuroti*. It exhibited antagonistic activity against the abovementioned phytopathogens. It was especially effective against *F. graminearum* F-877: the inhibition zone was 62 mm (agar block diffusion method) and 12 mm (agar well method). *P. pleuroti* produced such phytohormones as indole-3-acetic acid (5.64 mg/mL), gibberellic acid (284.3 µg/mL), and kinetin (9.46 µg/mL). In addition, it fixed atmospheric nitrogen (680.0 µg/mL), synthesized siderophores (53.1%), formed biofilms, and solubilized phosphates (102.3 µg/mL), potassium, and zinc.

The obtained results confirmed the potential of *P. pleuroti* as part of biofertilizers, bioprotectors, and oat growth stimulators.

Keywords. Oats, *Pantoea pleuroti*, growth-stimulating activity, antagonistic activity, phytopathogen, *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Erwinia rhapontici*, *Xanthomonas campestris*

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 25-16-20076: New *Pantoea* strains in plant immunity enhancement), Russian Science Foundation (Agreement No. 25-16-20076, April 17, 2025), and the Ministry of Education of Kuzbass (Agreement No. 01/2025, April 10, 2025).

For citation: 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>

Введение

Овес (*Avena sativa* L.) – одна из значимых зерновых культур, широко используемых в пищевой промышленности. Отличаясь высокой питательной ценностью, овес содержит белки, липиды (олеиновую, линолевую и пальмитиновую кислоты), углеводы (преимущественно крахмал), пищевые волокна (β-глюкан, арабиноксиланы, целлюлозу), витамины (A, D, E, B12), минералы (кальций, железо, цинк) [1]. Кроме того, в составе овса присутствуют фенольные соединения,

включая фенольные кислоты, флавоноиды, авенантрамиды [2]. В связи с растущим интересом к здоровому питанию потребление овса увеличивается. Это обусловлено его благоприятным влиянием на организм человека, например, улучшение пищеварения, снижение уровня холестерина и регуляция уровня глюкозы в крови [3].

Выращивание овса ограничивается биотическими стрессами, особенно воздействием различных заболеваний, вызываемых фитопатогенными грибами,

бактериями и вирусами [4]. Эти заболевания оказывают негативное влияние на количественные и качественные характеристики урожая [5]. Фитопатогены поражают все части растения на протяжении вегетационного периода, приводя к снижению урожайности, ухудшению хлебопекарных свойств зерна, а также накоплению микотоксинов, представляющих угрозу для здоровья человека и животных.

Общее число заболеваний, поражающих зерновые культуры, превышает 200 наименований, около 50 из них приводят к значительным экономическим потерям и характеризуются широким географическим распространением [6–8]. Ежегодные потери урожая вследствие этого оцениваются примерно в 20 %. Среди основных заболеваний овса следует отметить ржавчину, различные типы пятнистости листьев, корневые гнили, головню, бурую ржавчину, септориоз, мучнистую росу, фузариоз колоса, пирикулярриоз, а также ряд вирусных, нематодных и бактериальных инфекций [9–11]. Они способны привести к снижению урожайности или полной гибели растений.

Грибы рода *Fusarium*, в частности высоко агрессивный и широко распространенный вид *Fusarium graminearum*, вызывают фузариоз овса. Это заболевание считается одним из наиболее вредоносных, т. к. оказывает значительное негативное влияние на урожайность и качество зерна [12]. Данный фитопатоген инфицирует колоски овса преимущественно на стадии цветения. Развитие инфекции приводит к нарушению процессов формирования и налива зерна, вызывая преждевременное старение растения и формирование шуплых, легковесных зерен [13].

Фузариоз представляет серьезную угрозу не только с экономической точки зрения, вызывая значительные потери урожая, но и с точки зрения продовольственной безопасности [14]. Грибы *Fusarium* spp. продуцируют широкий спектр микотоксинов – вторичных метаболитов, обладающих токсическим действием на человека и животных [15]. Среди наиболее опасных микотоксинов, ассоциированных с фузариозом, выделяют зеараленон, обладающий эстрогенной активностью, трихотечены и их производные, оказывающие иммуносупрессивное и цитотоксическое действие. Эти микотоксины способны накапливаться в зерне, контаминируя пищевые продукты и корма, что представляет серьезный риск для здоровья человека и животных [16].

Bipolaris sorokiniana – фитопатоген зерновых [17], обладающий широким спектром поражения, включая семена, корневую систему, побеги и листья. В результате инфекции, вызываемой *B. sorokiniana*, у овса развиваются такие заболевания, как черный зародыш семян, обыкновенная корневая гниль и темно-бурая гельминтоспориозная пятнистость листьев [18]. Развитие черного зародыша негативно сказывается на качестве посевного материала, снижает всхожесть и служит первичным источником для развития вышеперечисленных заболеваний [19]. Корневая гниль, развиваю-

щаяся в результате заражения через почву или семена, способна привести к существенным потерям урожая зерновых культур. Пятнистость листьев имеет глобальное распространение и также является причиной значительных потерь урожая зерна [20].

Erwinia rhapontici – граммотрицательная бактерия, классифицируемая как условно-фитопатогенная, проявляет вирулентность преимущественно к поврежденным репродуктивным тканям растений, часто в местах повреждений, нанесенных насекомыми семейства *Cecidomyiidae*. Механизм патогенеза *E. rhapontici* обусловлен продукцией пектинолитических ферментов, разрушающих пектиновые вещества клеточных стенок растений, что способствует колонизации тканей хозяина [21]. Инфицирование семян данным фитопатогеном вызывает ряд фенотипических изменений, включая розовую пигментацию, вероятно, связанную с синтезом бактериальных пигментов или изменением метаболизма растения-хозяина, а также морфологическую деформацию (сморщивание) семян вследствие дегидратации и разрушения клеточных структур [22]. Снижение всхожести зараженных семян обусловлено нарушением физиологических процессов прорастания, таких как активация ферментов, мобилизация запасных веществ и развитие зародыша [23]. В результате снижается продуктивность сельскохозяйственных культур. Кроме того, инфицирование *E. rhapontici* негативно влияет на коммерческую ценность семян из-за визуальных дефектов и потенциального ухудшения качества конечного продукта [24]. В частности, такие семена непригодны для производства пищевых продуктов ввиду негативного влияния на органолептические свойства и внешний вид готовой продукции [25].

Фитопатогенная бактерия *Xanthomonas campestris* вызывает черную гниль – заболевание, характеризующееся системным поражением сосудистой системы растений. Проникновение патогена происходит через гидатоды, расположенные по краю листа, или через раны, после чего бактерии колонизируют ксилему, распространяясь по сосудам растения. Системное распространение *X. campestris* приводит к нарушению транспорта воды и питательных веществ, вызывая характерные симптомы заболевания. Начальные стадии инфекции проявляются в виде V-образного хлороза по краю листа, который прогрессирует в некроз. Потемнение жилок листьев, вызванное бактериальной окклюзией сосудов, является диагностическим признаком черной гнили. Дальнейшее развитие заболевания приводит к потемнению сосудистой ткани стебля, общему увяданию растения и, в конечном итоге – к некрозу пораженных тканей. Развитие и тяжесть симптомов зависят от восприимчивости сорта растения, вирулентности штамма патогена и условий окружающей среды [26].

В целях минимизации экономических потерь в сельском хозяйстве, обусловленных негативным влиянием фитопатогенов, необходима разработка и внедрение эффективных стратегий защиты растений.

Несмотря на то что селекция устойчивых сортов растений является важным инструментом, она представляет собой длительный и трудоемкий процесс, занимающий десятилетия [27, 28]. Более того, высокая адаптивность патогенов, обусловленная их способностью к мутациям и генетической рекомбинации, приводит к развитию резистентности к методам контроля, снижая эффективность селекционных стратегий [29].

В связи с этим химические пестициды играют критическую роль в предотвращении потерь урожая, вызванных вспышками заболеваний растений [29, 30]. Однако, растущее использование химических средств защиты растений приводит к ряду негативных последствий, включая загрязнение окружающей среды, формирование резистентности к фунгицидам и бактерицидам у фитопатогенов и нарушение баланса сельскохозяйственных экосистем [31]. Остатки пестицидов, аккумулирующиеся в почве, воде и сельскохозяйственной продукции, представляют собой серьезную экологическую угрозу и потенциальный риск для здоровья человека [32]. Развитие резистентности к фунгицидам и бактерицидам у фитопатогенов, определяемое как наследуемое снижение чувствительности грибов и бактерий к определенным химическим веществам, приводит к потерям урожая, контаминации продукции микотоксинами и, как следствие, угрожает безопасности пищевых продуктов.

Остатки пестицидов не только нарушают биоразнообразие почвы, но и попадают в пищевую цепь через питьевую воду и систему почва-растение, представляя угрозу для здоровья человека [33]. Согласно данным FAO, более 80 распространенных пестицидов обнаружены в воде, воздухе, почве и продуктах питания по всему миру. Потребление пищи, содержащей остатки пестицидов, имеет ряд неблагоприятных последствий для здоровья, включая пищевые отравления, нарушения иммунной и репродуктивной систем, а также повреждение нервной системы. Длительное воздействие пестицидов приводит к развитию хронических заболеваний, таких как рак, диабет, сердечно-сосудистые заболевания и др. [34]. Загрязнение почвы, воды и воздуха остатками пестицидов негативно влияет на окружающую среду, т. к. приводит к сокращению популяций полезных насекомых (например, пчел) и снижению биоразнообразия [35].

На основании этого разработка и внедрение новых, экологически безопасных методов борьбы с фитопатогенами является необходимым условием для обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства и гарантии продовольственной безопасности. Предложенные методы должны быть направлены на снижение зависимости от химических пестицидов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Перспективными направлениями являются методы биологического контроля.

Род *Pantoea* – грамотрицательные бактерии, демонстрирующие антагонистическую активность [36, 37]

против ряда фитопатогенов, таких как *Fusarium*, *Alternaria* [38], продуцируя антибиотики, сидерофоры и литические ферменты. Кроме того, данные микроорганизмы способствуют усвоению растениями питательных веществ через фиксацию азота, солюбилизацию фосфатов и продуцирование фитогормонов. Эти свойства делают бактерии рода *Pantoea* перспективным биоконтролирующим агентом и стимулятором роста растений, предлагая альтернативу химическим пестицидам и удобрениям [39].

Цель исследования – изучить характеристики бактериального штамма рода *Pantoea*, выделенного из зерновых культур, для оценки его потенциала в качестве антагониста фитопатогенов и ростостимулятора растений.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлся штамм бактерии, выделенной из семян ярового овса сорта Маручак (рис. 1). Семена предоставлены Кемеровским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства – филиалом ФГБУН Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (Кемерово, Россия).

Выделение бактерии из семян ярового овса осуществляли согласно методике, описанной в раннее опубликованной работе [40]. Для стерилизации семена овса обрабатывали 70 % этиловым спиртом (Кемеровская фармацевтическая фабрика, Россия) в течение 3 мин, затем трижды промывали стерильной дистиллированной водой и замачивали в 3 % растворе гипохлорита натрия (ХимКомпонент, Россия; процент активного хлора 2,86 %) с последующей промывкой в дистиллированной воде. Далее 5 г стерилизованных, измельченных семян вносили в 50 мл стерильной воды и выдерживали в шейкере-инкубаторе LSI-3016R (Daihan Labtech, Южная Корея) в течение 2 ч при температуре 30 ± 2 °C, 110 об/мин.

Для получения штаммов микроорганизмов, резистентных к пестицидам, 5 % (от объема питательной среды) полученной ранее суспензии вносили в бульон Луриа-Бертани в модификации Миллера (ЛБМ, Диа-М, Россия) с хизалофоп-П-этилом (Лабтех, Россия), метсульфурон-метилом (гербициды, НРС Standards, Германия) по 3 мл/л и имидаклопридом (инсектицид, Оптимум, Россия) по 3 г/л. Культивировали при 30 ± 2 °C, 110 об/мин в течение 48 ч на шейкере-инкубаторе [40].



Рисунок 1. Семена ярового овса сорта Маручак

Figure 1. Spring oats of the Maruchak variety

Для получения штаммов микроорганизмов, устойчивых к солевому стрессу, 5 % (от объема питательной среды) культуральной жидкости, полученной на питательной среде с пестицидами, вносили в бульон ЛБм с добавлением 6 г/л хлорида натрия (Ленреактив, Россия). Культивировали в условиях, описанных ранее [40].

Для получения штаммов, способных выживать на бедных почвах, 5 % (от объема питательной среды) культуральной жидкости, полученной на питательной среде с высоким содержанием соли, вносили в жидкую среду Difco M9 minimal salts, ×5 (Le Pont de Claix, Франция). Культивировали в условиях, описанных в исследовании [40].

Для получения чистых культур 1 мл полученной суспензии высевали на чашку Петри в агаризованную среду ЛБм глубинным способом. Культивировали при температуре 30 ± 2 °C в течение 24 ч в термостате ТСО-1/80 СПУ (Смоленское специальное конструкторско-технологическое бюро систем программного управления, Россия). Затем полученные колонии высевали на агаризованную среду ЛБм методом истощающего штриха. Данный посев осуществляли в трехкратной повторности. Чистоту выделенных штаммов бактерий контролировали микроскопически [41].

Для изучения культуральных признаков штаммов (цвет, форма, край, профиль, оптические свойства поверхности и размер колоний) производили посев методом истощающего штриха на агаризованную среду ЛБм. Культивировали при температуре 30 ± 2 °C в течение 24 ч [41].

Для определения морфологических признаков фиксированный мазок окрашивали метиленовым голубым и микроскопировали с объективом ×100. Проводили окраску по методу Грама с помощью КОН-теста для определения биохимических свойств клеточной стенки бактерий [41].

Идентификацию выделенных бактерий проводили с помощью автоматического микробиологического анализатора Vitek 2 Compact (BioMerieux, Франция) с использованием карт ID-GN (грамотрицательные микроорганизмы, Химмед, Россия). Бактериальные культуры выращивали на агаризованной питательной среде – колумбийском агаре с кровью (BioVitrum, Швеция), в течение 48 ч при температуре 30 ± 2 °C, затем готовили суспензию штаммов в 2 мл дистиллированной воды до оптической плотности 2,70–3,30 по шкале МакФарланда с помощью денситометра Densichek plus (BioMerieux, Франция) [42].

Определение видовой принадлежности бактериального изолята осуществляли путем секвенирования гена 16S rRNA при помощи праймеров 16S_27F (AGAGTTTGATCMTGGCTCAG) [43] и 16S_1492R (GGTTACCTTGTTACGACTT) [44] на амплификаторе ДНК Verity (Applied Biosystems, США). Полученный продукт ПЦР секвенировали по Сэнгеру с помощью тех же праймеров 16S_27F и 16S_1492R. Капиллярный электрофорез проводили на генетическом анализаторе ABI 3130xl

(Applied Biosystems, США). Поиск наиболее близкого гомолога проводила компания Blast [45], в своих исследованиях взяв за основу базу данных NCBI Reference Sequence Database for Prokaryotes.

Для анализа антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий использовали следующие штаммы фитопатогенов, полученные из Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра Курчатовского института (Россия): *Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529, *Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102.

Анализ антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий проводили методом диффузии из агарового блока [22]. Фитопатогенные грибы культивировали в пробирке на картофельно-декстрозном агаре (Диа-М, Россия), а бактерии – на ГМФ-агаре (Ленреактив, Россия). Суточную культуру исследуемой бактерии, выращенной на жидкой питательной среде ЛБм, засевали в чашки Петри глубинным способом на агаризованную среду и инкубировали в течение 24 ч при температуре 30 ± 2 °C. Затем вырезали агаровый блок диаметром 6 мм с исследуемой культурой и вставляли его в лунку агарового диска другой чашки Петри диаметром 6 мм с засеянными фитопатогенами. Фитопатоген засевали поверхностно, используя смывы со скошенного агара. Посев суспензии мутностью 0,8 по Мак-Фарланду ($1,5 \times 10^8$ КОЕ/см³) осуществляли «газоном». Чашки Петри выдерживали в течение 8 ч в холодильнике при температуре 4 °C для диффузии метаболитов монокультур бактерии из блока в толщу агара с тест-культурой, а затем инкубировали в термостате при 26 ± 2 °C в течение 5 суток (для грибов) и 24 ч (для бактерий). Результатом исследования являлся диаметр зоны ингибирования роста фитопатогена.

Для анализа антагонистической активности в отношении фитопатогенных грибов и бактерий использовали метод лунок [46]. Подготовку и посев фитопатогенных грибов и бактерий осуществляли по методике, описанной в анализе методом диффузии из агарового блока. Готовили суспензию исследуемого штамма до оптической плотности 0,8–1,0 по шкале МакФарланда на пептонной воде, 1 мл полученной суспензии добавляли в 10 мл бульона ЛБм. Культивировали в течение 24 ч при температуре 30 ± 2 °C и скорости вращения 110 об/мин. Далее отделяли клетки от культуральной жидкости при помощи центрифугирования в течение 10 мин и при скорости вращения 8000 об/мин. Вырезали лунку диаметром 6 мм агарового диска чашки Петри с засеянными фитопатогенами и вносили 300 мкл бесклеточной культуральной жидкости исследуемого штамма. Культивировали в условиях, описанных в анализе методом диффузии из агарового блока. Результатом исследования являлся диаметр зоны ингибирования роста фитопатогена.

Для анализа способности штамма к синтезу сидерофоров, индолил-3-уксусной и гибберелинновой кислот готовили бесклеточную культуральную жидкость исследуемого бактериального штамма согласно методике, указанной в анализе антагонистической активности методом лунок.

Для определения способности штамма к синтезу сидерофоров к бесклеточной культуральной жидкости добавляли свежеприготовленный реагент Chorme Azurol S (1,5 мл 0,016 % раствора железа III хлористого 6-водного (ЛенРеактив, Россия) в 10 М растворе соляной кислоты необходимо смешать с 7,5 мл 1,21 % раствора хромазуrola S (Chem-ex, Россия); доводили общий объем раствора дистиллированной водой до 100 мл) в соотношении 1:1. Полученный раствор выдерживали в течение 20 мин при температуре 22 ± 2 °С. Оптическую плотность определяли спектрофотометрически при длине волны 630 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду [47]. Концентрацию сидерофоров ($C_{\text{сид}}$, %) определяли по формуле (1):

$$C_{\text{сид}} = \frac{A_o - A_k}{A_k} \quad (1)$$

где A_o – оптическая плотность опытного образца; A_k – оптическая плотность контрольного образца.

Для определения способности штамма синтезировать индолил-3-уксусную кислоту к бесклеточной культуральной жидкости добавляли реактив Сальковского в соотношении 1:1. Выдерживали при температуре 22 ± 2 °С в течение 30 мин. Оптическую плотность раствора определяли спектрофотометрически при длине волны 535 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду [48]. Оптическую плотность образца (ОП) определяли по формуле (2):

$$\text{ОП} = \text{ОП}_{\text{п}} + \text{ОП}_{\text{к}} \quad (2)$$

где $\text{ОП}_{\text{п}}$ – оптическая плотность опытного образца по показаниям прибора; $\text{ОП}_{\text{к}}$ – оптическая плотность контроля.

Количество индолил-3-уксусной кислоты фиксировали по градуировочному графику ее стандартных растворов (Диа-М, Россия) с концентрациями от 0,5 до 5,0 мкг/мл.

Для определения способности штамма к синтезу гибберелинновой кислоты к 1 мл бесклеточной культуральной жидкости добавляли по 140 мкл 1 М раствора цинка уксуснокислого 2-водного (Ленреактив, Россия) и 10,6 % раствора калия железистосинеродистого 3-водного (ChemExpress, Россия) в соотношении 100:14:14 соответственно, энергично встряхивали. Далее центрифугировали в течение 15 мин при 4500 об/мин. Полученный супернатант смешивали с 30 % соляной кислотой (ChemExpress, Россия)

в соотношении 1:1 и выдерживали при температуре 22 ± 2 °С в течение 75 мин. Оптическую плотность измеряли по отношению к 5 % соляной кислоте на спектрофотометре UV 1800 (Shimadzu, Япония) при длине волны 254 нм. Количество синтезируемой гибберелинновой кислоты определяли по калибровочному графику ее стандартного раствора (Диа-М, Россия) в пределах от 200 до 1200 мкг/мл [49].

Для определения способности к синтезу кинетина готовили суспензию исследуемого штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок. Далее 1 мл суспензии добавляли к 10 мл жидкой среды следующего состава, г/л: 56,4 Difco M9 minimal salts, $\times 5$; 2,0 казаминокислоты (Диа-М, Россия); 0,1 тиамин (Химреактив, Россия); 2,0 мкг биотина (Лабтех, Россия). Культивировали в течение 48 ч при температуре 30 ± 2 °С и 110 об/мин. Отделение клеток от культуральной жидкости осуществляли по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок. Определение оптической плотности проводили на спектрофотометре при длине волны 665 нм, в качестве раствора сравнения использовали питательную среду. Количество синтезируемого кинетина определяли по калибровочному графику его стандартного раствора (Химмед, Россия) в пределах от 5 до 100 мкг/мл [50].

Для определения способности штамма фиксировать азот готовили суспензию штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок на бульоне Эшби с глюкозой (HiMedia Laboratories, Индия). Культивировали при температуре 30 ± 2 °С и скорости вращения 110 об/мин в течение 48 ч. Для отделения клеток культуральную жидкость центрифугировали при 8000 об/мин в течение 15 мин. Количество азота в бесклеточной культуральной жидкости определяли при помощи анализатора азота Rapid N Cube (Elementar, Германия) [51].

Для определения способности солибилизировать фосфор готовили суспензию штамма по методике, описанной в анализе антагонистической активности методом лунок на бульоне Пиковской (HiMedia Laboratories, Индия). Культивировали и отделяли клетки от культуральной жидкости в условиях, описанных в определении способности фиксировать азот. Далее к бесклеточной культуральной жидкости добавляли раствор хлормолибденовой кислоты (1,5 г аммония молибденовокислого (ChemExpress, Россия), растворенного в 40 мл дистиллированной воды, с добавлением 34,2 мл концентрированной соляной кислоты и доведением общего объема дистиллированной водой до 100 мл) и раствор хлороловянистой кислоты (2,5 г олова хлористого (ПрофСнаб, Россия) растворяли в 10 мл концентрированной соляной кислоты, доводили общий объем дистиллированной водой до 100 мл) в соотношении 50:225:1 соответственно. Выдерживали полученный раствор при температуре 22 ± 2 °С в течение 15 мин. Оптическую плотность определяли

при длине волны 600 нм. Одновременно в тех же условиях проводили контрольный опыт, в качестве контроля использовали питательную среду. Оптическую плотность образца определяли по формуле (2). Количество растворенного фосфора устанавливали по калибровочному графику стандартного раствора калия фосфорнокислого 2-замещенного (ЛенРеактив, Россия) в пределах от 50 до 300 мкг/мл [52].

Для определения способности к солибилизации калия осуществляли точечный посев штамма в чашки Петри со средой Александрова. Культивировали в термостате течение 4 суток при температуре 30 ± 2 °C. После культивирования измеряли гало-зону [53].

Для определения способности к солибилизации цинка осуществляли точечный посев штамма в чашки Петри со средой следующего состава, г/л: 10,0 глюкозы (ChemExpress, Россия); 1,0 аммония сернокислого (Диа-М, Россия); 0,2 калия хлористого (ЛенРеактив, Россия); 0,1 калия фосфорнокислого 2-замещенного (ЛенРеактив, Россия); 0,2 магния сернокислого (ChemExpress, Россия); 1,0 цинка окиси (ЛенРеактив, Россия); 15,0 агар-агара. Культивировали в условиях, описанных в определении способности солибилизировать калий. После культивирования измеряли гало-зону [54].

Для определения способности к продуцированию биопленок осуществляли посев штамма штрихом в чашки Петри со средой следующего состава, г/л: 0,8 конго красного (Диа-М, Россия); 50,0 сахарозы (ChemExpress, Россия); 37,0 бульона с сердечно-мозговым экстрактом (Микро-Лаб, Россия); 15,0 агар-агара. Культивировали в условиях, описанных в определении способности солибилизировать калий. Наличием способности к продуцированию биопленок считалось почернение выросшей культуры [52].

Каждое исследование проводилось в трехкратной повторности. Результаты представлены как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением. Анализ статистических данных осуществляли при помощи программы Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и их обсуждение

Культурально-морфологические признаки выделенной бактерии представлены на рисунке 2.

Выделенная бактерия образовывала круглые колонии желтого цвета диаметром в среднем 1 мм с приподнятым профилем, ровным краем и глянцевой фактурой. По морфологическим признакам бактерия относится к граммотрицательным бациллам со средним размером $0,716 \times 0,352$ мкм.

По результатам анализа биохимических признаков определено, что штамм ферментирует адонитол, L-пирролидонилариламидазу, β -галактозидазу, D-глюкозу, D-маннитол, D-маннозу, D-сорбит, сахарозу, D-трегалозу, малонат, 5-кето-D-глюконат, β -N-ацетилгалактозаминидазу, фосфатазу, кумарат.

Молекулярно-генетическая идентификация показала, что бактериальный штамм с 98 % вероятностью –

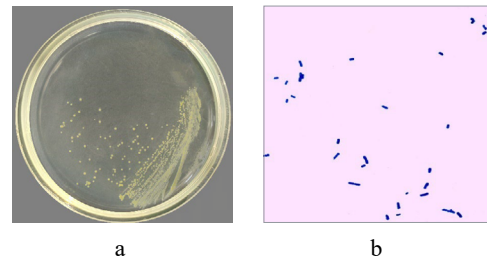


Рисунок 2. Культурально-морфологические признаки выделенной бактерии: а – рост штамма в чашке Петри на агаризованной среде ЛБМ; б – микроскопия фиксированного мазка, окрашенного метиленовым голубым, при увеличении $\times 1000$

Figure 2. Cultural and morphological profile of *Pantoea pleuroti*: a – in a Petri dish on Lysogeny broth agar medium; b – microscopy of fixed smear stained with methylene blue, $\times 1,000$

Pantoea pleuroti, в коллекции Национального центра биоресурсов Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов Национального исследовательского центра Курчатовского института присвоен номер В-14756.

Последовательности генов, кодирующих 16S рПНК *P. pleuroti*:
 CCCCCCTCCTACGAGACTCAAGCCTGC
 CAGTTTCAAATGCAGTTCCCAGGTTAAGCCCCGGG
 GATTTACATCTGACTTAACAGACCGCCTGCGTG
 CGCTTTACGCCAGTAATTCGGATTAACGCTTGC
 ACCCTCCGTATTACCGCGGCTGCTGGCACGGAGT
 TAGCCGGTGCTTCTTCTGCGGGTAACGTCAATCA
 CTGCGGTTATTAACCACAATGCCTTCTCCCCGC
 TGAAAGTACTTTACAACCCGAAGGCCTTCTTCAT
 ACACGCGGCATGGCTGCATCAGGCTTGCGCCCAT
 TGTGCAATATTCCCCACTGCTGCCTCCCGTAGGA
 GTCTGGACCGTGTCTCAGTTCCAGTGTGGCTGGT
 CATCCTCTCAGACCAGCTAGGGATCGTCGCCTAG
 GTGGGCCGTTACCCCGCCTACTAGCTAATCCCAT
 CTGGGTTTCATCCGATAGTGAGAGGCCCTAAGGTC
 CCCCTCTTTGGTCTTGCGACGTTATGCGGTATTAG
 CCACCGTTTCCAGTGGTTATCCCCCTCTATCGGG
 CAGATCCCCAGACATTACTACCCGTCGCCCACT
 CGTACCCGAGAGCAAGCTCTCTGTGCTACCGTC
 CGACTTGCAATGTGTTAGGCCTGCCGCCAGCGTTC
 AATCTGAGCCAGGATCAAACCTCT.

Результаты определения антагонистической активности представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

P. pleuroti проявлял антагонистическую активность в отношении всех исследуемых фитопатогенов. Однако при анализе методом лунок антагонистическая активность в отношении *Bipolaris sorokiniana* F-529 не обнаружили. При этом анализ методом диффузии из агарового блока выявил наибольшую активность в отношении *B. sorokiniana* F-529, что может быть связано с активным ростом *P. pleuroti* на питательной среде. Таким образом, подавление роста фитопатогена шло благодаря конкуренции за питательные вещества. Высокая активность наблюдалась в отношении

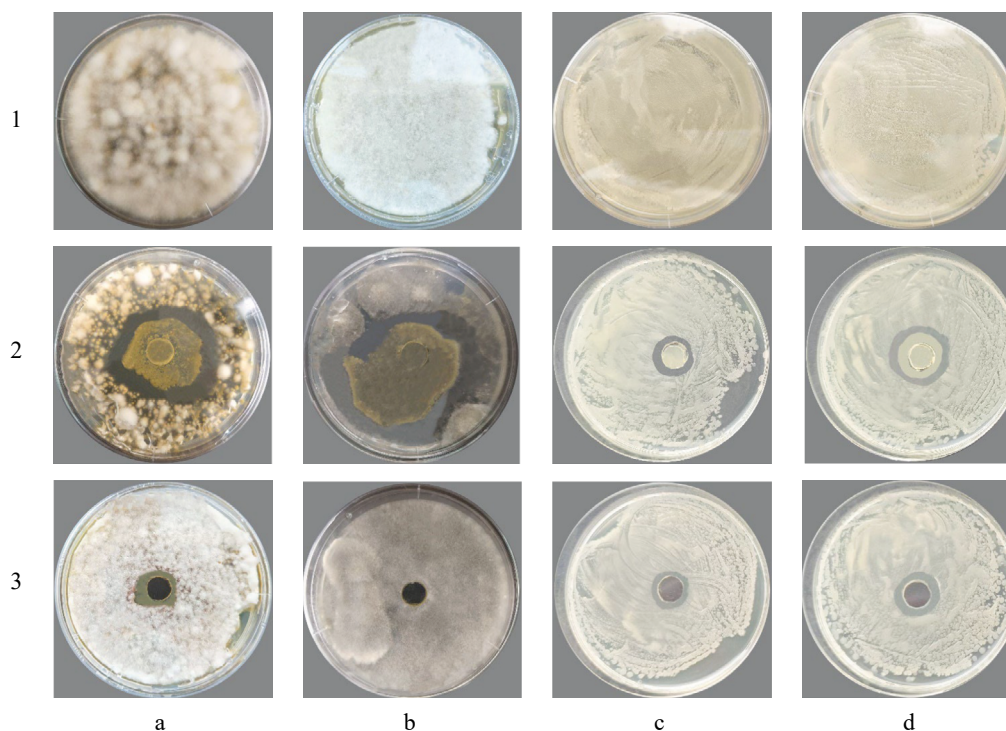


Рисунок 3. Антагонистическая активность *Pantoea pleuroti*: а – *Fusarium graminearum* F-877; б – *Bipolaris sorokiniana* F-529; в – *Erwinia rhapontici* B-9292; г – *Xanthomonas campestris* B-4102; 1 – контроль; 2 – метод диффузии из агарового блока; 3 – метод лунок

Figure 3. Antagonistic profile of *Pantoea pleuroti*: а – *Fusarium graminearum* F-877; б – *Bipolaris sorokiniana* F-529; в – *Erwinia rhapontici* B 9292; г – *Xanthomonas campestris* B-4102; 1 – control; 2 – agar block diffusion method; 3 – agar well method

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

Table 1. Antagonistic activity of *Pantoea pleuroti* against phytopathogens

Фитопатоген	Средний диаметр зоны подавления роста, мм
Метод диффузии из агарового блока	
<i>Fusarium graminearum</i> F-877	62 ± 2
<i>Bipolaris sorokiniana</i> F-529	80 ± 3
<i>Erwinia rhapontici</i> B-9292	16 ± 1
<i>Xanthomonas campestris</i> B-4102	25 ± 1
Метод лунок	
<i>Fusarium graminearum</i> F-877	12 ± 1
<i>Bipolaris sorokiniana</i> F-529	–
<i>Erwinia rhapontici</i> B-9292	15 ± 1
<i>Xanthomonas campestris</i> B-4102	20 ± 1

Fusarium graminearum F-877 (62 мм); низкая активность – в отношении фитопатогенных бактерий. Таким образом, можно предположить, что такие результаты обосновываются тем, что *P. pleuroti* продуцирует меньшее количество метаболитов, которые проявляют в большей степени антибактериальную природу, чем антифунгальную.

Результаты ростостимулирующей активности выделенного штамма представлены на рисунке 4 и в таблице 2. *P. pleuroti* способен продуцировать фитогормоны, фиксировать азот, солюбилизовать фосфаты, калий и цинк, а также образовывать биопленки.

Настоящее исследование подтверждает и расширяет имеющиеся данные о потенциале бактерий рода *Pantoea* в качестве стимуляторов роста растений и агентов биоконтроля. Антагонистическая активность *P. pleuroti* в отношении фитопатогенных грибов рода *Fusarium*, выявленная в работе, согласуется с данными Suleimanova *et al.* [55] для *P. brenneri* и Herrera *et al.* [56] для *Pantoea agglomerans* в отношении *F. graminearum*. В исследовании Walters *et al.* [57] продемонстрировано антимикробное действие *P. agglomerans* в отношении *Xanthomonas campestris* и *Erwinia amylovora*.

Способность исследуемого штамма *P. pleuroti* продуцировать сидерофоры (53,1 %) сопоставима с результатами Herrera *et al.* [56]. Ansari *et al.* [58] получили данные о возможности продуцировать сидерофоры для *P. agglomerans*. Guardiola-Márquez *et al.* [59] также наблюдали продукцию сидерофоров (2 мм гало-зона) у штамма *P. pleuroti*. Такие различия могут объясняться как штаммовой специфичностью, так и применением различных методик количественной оценки сидерофоров. Аналогично, продукция индолил-3-уксусной

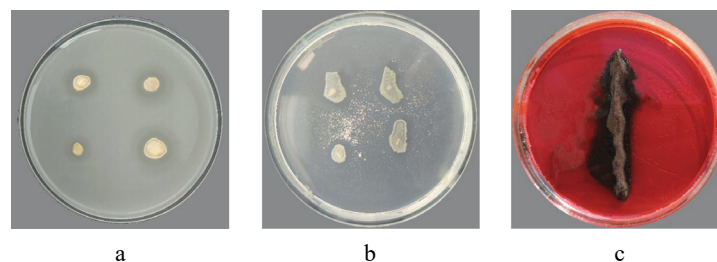


Рисунок 4. Ростостимулирующая активность *Pantoea pleuroti*: а – способность солубилизировать калий; б – способность солубилизировать цинк; с – способность образовывать биопленки

Figure 4. Growth-promoting activity of *Pantoea pleuroti* as solubilizer of potassium (a) and zinc (b); and biofilm-forming capacity (c)

Таблица 2. Результаты определения ростостимулирующей активности *Pantoea pleuroti*

Table 2. Growth-promoting activity of *Pantoea pleuroti*

Показатель	Значение
Сидерофоры, %	53,1 ± 1,9
Индолил-3-уксусная кислота, мг/мл	5,64 ± 0,16
Гиббереллиновая кислота, мкг/мл	284,3 ± 10,2
Кинетин, мкг/мл	9,46 ± 0,27
Содержание азота в культуральной жидкости, мкг/мл	680,0 ± 20,0
Содержание растворимого фосфора, мкг/мл	102,3 ± 4,3
Способность солубилизировать калий, мм	+
Способность солубилизировать цинк, мм	+
Способность образовывать биопленки	+

кислоты выделенным штаммом (5,64 мг/мл) значительно выше данных, полученных Guardiola-Márquez *et al.* [59] (0,0558 мг/мл) и Ansari *et al.* [58] (0,0986 мг/мл) для *P. agglomerans*. Присутствующие различия могут быть обусловлены как генетическими особенностями штаммов, так и различиями в составе питательных сред и условиях культивирования, а также различиями в методах определения.

Солубилизация фосфора штаммом (102,3 мкг/мл) несколько ниже значений Ansari *et al.* [58] (119,19 и 120,32 мкг/мл) для *P. agglomerans*. Исследователи в [59] также отмечают способность *Pantoea* растворять фосфаты (3 мм гало-зона). Различия в значениях могут быть связаны с использованием нескольких источников фосфора и методов его определения. Способность штамма солубилизировать калий согласуется с данными Bakhshandeh *et al.* [60] для *Pantoea ananatis* и Guardiola-Márquez *et al.* [59] (5 мм гало-зона) для *P. pleuroti*. В отличие от Choudhary *et al.* [61], которые показали высокую солубилизацию цинка *Pantoea eucrina*, Guardiola-Márquez *et al.* [59] не наблюдали растворения цинка исследуемым штаммом. Это подчеркивает видоспецифичность данного признака.

Продукция гиббереллиновой кислоты выделенным штаммом (284,3 мкг/мл) находилась в диапазоне

от 288,5 ± 16,8 до 331,1 ± 19,2 мкг/мл для *P. ananatis*, *Pantoea citrea* и *Pantoea dispersa*, который определил Yun *et al.* [62]. Способность к фиксации азота (680 мкг/мл) согласуется с наблюдениями Guardiola-Márquez *et al.* [59] (7 мм гало-зона), продукция кинетина (9,46 мкг/мл) и образование биопленок расширяют представления о физиологических возможностях *Pantoea* и их потенциальной роли в стимуляции роста растений. Отсутствие азотфиксации у штамма *P. agglomerans*, исследованного Herrera *et al.* [56], свидетельствует о внутривидовой гетерогенности этого признака.

Таким образом, исследование вносит вклад в понимание профиля ростостимулирующей активности *Pantoea*. Полученные данные подтверждают перспективность использования *Pantoea* в качестве биоудобрений и агентов биоконтроля.

Выводы

Обеспечение фитосанитарного благополучия посевов овса – комплексная проблема, требующая многостороннего и научно обоснованного подхода. Успешная защита от фитопатогенов основывается на постоянном совершенствовании методов борьбы с акцентом на экологическую безопасность и устойчивость агроэкосистем. Внедрение биологических методов защиты растений способствует развитию устойчивого сельского хозяйства, снижая негативное воздействие химических пестицидов на окружающую среду и обеспечивая производство безопасной сельскохозяйственной продукции.

Исследование продемонстрировало значительный потенциал бактериального штамма рода *Pantoea* в борьбе с фитопатогенами и стимулировании роста растений. Выделенный штамм обладает широкой антимикробной активностью, подавляя рост патогенных грибов (*Fusarium graminearum* F-877, *Bipolaris sorokiniana* F-529) и бактерий (*Erwinia rhapontici* B-9292 и *Xanthomonas campestris* B-4102). Помимо этого, штамм демонстрирует важные ростостимулирующие свойства, включая синтез фитогормонов, фиксацию азота, солубилизацию фосфатов, калия и цинка, а также образование биопленок.

Эти характеристики делают штамм перспективным для разработки средств биологической защиты

растений. Биологическое разнообразие микроорганизмов, включая представителей рода *Pantoea*, открывает новые возможности для устойчивого земледелия, позволяющего минимизировать зависимость от химических пестицидов и удобрений, одновременно обеспечивая высокие урожаи и безопасность пищевой продукции.

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 plagiarism.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Tang Y, Li S, Yan J, Peng Y, Weng W, *et al.* Bioactive components and health functions of oat. *Food Reviews International*. 2023;39(7):4545–4564. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2029477>
2. Kim I-S, Hwang C-W, Yang W-S, Kim C-H. Multiple antioxidative and bioactive molecules of oats (*Avena sativa* L.) in human health. *Antioxidants*. 2021;10(9):1454. <https://doi.org/10.3390/antiox10091454>
3. Lin H, Fei T, Liu X, Lin X, Wang L. Oat (*Avena sativa* L.) fermented by GRAS-grade microorganisms: From improvement of the quality propriety and health benefits, safety assessment to potential industrial applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2025;160:105020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105020>
4. Sharma R, Kukreja V. Image segmentation, classification and recognition methods for comics: A decade systematic literature review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;131:107715. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107715>
5. Zhang K, Ma L, Cui B, Li X, Zhang B, *et al.* Visual large language model for wheat disease diagnosis in the wild. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024;227(Part 1):109587. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109587>
6. Jarroudi ME, Kouadio L, Bock CH, Junk J, Pasquali M, *et al.* A threshold-based weather model for predicting stripe rust infection in winter wheat. *Plant Disease*. 2017;101(5):693–703. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1766-RE>
7. Riaz A, Athiyannan N, Periyannan S, Afanasenko O, Mitrofanova O, *et al.* Mining vavilov's treasure chest of wheat diversity for adult plant resistance to *Puccinia triticina*. *Plant Disease*. 2017;101(2):317–323. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-16-0614-RE>
8. Sharma VK, Niwas R, Karwasra SS, Saharan MS. Progression of powdery mildew on different varieties of wheat and triticale in relation to environmental conditions. *Journal of Agrometeorology*. 2017;19(1):84–87. <https://doi.org/10.54386/jam.v19i1.764>
9. Al-Sadi AM. Epidemiology and management of fungal diseases in dry environments. *Innovations in Dryland Agriculture*. 2016;187–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47928-6_7
10. Aboukhaddour R, Fetch T, McCallum BD, Harding MW, Beres BL, *et al.* Wheat diseases on the prairies: A Canadian story. *Plant Pathology*. 2020;69(3):418–432. <https://doi.org/10.1111/ppa.13147>
11. Gulyaeva E, Yusov V, Rosova M, Mal'chikov P, Shaydayuk E, *et al.* Evaluation of resistance of spring durum wheat germplasm from Russia and Kazakhstan to fungal foliar pathogens. *Cereal Research Communications*. 2020;48:71–79. <https://doi.org/10.1007/s42976-019-00009-9>
12. Zhang Y, Xiao H, Poms RE, Li Q, Zhao R. Antifungal activity and potential mechanism of paeonol against *Fusarium graminearum* and the application on wheat grains and steamed bread. *Grain & Oil Science and Technology*. 2025;8(2):109–117. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2025.02.001>
13. Al-Hashimi A, Aina O, Daniel AI, Du Plessis M, Keyster M, *et al.* Critical review on characterization, management, and challenges of fusarium head blight disease in wheat. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2025;136:102557. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102557>
14. Shuai J, Tu Q, Zhang Y, Xia X, Wang Y, *et al.* Silence of five *F. graminearum* genes in wheat host confers resistance to Fusarium head blight. *Journal of Integrative Agriculture*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.04.026>
15. Martínez M, Ramírez Albuquerque L, Arata AF, Biganzoli F, Fernández Pinto V, *et al.* Effects of *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* on disease parameters, grain quality and mycotoxins contamination in bread wheat (Part I). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(2):863–873. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10099>
16. Pedrero-Méndez A, Cesarini M, Mendoza-Salido D, Petrucci A, Sarrocco S, *et al.* Trichoderma strain-dependent direct and indirect biocontrol of Fusarium head blight caused by *Fusarium graminearum* in wheat. *Microbiological Research*. 2025;296:128153. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128153>
17. Tiwari M, Singh P. Bolstering wheat's immunity: BABA-mediated defense priming against *Bipolaris sorokiniana* amid competition. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2024;133:102372. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102372>

18. Al-Sadi AM. *Bipolaris sorokiniana*-induced black point, common root rot, and spot blotch diseases of wheat: A review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2021;11:584899. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.584899>
19. Villa-Rodriguez E, Lugo-Enriquez C, Ferguson S, Parra-Cota FI, Cira-Chávez L, et al. *Trichoderma harzianum sensu lato* TSM39: A wheat microbiome fungus that mitigates spot blotch disease of wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) caused by *Bipolaris sorokiniana*. *Biological Control*. 2022;175:105055. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105055>
20. Kumar J, Schäfer P, Hückelhoven R, Langen G, Baltruschat H, et al. *Bipolaris sorokiniana*, a cereal pathogen of global concern: Cytological and molecular approaches towards better control. *Molecular Plant Pathology*. 2002;3(4):185–195. <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2002.00120.x>
21. Huang HC, Erickson RS, Yanke LJ, Hsieh TF, Morrall RAA. First report of pink seed of lentil and chickpea caused by *Erwinia rhapontici* in Canada. *Plant Disease*. 2003;87(11):1398. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.11.1398A>
22. Serazetdinova YR, Chekushkina DYu, Borodina EE, Kolpakova DE, Minina VI, et al. Synergistic interaction between *Azotobacter* and *Pseudomonas* bacteria in a growth-stimulating consortium. *Foods and Raw Materials*. 2025;13(2):376–393. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-651>
23. Hsieh TF, Huang HC, Erickso RS. Spread of seed-borne *Erwinia rhapontici* in bean, pea and wheat. *European Journal of Plant Pathology*. 2010;127:579–584. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9622-0>
24. Elmer W, Indermaur EJ, Smart C. Diseases of rhubarb. In: Elmer WH, McGrath M, McGovern RJ, editors. *Handbook of Vegetable and Herb Diseases*. Cham: Springer; 2025. pp. 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35512-8_49-1
25. Tambong JT. Bacterial pathogens of wheat: Symptoms, distribution, identification, and taxonomy. *Wheat – Recent Advances*. 2022;1–24. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102855>
26. Soengas P, Hand P, Vicente JG, Pole JM, Pink DA. Identification of quantitative trait loci for resistance to *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica rapa*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2007;114(4):637–645. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0464-2>
27. Rahmanzadeh A, Khahani B, Taghavi SM, et al. Genome-wide meta-QTL analyses provide novel insight into disease resistance repertoires in common bean. *BMC Genomics*. 2022;23(1):680. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08914-w>
28. Khojasteh M, Darzi Ramandi H, Taghavi SM, Taheri A, Rahmanzadeh A, et al. Unraveling the genetic basis of quantitative resistance to diseases in tomato: A meta-QTL analysis and mining of transcript profiles. *Plant Cell Reports*. 2024;43(7):184. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03268-x>
29. Yang R, Du X, Khojasteh M, Shah SMA, Peng Y, et al. Green guardians: The biocontrol potential of *Pseudomonas*-derived metabolites for sustainable agriculture. *Biological Control*. 2025;201:105699. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105699>
30. Intisar A, Ramzan A, Sawaira T, Kareem AT, Hussain N, et al. Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials – A review. *Chemosphere*. 2022;293:133538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133538>
31. Khan BA, Nadeem MA, Nawaz H, Amin MM, Abbasi GH, et al. Pesticides: Impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. In: Aftab T, editor. *Emerging Contaminants and Plants*. Cham: Springer; 2023. pp. 109–134. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5
32. Naidu R, Biswas B, Willett IR, Cribb J, Kumar SB, et al. Chemical pollution: A growing peril and potential catastrophic risk to humanity. *Environment International*. 2021;156:106616. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106616>
33. Ali S, Ullah MI, Sajjad A, Shakeel Q, Hussain A. Environmental and health effects of pesticide residues. In: Inamuddin, Ahamed MI, Lichtfouse E, editors. *Sustainable Agriculture Reviews* 48. Cham: Springer; 2021;48:311–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6_8
34. Rani L, Thapa K, Kanojia N, Sharma N, Singh S, et al. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production*. 2021;283:124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
35. Yu Z, Lu T, Qian H. Pesticide interference and additional effects on plant microbiomes. *Science of The Total Environment*. 2023;888:164149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164149>
36. Kirk A, Davidson E, Stavrinides J. The expanding antimicrobial diversity of the genus *Pantoea*. *Microbiological Research*. 2024;289:127923. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127923>
37. Xu W, Wang F, Zhang M, Ou T, Wang R, et al. Diversity of cultivable endophytic bacteria in mulberry and their potential for antimicrobial and plant growth-promoting activities. *Microbiological Research*. 2019;229:126328. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126328>
38. 濮阳市台前县樱桃叶斑病菌的鉴定及其拮抗菌的筛选. 江晓颐, 李永, 薛寒, 姜宁, 常聚普, et al. 陆地生态系统与保护学报. 2025;5(1):65–71. [Jiang X, Li Y, Xue H, Jiang N, Chang J, et al. Identification of cherry leaf spot disease in taiqian county, puyang city, and screening of its antagonistic bacteria[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*. 2025;5(1):65–71. (In Chinese)] <https://doi.org/10.12356/j.2096-8884.2025-0001>
39. Matera A, Warchoń M, Simlat M. Effect of the *Pantoea vagans* strain SRS89 on carrot (*Daucus carota* subsp. *sativus* L.) seed germination and plant growth under saline conditions. *South African Journal of Botany*. 2025;180:415–427. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2025.03.033>

40. Фасхутдинова Е. Р., Богачева Н. Н., Бородина Е. Е., Позднякова А. В., Лузянин С. Л. Применение эндофитных микроорганизмов для интенсификации ростовых процессов сельскохозяйственных культур. Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 4. С. 820–836. [Faskhutdinova ER, Bogacheva NN, Borodina EE, Pozdnyakova AV, Luzyanin SL. Effect of endophytic microorganisms on growth rate of crops. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(4):820–836. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-4-2548>
41. 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>
42. Милентьева И. С., Фотина Н. В., Жарко М. Ю., Проскурякова Л. А. Перспективы использования микробных препаратов для снижения окислительного стресса сельскохозяйственных растений. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 750–761. [Milentyeva IS, Fotina NV, Zharko MYu, Proskuryakova LA. Microbial treatment and oxidative stress in agricultural plants. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):750–761. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2403>
43. Lane DJ. 16S/23S rRNA sequencing. In: Stackebrandt E, Goodfellow M, editors. Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics. NY: John Wiley & Sons; 1991. pp. 115–175.
44. Turner S, Pryer KM, Miao VP, Palmer JD. Investigating deep phylogenetic relationships among cyanobacteria and plastids by small subunit rRNA sequence analysis. Journal of Eukaryotic Microbiology. 1999;46(4):327–338. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.1999.tb04612.x>
45. Camacho C, Coulouris G, Avagyan V, Ma N, Papadopoulos J, et al. BLAST+: Architecture and applications. BMC Bioinformatics. 2009;10:421. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-421>
46. 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>
47. Серазетдинова Ю. Р., Богачева Н. Н., Фасхутдинова Е. Р., Асякина Л. К., Проскурякова Л. А. Аспекты совместного культивирования *Bacillus amyloliquefaciens* и *Bacillus aryabhatai* для интенсификации синтеза ростостимулирующих веществ. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 6. С. 41–48. [Serazetdinova YuR, Bogacheva NN, Faskhutdinova ER, Asyakina LK, Proskuryakova LA. Aspects of the joint cultivation of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus aryabhatai* for the intensification of growth-stimulating substances synthesis. Siberian Herald of Agricultural Science. 2024;54(6):41–48. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-6-4>
48. Бородина Е. Е., Серазетдинова Ю. Р., Фасхутдинова Е. Р., Богачёва Н. Н., Фотина Н. В. и др. Роль *Bacillus amyloliquefaciens* в снижении абиотического стресса зерновых культур. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 4. С. 178–183. [Borodina EE, Serazetdinova YuR, Faskhutdinova ER, Bogacheva NN, Fotina NV, et al. Investigation of the effect of endophytic bacteria on the growth rates of spring wheat. Biotekhnologiya. 2023;12(4):178–183. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25205/978-5-4437-1691-6-51>
49. Асякина Л. К., Бородина Е. Е., Фотина Н. В., Неверова О. А., Милентьева И. С. *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* и *Pseudomonas putida* в восстановлении техногенно нарушенных территорий Кузбасса. Поволжский экологический журнал. 2024. № 4. С. 385–398. [Asyakina LK, Borodina EE, Fotina NV, Neverova OA, Milentyeva IS. *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*, and *Pseudomonas putida* in the restoration of technogenically disturbed territories of the Kuzbass. Povolzhskiy Journal of Ecology. 2024;(4):385–398. (In Russ.)] <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-4-385-398>
50. Асякина Л. К., Исачкова О. А., Колпакова Д. Е., Бородина Е. Е., Богер В. Ю. и др. Влияние микробного консорциума на рост и развитие ярового ячменя в условиях Кемеровской области – Кузбасса. Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16. № 1. С. 104–112. [Asyakina LK, Isachkova OA, Kolpakova DE, Borodina EE, Boger VYu, et al. The effect of a microbial consortium on spring barley growth and development in the Kemerovo region, Kuzbass. Grain Economy of Russia. 2024;16(1):104–112. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-90-1-104-112>
51. Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Асякина Л. К., Милентьева И. С., Просеков А. Ю. Ризобактерии для снижения биотического стресса яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), вызванного фитопатогенными грибами. Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 4. С. 98–113. [Serazetdinova YuR, Fotina NV, Asyakina LK, Milentyeva IS, Prosekov AYU. Rhizobacteria for reducing biotic stress in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) caused by phytopathogenic fungi. Storage and Processing of Farm Products. 2023;(4):98–113. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.515>
52. Serazetdinova YuR, Borodina EE, Fotina NV, Naik A, Mudgal G, et al. Rhizobia as complex biofertilizers for wheat: Biological nitrogen fixation and plant growth promotion. Foods and Raw Materials. 2026;14(1):214–227. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-669>
53. 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.cbab.2024.103294>
54. Faskhutdinova ER, Fotina NV, Neverova OA, Golubtsova YuV, Mudgal G, et al. Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. Foods and Raw Materials. 2024;12(2):348–360. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613>

55. Suleimanova AD, Sokolnikova LV, Egorova EA, Berkutova ES, Pudova DS, et al. Antifungal activity of siderophore isolated from *Pantoea brenneri* against *Fusarium oxysporum*. Russian Journal of Plant Physiology. 2023;70:199. <https://doi.org/10.1134/S1021443723602744>
56. Herrera SD, Grossi C, Zawoznik M, Groppa MD. Wheat seeds harbour bacterial endophytes with potential as plant growth promoters and biocontrol agents of *Fusarium graminearum*. Microbiological Research. 2016;186–187:37–43. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.03.002>
57. Walterson AM, Stavrinides 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>
58. Firoz AA, Iqbal A, 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>
59. Guardiola-Márquez CE, Santos-Ramírez MT, Figueroa-Montes ML, Valencia-de los Cobos EO, Stamatis-Félix IJ, 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>
60. Bakhshandeh E, Pirdashti H, Lendeh KS. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. Ecological Engineering. 2017;103(Part A):164–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.008>
61. Choudhary S, Singh Saharan B, Gera R, Kumar S, Prasad M, et al. Molecular characterization and validation of zinc solubilization potential of bacteria isolated from onion (*Allium cepa* L.) rhizosphere. The Microbe. 2024;4:100145. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100145>
62. Ma Q, He S, Wang X, Rengel Z, Chen L, et al. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacterium *Pantoea rhizosphaerae* sp. nov. from *Acer truncatum* rhizosphere soil and its effect on *Acer truncatum* growth. Frontiers in Plant Science. 2023;14:1218445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1218445>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Бородина Екатерина Евгеньевна / Ekaterina E. Borodina ORCID 0000-0001-6362-7589; eLIBRARY SPIN 9708-9200
Плешивцев Иван Игоревич / Ivan I. Pleshivtsev eLIBRARY SPIN 5774-4748
Фотина Наталья Вячеславовна / Nataliya V. Fotina ORCID 0000-0002-7655-0258; eLIBRARY SPIN 5500-7190
Федорова Анастасия Михайловна / Anastasiya M. Fedorova ORCID 0000-0002-8071-4411; eLIBRARY SPIN 4142-7468
Мартиросян Владимир Викторович / Vladimir V. Martirosyan ORCID 0000-0002-4026-5789; eLIBRARY SPIN 5140-5360