

ПОТЕНЦИАЛ БАКТЕРИЙ РОДА PSEUDOMONAS ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

© Рассохина И.И.



Ирина Игоревна Рассохина

Вологодский научный центр Российской академии наук

Вологда, Российская Федерация

e-mail: rasskhinairina@mail.ru

ORCID: 0000-0002-6129-6912 ResearcherID: C-8173-2019

Одно из приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации – повышение экологически чистого агропроизводства, что согласуется и со Стратегией развития производства органической продукции до 2030 года. Использование микроорганизмов и препаратов на их основе способно активизировать рост и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур. Цель исследования – провести анализ отечественной и зарубежной литературы и выявить основные механизмы взаимодействия бактерий рода *Pseudomonas* с растениями. *Pseudomonas* – это грамотрицательные палочковидные аэробные неспорообразующие бактерии, обладающие быстрым ростом и высокой колонизацией корней. Это самая большая группа PGPR-организмов, которые способны обитать в различных условиях. К наиболее известным полезным для агропроизводства видам рода *Pseudomonas* относятся *P. aeruginosa*, *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. putida* и *P. syringe*. Представители рода *Pseudomonas* повсеместно распространены в почвенной экосистеме и являются общими обитателями ризосферы различных сельскохозяйственных культур, где играют одну из главных ролей в стимулировании роста растений посредством различных механизмов. На основании результатов исследований отечественных и зарубежных авторов в рамках обзора выделены следующие основные механизмы растительно-микробного взаимодействия: подавление развития фитопатогенных грибов и/или бактерий (прямой и косвенный путь антагонизма); синтез метаболитов, оказывающих действие на рост или развитие надземных и подземных органов (в т. ч. фитогормонов); повышение доступности минеральных компонентов для растения (прежде всего фосфатов); нивелирование стрессовых факторов. В целом, бактерии рода *Pseudomonas* обладают высоким потенциалом для агропроизводства и могут быть использованы для создания биологических препаратов растениеводства как защитного, так и ростостимулирующего действия. Наиболее интересными для реального сектора будут те штаммы, которые одновременно способны реализовывать сразу обе функции, при этом их колонизирующая способность будет высокой.

PGPR, Pseudomonas, сельскохозяйственные культуры, рост, антагонизм, фитогормоны, сольобитизация фосфатов.

Введение

Одно из приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 года № 145) – повышение экологически чистого агропроизводства, что согласуется и со Стратегией развития производства органической продукции до 2030 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 4 июля 2023 года № 1788-р). При этом вопрос повышения продуктивности сельскохозяйственных культур, особенно в Нечерноземной зоне России, где условия не позволяют растениям полностью реализовать свой генетически запрограммированный потенциал, является весьма актуальным.

Использование микроорганизмов и препаратов на их основе, отвечая требованиям экологизации производства, способно активизировать рост и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур (Zia et al., 2020). Однако ассортимент биологических препаратов в настоящее время крайне мал¹, а, например, доля сельскохозяйственных организаций Европейского Севера России, где применяются биологические методы защиты растений, составляет всего 9,4% (Иванов, 2023).

Цель исследования – провести анализ отечественной и зарубежной литературы и выявить основные механизмы взаимодействия бактерий рода *Pseudomonas* с растениями.

Задачи:

- рассмотреть основные механизмы микробно-растительного взаимодействия бактерий рода *Pseudomonas*;
- выявить, какие представители рода *Pseudomonas* перспективны для создания биологических препаратов на их основе.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов были использованы работы отечественных и зарубежных авторов, посвященные изучению бактерий рода *Pseudomonas*: их биотехнологическому потенциалу, разнообразию, действию на растительные объекты и пр. Поиск анализируемых источников осуществлялся главным образом через сервис Google Scholar, который включает базы eLibrary, CyberLeninka, PubMed, JSTOR и Elsevier и пр. В поисковых запросах применялись следующие основные комбинации ключевых слов на русском и английском языках: *Pseudomonas*, растительно-микробные отношения, рост, продуктивность, защита растений, биопрепараты, биофунгициды, биотехнологический потенциал.

Результаты

Интерес к бактериям рода *Pseudomonas* прежде всего связан с их способностью синтезировать широкий спектр различных биологически активных соединений (Кулешова и др., 2006). Многие представители рода *Pseudomonas* относятся к бактериям PGPR-группы. Внимание к бактериям данной группы обусловлено их возможностью повышать урожайность хозяйственно значимых культур, именно поэтому данные микроорганизмы часто рассматривают в качестве альтернативы химическим средствам интенсификации агропроизводства. Почвы, на которых используются препараты с PGPR-бактериями, требуют на 50–80% меньше химических веществ, что повышает возможности для ведения экологически чистого сельского хозяйства и сохранения устойчивых систем земледелия (Максимов и др., 2011; Kumari et al., 2018; Singh et al., 2021). PGPR-бактерии синтезируют разнообразные метаболиты, которые обла-

¹ Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации (2023) // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Т. 1. 65 с.

дают сигнальной и фитогормональной активностью, способностью увеличивать доступность элементов для растительных культур, а также стимулировать системную устойчивость или угнетать развитие грибных и бактериальных фитопатогенов (Максимов и др., 2011; Sah et al., 2021). Это говорит о высоком потенциале бактерий с точки зрения разработки на их основе биопрепаратов сельскохозяйственного назначения. Однако, чтобы отнести штамм к эффективным PGPR организмам, он должен обладать способностью к успешной колонизации корней, что позволит бактериям эффективно закрепиться в ризосфере. Стоит отметить, что многие неудачи в исследованиях стимулирования роста растений в полевых условиях часто коррелировали именно с плохой колонизацией бактериями корней (Choi et al., 2008; Singh et al., 2021).

Pseudomonas – это грамотрицательные палочковидные аэробные неспорообразующие бактерии, обладающие быстрым ростом и высокой колонизацией корней. Это самая большая группа PGPR, которые способны обитать в различных условиях (Kumari et al., 2018). К наиболее известным полезным для агропроизводства видам рода *Pseudomonas* относятся *P. aeruginosa*, *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. putida* и *P. syringe* (Singh et al., 2021; Singh et al., 2022).

Представители данного рода повсеместно распространены в почвенной экосистеме и являются обитателями ризосферы различных сельскохозяйственных культур, где играют одну из главных ролей в стимулировании роста растений посредством различных механизмов (Jain, Pandey, 2016). На основании анализа результатов, полученных в ходе исследований отечественных и зарубежных авторов, к основным механизмам можно отнести:

- подавление развития фитопатогенных грибов и/или бактерий (прямой и косвенный антагонизм);

- синтез метаболитов, оказывающих действие на рост и/или развитие надземных и подземных органов;

- повышение доступности минеральных компонентов для растения;

- нивелирование стрессовых факторов.

Бактерии рода *Pseudomonas* в подавлении развития фитопатогенных грибов и/или бактерий

Представители рода *Pseudomonas* способны к проявлению двух основных механизмов антагонизма: прямого и косвенного (Prabhukarthikeyan et al., 2018).

Прямой антагонизм связан со способностью бактерий синтезировать антибиотики: пиолетеорин, пирролнитрин, феназин, 2,4-диацетилфлороглюцинол (ДАФГ), цианистый водород (HCN), канозамин, пиоцианин и вискозинамид (Prabhukarthikeyan et al., 2018; Sah et al., 2021). Например, ДАФГ, который способны синтезировать представители данного рода бактерий, представляет собой фенольную молекулу (Dorje et al., 2017), а феназин – азотсодержащий гетероциклический антибиотик, обладающий активностью широкого спектра. Существуют различные производные феназина, обладающие противогрибковой активностью, но наиболее известны феназин-1-карбоновая кислота, феназин-1-карбоксамид, 1-гидроксифеназин и др. Так, исследование феназин-продуцирующего полиэкстремофильного штамма *P. chlororaphis* GBPI 507, который выделен из ризосферы пшеницы, произрастающей в высокогорной гималайской почве, характеризуется способностью к антагонистической активности против грамположительных бактерий и актиномицетов, а также к стимулированию роста растений путем синтеза сидерофоров, аммиака и HCN (Jain, Pandey, 2016). Мутант *P. aurantiaca* B-162/498, который способен к повышенному уровню образования феназинов, в

системе *in vitro* задерживал рост патогенов рода *Fusarium* в 1,3–1,6 раза, в условиях *in planta* – средняя масса проростков пшеницы увеличилась в 1,5–1,7 раза. Сходные результаты описаны в работе с генно-инженерными сверхпродуцентами антибиотиков феназинового ряда *P. fluorescens* z34-97 и z33-97, которые были получены путем клонирования феназинового оперона. Указанные штаммы способны к более интенсивному синтезу феназин-1-карбоксилата, различия с исходным штаммом составляют 1,5–2,7 раза. При этом исследователи отмечают, что обработка растений данными бактериальными культурами приводит к снижению на 40% поражения пшеницы фитопатогенными грибами *Gaeumannomyces graminis* и *Rhizoctonia solani* (Феклистова, Максимова, 2008; Feklistova, Maksimova, 2008; Huang et al., 2014). Способность к синтезу пирронитрина отмечена у штамма *P. aeruginosa* PS24, что способствовало подавлению развития *Rhizopus microsporus*, *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus niger*, *Alternaria alternata* и *Penicillium digitatum* (Uzair et al., 2018).

Одним из возможных путей подавления развития фитопатогенов является синтез сидерофоров. Сидерофоры – низкомолекулярные соединения, хелатирующие трехвалентное железо. В условиях ограниченного содержания железа способность некоторых представителей рода *Pseudomonas* приобретать ионы трехвалентного железа за счет высокого сродства сидерофоров к железу является важным конкурентным преимуществом перед другими бактериями и грибами, в т.ч. и фитопатогенами (Dorje et al., 2017). Кроме того, в исследованиях M. Gull и F.Y. Hafeez показано, что именно синтез сидерофоров у штамма *P. fluorescens* Mst 8.2 выступает основным механизмом подавления *R. solani* (заболеваемость пшеницы снижалась до 70%) (Gull, Hafeez, 2012).

Наиболее активным из известных сидерофоров, который синтезируют представители рода *Pseudomonas*, является пиовердин (Vansuyt et al., 2007). Это вещество защищает растения от фитопатогенов, образуя прочный комплекс с ионами железа и переводя их в недоступную для других микроорганизмов форму. Широкий спектр антагонистической активности за счет способности синтезировать данный желто-зеленый флуоресцирующий пигмент имеют, например, штаммы *P. fluorescens* ВКМВ-896, В-24, 8305, *P. putida* В-37, В-40, *P. vesicatoria* ВКМВ-546, *P. aureofaciens* В-161, *P. aurantiaca* В-162, *P. chlororaphis* ВКМВ-897, 449, *P. sp.* 139 (Кулешова и др., 2017). Как известно, синтез пиовердина при избыточном содержании железа в среде ингибируется. Однако, исследования Ю.М. Кушлетовой с соавт. (2006) показывают, противоположное: мутанты бактерий *P. putida* КМБУ 4308 (уровень образования пиовердина выше в 1,6–2,0 раза по сравнению с диким типом) способны к синтезу данного сидерофора в присутствии ионов железа (Кулешова и др., 2006).

В ряде работ отмечено, что синтез цианистого водорода (HCN) играет одну из решающих ролей в подавлении роста фитопатогенных грибов (Kumari et al., 2018). HCN вырабатывается многими ризобактериями, в т.ч. штаммом *P. fluorescens* СНАО, что вызывает изменение физиологической активности растений: происходит торможение транспорта электронов, в результате чего энергоснабжение клеток нарушается, что приводит к гибели организма. Цианистый водород влияет на функционирование ферментов и естественных рецепторов посредством обратимых механизмов ингибирования, что характерно и для цитохромоксидазы (Dorje et al., 2017).

Косвенный путь антагонизма бактерий связан с их возможностью синтезировать

вещества, способные за счет передачи сигнала вызывать защитные реакции и играть решающую роль в активации генов, которые связаны с кодированием пероксидаз, полифенолоксидаз, хитиназ, глюканаз, каталаз, супероксиддисмутаза, протеиназ, липоксигеназ и лиаз. Исследования S.R. Prabhukarthikeyan и соавторов показывают, что ранняя и повышенная экспрессия пероксидаз, супероксиддисмутаза, каталаз, протеиназ и других ферментов приводит к значительной устойчивости растений. Данные ферменты за счет их связи с лигнификацией, удалением АФК, катализом окисления монофенольных и ортодифенольных соединений обладают противогрибковой активностью (Prabhukarthikeyan et al., 2018). Результаты исследований Е.Е. Акимовой и соавторов (2018) свидетельствуют, что инокуляция семян пшеницы бактериями способствовала увеличению активности пероксидазы на 9% в листьях инфицированных ростков пшеницы. Результаты позволяют говорить об обратной зависимости между активностью пероксидазы в тканях пшеницы и пораженностью растений корневой гнилью (Акимова и др., 2018).

Синтез метаболитов, оказывающих действие на рост или развитие надземных и подземных органов, представителями рода *Pseudomonas*

Один из путей стимуляции роста или развития растений – синтез бактериями PGPR-группы фитогормонов (Xie et al., 1996), ферментов (Safronova et al., 2006) и сидерофоров (Prabhukarthikeyan et al., 2018). Например, штамм *P. fluorescens* B16 способен стимулировать рост растений огурца и ячменя в тепличных и полевых условиях (Kim et al., 1998), а также томатов, арабидопсиса и острого перца. Вероятно, основным механизмом стимуляции роста растений штаммом *P. fluorescens* B16

является способность бактерий синтезировать пирролохинолинхинон (PQQ) (Choi et al., 2008), который действует как поглотитель активных форм кислорода (Misra et al., 2004). В исследованиях О.В. Сырмолот и Н.С. Кочевой показано ростостимулирующее действие экспериментального препарата, основу которого составляет ризосферная бактерия *Pseudomonas* sp. BZR 245-F: после обработки семян наблюдалось увеличение высоты растений по сравнению с контролем на 38,1%, количества листьев – на 4,9%, а также количества клубеньков сои на 9,8% (Сырмолот, Кочева, 2019).

Роль бактерий рода *Pseudomonas* в синтезе фитогормонов

Одной из групп фитогормонов, которая играет важную роль в регулировании роста и развития растений, является группа ауксинов. Индол-3-уксусная кислота (ИУК) – наиболее распространенный ауксин, отвечающий за регуляцию разнообразных клеточных процессов: деление и рост клеток, дифференциация сосудов, образование корней, верхушечное доминирование, тропизмы и т. д. Многие ризосферные и почвенные микроорганизмы характеризуются способностью к синтезу ИУК. Перспективными в этом отношении являются бактерии рода *Pseudomonas*, 80% представителей которого способны к синтезу ИУК во внешнюю среду (Dubeikovskiy et al., 1993).

В исследованиях С.С. Жардецкого и соавторов показано, что обработка семян огурца ИУК-продуцирующими бактериями приводила к увеличению в 2,3–2,9 раза длины корней и в 1,6–2,0 раза массы проростков. При этом инокуляция семян штаммом *P. mendocina* 9–40 стимулировала корнеобразование боковых и придаточных корней (Жардецкий и др., 2005).

Не менее интересна способность бактерий к синтезу фитогормонов группы гиб-

береллинов, которые могут быть полезны для стимуляции роста и нарушения покоя растений. Так, имеется опыт использования гибберелловой кислоты с целью повышения урожайности кишмишных сортов винограда и цитрусовых, увеличения вегетативной массы в луговодстве, стимуляции роста побегов чайного куста и повышения в листьях содержания танина, а также ускорения появления всходов и увеличения количества проросших глазков в картофелеводстве. И.Н. Феклистова и Н.П. Максимова показывают, что бактерии *P. aurantiaca* В-162 способны синтезировать гиббереллины в количестве 13,18 мг/л, а мутанты – до 31 мг/л. При этом исследователи отмечают связь уровня синтеза гиббереллинов и степени стимулирующего роста растений действия (Феклистова, Максимова, 2009). В исследованиях J.L.S. Heng и N.S.M. Zainual отмечено, что среди 50 проанализированных штаммов бактерий 35% обладали способностью синтезировать гиббереллиновую кислоту, наиболее интенсивный синтез был обнаружен у штамма *P. putida* PF1P (10,1 мкг/мл). Действие данного штамма привело к увеличению сырой массы и длины корня *Brassica chinensis* на 54,6 и 51,3% соответственно (Heng, Zainual, 2017).

Участие представителей рода *Pseudomonas* в повышении доступности минеральных компонентов для растений

Фосфор – один из важнейших биогенных элементов биосферы, валовые запасы которого в почве достаточно велики, однако он находится в малодоступном для растений виде (Кузьмина и др., 2016). При этом в ряде исследований показана способность бактерий рода *Pseudomonas* растворять фосфаты (Tiwari, Singh, 2017; Uzair et al., 2018). Так, например, отмечено, что штаммы рода *Pseudomonas* разрушали ортофосфат кальция на 61–74%, высокопер-

спективным оказался штамм *P. mandelii* IB Ki-14 (Кузьмина и др., 2016).

Высвобождение фосфора из нерастворимых фосфатов объясняется главным образом выработкой органических кислот и их способностью к хелатированию. Прямое периплазматическое окисление глюкозы до глюконовой кислоты рассматривается как метаболическая основа солиubilизации неорганических фосфатов многими грамотрицательными бактериями в качестве конкурентной стратегии по преобразованию легкодоступных источников углерода в продукты, менее пригодные для использования другими микроорганизмами (Chen et al., 2006). В исследовании (Vyas, Gulati, 2009) показано, что штаммы бактерий рода *Pseudomonas*, которые были способны к солиubilизации фосфатов, синтезировали глюкановую, 2-кетоглюконовую, янтарную, муравьиновую, лимонную, яблоневою, а также щавелевую и молочную кислоты (Van Peer et al., 1991).

Участие представителей рода *Pseudomonas* в повышении стрессоустойчивости растений

Возможность бактерий PGPR-группы стимулировать иммунитет растений и ускорять их рост была открыта более 20 лет назад. Растения, обработанные ризосферными непатогенными бактериями, способны включать различные защитные ответы на стрессоры, что выражается в формировании химических и физических барьеров на пути проникновения и развития патогена, включении механизмов, позволяющих выжить в сложившихся неблагоприятных условиях, т. е. в растительном организме возникает индуцированная системная устойчивость к биотическим и абиотическим факторам (Vyas, Gulati, 2009).

Некоторые виды микроорганизмов способны ощутимо повышать порог стресса

растений. Это может быть обусловлено снижением содержания этилена. Например, бактерии с помощью собственного фермента АЦК-дезаминазы способны удалять аминокислотную группу от молекулы 1-аминоциклопропан-1-карбоксилата (АЦК), которая является непосредственным предшественником этилена. Так, исследования со штаммом *P. mendocina* 9-40, имеющим ген АЦК-дезаминазы, показали, что внесение его суспензии в почву снижало действие засоления на рост растений томата: длина стебля превзошла контроль в 1,1–1,6 раза, масса – в 1,2 раза. При этом увеличение негативного влияния стрессора способствовало повышению и выраженности фитопротекторных свойств изучаемого штамма. Кроме того, штамм *P. mendocina* 9-40 нивелировал негативное действие солей хрома на растения томата (морфометрические параметры превосходили контроль в 2,0–3,4 раза), солей меди (в 1,0–3,5 раза) и солей свинца (в 0,7–2,4 раза) (Жардецкий, Храмова, 2018).

В серии экспериментов И.А. Гринева и соавторов установлено, что препараты, приготовленные на основе штаммов *P. aurantiaca* В-162, *P. putida* F19 и *B. subtilis* 494, способны одновременно увеличивать энергию прорастания и полевую всхожесть растений рапса в условиях высокого уровня засоления (концентрация NaCl 250 ммоль/л). Кроме того, было выражено достоверное увеличение показателей полевой всхожести рапса на 20% и длины стебля на 19% в условиях действия засоления (концентрация NaCl 150 ммоль/л), что позволяет говорить о формировании системной устойчивости (Гринева и др., 2017). Результаты исследований Р. Tiwari и J.S. Singh также демонстрируют способность бактерий *P. aeruginosa* стимулировать рост растений пшеницы и кукурузы путем синтеза ИУК в условиях повышенного содержания хлорида натрия (концентрация NaCl 8%) (Tiwari, Singh, 2017), а Т. Chu

и соавторов – способность бактерий *P. putida* PS01 улучшать всхожесть семян (при NaCl 150 ммоль/л) и жизнеспособность (при NaCl 225 ммоль/л) арабидопсиса в условиях засоления (Chu et al., 2019).

Создание биологических препаратов на основе перспективных бактерий рода *Pseudomonas*

Чаще всего в качестве основы для биологических препаратов рассматривают те штаммы, которые способны одновременно оказывать защитное от фитопатогенов и стимулирующее рост действие. Например, штамм *P. aeruginosa* ВНУ В13-398 обладает сильным антагонистическим потенциалом против *R. solani*, способностью к солибилизированию фосфата (1341,24 мкг/мл) и продуцированию ИУК (111,94 мкг/мл), сидерофоров, аммиака и HCN. Инокуляция данным штаммом бобовых растений показала увеличение длины побегов и корней на 33 и 85% соответственно, также наблюдалось превосходство контроля по сухой массе корней на 240%, площади листовой поверхности на 87% и содержания хлорофилла на 16% (Kumari et al., 2018).

Отметим, что результаты наших исследований суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 (были проведены лабораторные и полевые опыты в 2020–2023 гг. с ячменем, овсом, пшеницей и тритикале) также демонстрируют его высокий потенциал для растениеводства. Так, данные бактерии способны к мобилизации фосфатов, синтезу ИУК и некоторому подавлению фитопатогенов (Buchkova et al., 2022), а действие суспензии на зерновые культуры способствует активации их роста и повышению урожайности (Рассохина и др., 2020; Рассохина и др., 2022; Рассохина, Маракаев, 2023; Рассохина, Платонов, 2023).

Изучив Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской

Федерации, видно, что доля биопестицидов, созданных на основе штаммов рода *Pseudomonas*, невелика и составляет всего 16%. При этом среди представителей изучаемого рода в качестве основы для создания биопестицидов, как правило, использованы *P. fluorescens* и *P. aureofaciens*. Так, препарат «Бинорам», созданный на основе *P. fluorescens* 7Г, 7Г2К, 17-2, рекомендован для использования на пшенице, ячмене, картофеле и капусте белокочанной с целью подавления развития корневых гнилей, ризоктониоза и бактериоза, а препарат «Ризоплан» (штамм AP-33) допущен к использованию на пшенице, ячмене, сахарной свекле, картофеле, капусте, землянике, а также яблоне и винограде и позволяет бороться с развитием бурой ржавчины, септориоза, мучнистой росы, корневых гнилей, церкоспороза, пероноспороза, фитофтороза, ризоктониоза, черной ножки, бактериоза и пр. Также в каталоге отмечена эффективность *P. aureofaciens* штамм BS 1393 (препарат «Псевдобактерин-2») против плесени, корневой гнили, бурой ржавчины, септоиоза, мучнистой росы при действии на зерновые культуры, против церкоспороза при использовании на сахарной свекле, против корневых гнилей для овощей закрытого грунта. Штаммы *P. aureofaciens* IMBV-7096 и IMBV-7097

(препарат «Гуапсинплюс») способны подавлять развитие фузариозной и гельминтоспориозной корневых гнилей, а также мучнистую росу у пшеницы².

Выводы

Представители рода *Pseudomonas* повсеместно распространены в почвенной экосистеме и являются общими обитателями ризосферы различных сельскохозяйственных культур. К основным механизмам микробно-растительного взаимодействия представителей данного рода можно отнести подавление развития фитопатогенных грибов и/или бактерий (прямой и косвенный антагонизм); синтез метаболитов, оказывающих действие на рост и/или развитие надземных и подземных органов; повышение доступности минеральных компонентов для растения; нивелирование стрессовых факторов. Таким образом, бактерии рода *Pseudomonas* обладают высоким потенциалом для агропроизводства и могут быть использованы для создания биологических препаратов как защитного, так и ростостимулирующего действия. Наиболее интересными для реального сектора будут те штаммы, которые одновременно способны реализовывать сразу обе функции, при этом их колонизирующая способность будет высокой.

ЛИТЕРАТУРА

- Акимова Е.Е., Терещенко Н.Н., Зюбанова Т.И. [и др.] (2018). Влияние бактерий рода *Pseudomonas* на активность пероксидазы в растениях пшеницы при инфицировании *Bipolaris sorokiniana* // Физиология растений. Т. 65. № 5. С. 366–375.
- Гринева И.А., Кулешова Ю.М., Ломоносова В.А. [и др.] (2017). Индукция устойчивости у растений рапса к засолению элиситорами – производными бактерий родов *Pseudomonas* и *Bacillus* // Журнал Белорусского гос. ун-та. Биология. № 1. С. 38–43.
- Жардецкий С.С., Путинская А.Я., Храмцова Е.А. (2005). Ростостимулирующая активность мутантного штамма бактерий *Pseudomonas mendocina* // Вестник БГУ. Сер. 2: Химия. Биология. География. С. 32–35.
- Жардецкий С.С., Храмцова Е.А. (2018). Влияние ИУК-продуцирующего штамма *Pseudomonas mendocina* 9-40 на стрессоустойчивость растений // Биологически активные препараты для растениеводства. Научное обоснование – рекомендации – практические результаты: мат-лы XIV Междунар. науч.-практ. конф. С. 75–77.

² Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации (2023) // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Т. 1. 65 с.

- Иванов В.А. (2023). Стратегия развития сельского хозяйства Европейского Севера России / отв. ред. В.Н. Лаженцев; Мин-во науки и высшего образования РФ, Коми научный центр УрО РАН, Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера. Сыктывкар: Принт. 139 с.
- Кузьмина Л.Ю., Гуватова З.Г., Ионина В.И. [и др.] (2016). Мобилизация ортофосфата кальция бактериями родов *Advenella* и *Pseudomonas* // Вестник защиты растений. № 89 (3). С. 90–91.
- Кулешова Ю.М., Камаева М.В., Максимова Н.П. (2006). Получение бактерий *Pseudomonas putida* КМБУ 4308, способных к сверхпродукции пигмента пиовердина Pm // Вестник Белорусского гос. ун-та. Сер. 2: Химия. Биология. География. № 2. С. 48–52.
- Кулешова Ю.М., Максимова Н.П., Блажевич О.В., Семак И.В. (2006). Идентификация и характеристика пиовердина pm – нового антирадикального соединения, синтезируемого бактериями *Pseudomonas putida* КМБУ 4308 // Труды Белорусского гос. ун-та. Вып. 1. С. 89–97.
- Кулешова Ю.М., Рыбакова В.А., Феклистова И.Н. [и др.] (2017). Принципы отбора стимуляторов корнеобразования растений среди бактерий *Pseudomonas* с антагонистической активностью // Журнал Белорусского гос. ун-та. Биология. № 3. С. 54–62.
- Максимов И.В., Абизильдина Р.Р., Пусенкова Л.И. (2011). Стимулирующие рост растений микроорганизмы как альтернатива химическим средствам защиты от патогенов // Прикладная биохимия и микробиология. Т. 47. № 4. С. 373–385.
- Рассохина И.И., Маракаев О.А. (2023). Оценка морфофизиологических параметров и продуктивности обыкновенного ячменя (*Hordeum vulgare* L.) при действии суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. № 3 (43). С. 92–104. DOI: 10.21685/2307-9150-2023-3-8
- Рассохина И.И., Платонов А.В. (2023). Действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 на рост и продуктивность ячменя обыкновенного сорта Сонет // Вестник аграрной науки. № 6 (105). С. 50–55. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2023.6.50
- Рассохина И.И., Платонов А.В., Маракаев О.А., Зайцева Ю.В. (2020). Эффективность инокуляции семян овса посевного штаммом *Pseudomonas* sp. GEOT18, перспективным для создания биопрепарата // Международный сельскохозяйственный журнал. № 5 (377). С. 52–55. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-15093
- Рассохина И.И., Платонов А.В., Платонов А.А. (2022). Действие бактерий рода *Pseudomonas* sp. на рост и продуктивность тритикале // Вестник КрасГАУ. № 1 (178). С. 93–99. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-93-99
- Сырмолот О.В., Кочева Н.С. (2019). Оценка влияния бактерий родов *Bacillus* и *Pseudomonas* на продуктивность сои // Международный научно-исследовательский журнал. № 10–2 (88). DOI: 10.23670/IRJ.2019.88.10.02
- Феклистова И.Н., Максимова Н.П. (2008). Синтез пирролнитрина бактериями *Pseudomonas aurantia-sa* B-162 // Труды Белорусского государственного университета. Т. 3. С. 148–155.
- Феклистова И.Н., Максимова Н.П. (2009). Гиббереллины бактерий *Pseudomonas aurantia-sa*: биологическая активность, подходы к получению и использованию продуцентов фитогормонов // Труды Белорусского государственного университета. Т. 4. № 1.
- Bychkova A.A., Zaitseva Y.V., Sidorov A.V., Aleksandrova A.S., Marakaev O.A. (2022). Biotechnological potential of phosphate-solubilizing *Pseudomonas migulae* strain GEOT18. *International Journal of Agricultural Technology*, 18 (4), 1403–1414.
- Chen Y.P., Rekha P.D., Arun A.B. [et al.] (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34, 33–41. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002
- Choi O., Kim J., Kim J.G. [et al.] (2008). Pyrroloquinoline quinone is a plant growth promotion factor produced by *Pseudomonas fluorescens* B16. *Plant physiology*, 146 (2), 657–668. DOI: 10.1104/pp.107.112748
- Chu T.N., Tran B.T.H., Van Bui L., Hoang M.T.T. (2019). Plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas* PS01 induces salt tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *BMC research notes*, 12 (1), 11. DOI: 10.1186/s13104-019-4046-1

- Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7 (6), 1335–1344. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.607.160
- Dubeikovsky A.N., Mordukhova E.A., Kochetkov V.T., Polikarpova F.Y., Boronin A.M. (1993). Growth promotion of blackcurrant softwood cuttings by recombinant strain *Pseudomonas fluorescens* BSP53a synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid. *Soil biology and Biochemistry*, 25 (9), 1277–1281. DOI: 10.1016/0038-0717(93)90225-Z
- Feklistova I.N., Maksimova N.P. (2008). Obtaining *Pseudomonas aurantiaca* strains capable of overproduction of phenazine antibiotics. *Microbiology*, 77 (2), 176–180.
- Gull M., Hafeez F.Y. (2012). Characterization of siderophore producing bacterial strain *Pseudomonas fluorescens* Mst 8.2 as plant growth promoting and biocontrol agent in wheat. *African Journal of Microbiology Research*, 6 (33), 6308–6318. DOI: 10.5897/AJMR12.1285
- Heng J.L.S., Zainual N.S.M. (2017). Effect of encapsulated *Pseudomonas putida* strain PF1P on plant growth and its microbial ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 16 (41), 2009–2013. DOI: 10.5897/AJB2017.16164
- Huang Z., Bonsall R.F., Mavrodi D.V., Weller D.M., Thomashow L.S. (2014). Transformation of *Pseudomonas fluorescens* with genes for biosynthesis of phenazine-1-carboxylic acid improves biocontrol of rhizoctonia root rot and in situ antibiotic production. *FEMS Microbiology Ecology*, 49 (2), 243–251. DOI: 10.1016/j.femsec.2004.03.010
- Jain R., Pandey A. (2016). A phenazine-1-carboxylic acid producing polyextremophilic *Pseudomonas chlororaphis* (MCC2693) strain, isolated from mountain ecosystem, possesses biocontrol and plant growth promotion abilities. *Microbiological research*, 190, 63–71. DOI: 10.1016/j.micres.2016.04.017
- Kim J., Choi O., Kang J.H. [et al.] (1998). Tracing of some root colonizing *Pseudomonas* in the rhizosphere using lux gene introduced bacteria. *Korean Journal of Plant Pathology*, 14, 13–18.
- Kumar A., Verma H., Singh V.K. [et al.] (2017). Role of *Pseudomonas* sp. in sustainable agriculture and disease management. *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*, 2, 195–215. DOI: 10.1007/978-981-10-5343-6_7
- Kumari P., Meena M., Gupta P. [et al.] (2018). Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 16, 163–171. DOI: 10.1016/j.bcab.2018.07.030
- Misra H.S., Khairnar N.P., Barik A. [et al.] (2004). Pyrroloquinoline-quinone: A reactive oxygen species scavenger in bacteria. *FEBS letters*, 578, 26–30. DOI: 10.1016/j.febslet.2004.10.061
- Prabhukarthikeyan S.R., Keerthana U., Raguchander T. (2018). Antibiotic-producing *Pseudomonas fluorescens* mediates rhizome rot disease resistance and promotes plant growth in turmeric plants. *Microbiological Research*, 210, 65–73. DOI: 10.1016/j.micres.2018.03.009
- Safronova V.I., Stepanok V.V., Engqvist G.L., Alekseyev Y.V., Belimov A.A. (2006). Root-associated bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxyate deaminase improve growth and nutrient uptake by pea genotypes cultivated in cadmium supplemented soil. *Biology and Fertility of Soils*, 42, 267–272. DOI: 10.1007/s00374-005-0024-y
- Sah S., Krishnani S., Singh R. (2021). *Pseudomonas* mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100084. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100084
- Singh P., Singh R.K., Guo D.-J. [et al.] (2021). Whole genome analysis of sugarcane root-associated endophyte *Pseudomonas aeruginosa* B18-A plant growth-promoting bacterium with antagonistic potential against *Sporisorium scitamineum*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 628376. DOI: 10.3389/fmicb.2021.628376
- Singh P., Singh R.K., Zhou Y. [et al.] (2022). Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: A review. *Journal of Plant Interactions*, 17 (1), 220–238. DOI: 10.1080/17429145.2022.2029963

- Tiwari P., Singh J.S. (2017). A plant growth promoting rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* strain inhibits seed germination in *Triticum aestivum* (L) and *Zea mays* (L). *Microbiology Research*, 8 (2), 7233. DOI: 10.4081/mr.2017.7233
- Uzair B., Kausar R., Bano S.A. [et al.] (2018). Isolation and molecular characterization of a model antagonistic *Pseudomonas aeruginosa* divulging in vitro plant growth promoting characteristics. *BioMed Research International*, 1–7. DOI: 10.1155/2018/6147380
- Van Peer R., Niemann G.J., Schippers B. (1991). Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of Fusarium wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. strain WCS 417. *Phytopathology*, 81, 728–734.
- Vansuyt G., Robin A., Briat J.F., Curie C., Lemanceau P. (2007). Iron acquisition from Fe-pyoverdine by *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 20 (4), 441–447. DOI: 10.1094/MPMI-20-4-0441
- Vyas P., Gulati A. (2009). Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC microbiology*, 9, 1–15. DOI: 10.1186/1471-2180-9-174
- Xie H., Pasternak J.J., Glick B.R. (1996). Isolation and characterization of mutants of the plant growth-promoting rhizobacteria *Pseudomonas putida* GR12-2 that overproduce indoleacetic acid. *Current Microbiology*, 32, 67–71. DOI: 10.1007/s002849900012
- Zia R., Nawaz M.S., Siddique M.J., Hakim S., Imran A. (2020). Plant survival under drought stress: implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiology Research*, 242, 126626. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126626

Сведения об авторе

Ирина Игоревна Рассохина – научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: rasskhinairina@mail.ru)

THE POTENTIAL OF PSEUDOMONAS BACTERIA FOR THE USE IN CROP PRODUCTION

Rassokhina I.I.

■ One of the priority directions outlined in the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation is to increase environmentally friendly agricultural production, which is consistent with the Strategy for the Development of Organic Production up to 2030. The use of microorganisms and preparations made on their basis can promote growth and increase crop productivity. The aim of the research is to analyze Russian and foreign literature and to identify the main mechanisms of interaction between bacteria of the genus *Pseudomonas* and plants. *Pseudomonas* are gram-negative rod-shaped aerobic non-spore-forming bacteria with rapid growth and high root colonization. They represent the largest group of PGPR organisms capable of living in various conditions. The most well-known species of the genus *Pseudomonas* useful for agricultural production include *P. aeruginosa*, *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. putida* and *P. syringe*. Representatives of the genus *Pseudomonas* are ubiquitous in the soil ecosystem and are common inhabitants of the rhizosphere of various crops, where they play a major role in stimulating plant growth through various mechanisms. Based on the results of research by Russian and foreign authors, the following main mechanisms of plant-microbial

interaction are identified in the framework of the review: suppression of the development of phytopathogenic fungi and/or bacteria (direct and indirect pathway of antagonism); synthesis of metabolites that influence the growth or development of aerial and underground organs (including phytohormones); increased availability of mineral components for plants (primarily phosphates); leveling of stress factors. In general, bacteria of the genus Pseudomonas have a high potential for agricultural production and can be used to create biological preparations for crop production with protective and growth-stimulating effects. The strains that are able to implement both functions simultaneously, while retaining high colonizing ability, will be of the greatest interest to the real sector.

PGPR, Pseudomonas, agricultural crops, growth, antagonism, phytohormones, phosphate solubilization.

REFERENCES

- Akimova E.E., Tereshchenko N.N., Zyubanova T.I. et al. (2018). Effect of bacteria of the genus *Pseudomonas* on peroxidase activity in wheat plants when infected with *Bipolaris sorokiniana*. *Fiziologiya rastenii*, 65(5), 366–375 (in Russian).
- Bychkova A.A., Zaitseva Y.V., Sidorov A.V., Aleksandrova A.S., Marakaev O.A. (2022). Biotechnological potential of phosphate-solubilizing *Pseudomonas migulae* strain GEOT18. *International Journal of Agricultural Technology*, 18(4), 1403–1414.
- Chen Y.P., Rekha P.D., Arun A.B. et al. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34, 33–41. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002
- Choi O., Kim J., Kim J.G. et al. (2008). Pyrroloquinoline quinone is a plant growth promotion factor produced by *Pseudomonas fluorescens* B16. *Plant physiology*, 146(2), 657–668. DOI: 10.1104/pp.107.112748
- Chu T.N., Tran B.T.H., Van Bui L., Hoang M.T.T. (2019). Plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas* PS01 induces salt tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *BMC research notes*, 12(1), 11. DOI: 10.1186/s13104-019-4046-1
- Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(6), 1335–1344. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.607.160
- Dubeikovskiy A.N., Mordukhova E.A., Kochetkov V.T., Polikarpova F.Y., Boronin A.M. (1993). Growth promotion of blackcurrant softwood cuttings by recombinant strain *Pseudomonas fluorescens* BSP53a synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid. *Soil biology and Biochemistry*, 25(9), 1277–1281. DOI: 10.1016/0038-0717(93)90225-Z
- Feklistova I.N., Maksimova N.P. (2008). Obtaining *Pseudomonas aurantiaca* strains capable of overproduction of phenazine antibiotics. *Microbiology*, 77(2), 176–180.
- Feklistova I.N., Maksimova N.P. (2008). Synthesis of pyrrolnitrin by the bacterium *Pseudomonas aurantiaca* B-162. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 3, 148–155 (in Russian).
- Feklistova I.N., Maksimova N.P. (2009). Gibberellins of the bacterium *Pseudomonas aurantiaca*: Biological activity, approaches to the production and utilization of phytohormone producers. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 4(1) (in Russian).
- Grineva I.A., Kuleshova Yu.M., Lomonosova V.A. et al. (2017). Induction of resistance in rape plants to salinity by elicitors – derivatives of bacteria of *Pseudomonas* and *Bacillus* genera. *Zhurnal Belorusskogo gos. un-ta. Biologiya*, 1, 38–43 (in Russian).
- Gull M., Hafeez F.Y. (2012). Characterization of siderophore producing bacterial strain *Pseudomonas fluorescens* Mst 8.2 as plant growth promoting and biocontrol agent in wheat. *African Journal of Microbiology Research*, 6(33), 6308–6318. DOI: 10.5897/AJMR12.1285

- Heng J.L.S., Zainual N.S.M. (2017). Effect of encapsulated *Pseudomonas putida* strain PF1P on plant growth and its microbial ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 16(41), 2009–2013. DOI: 10.5897/AJB2017.16164
- Huang Z., Bonsall R.F., Mavrodi D.V., Weller D.M., Thomashow L.S. (2014). Transformation of *Pseudomonas fluorescens* with genes for biosynthesis of phenazine-1-carboxylic acid improves biocontrol of rhizoctonia root rot and in situ antibiotic production. *FEMS Microbiology Ecology*, 49(2), 243–251. DOI: 10.1016/j.femsec.2004.03.010
- Ivanov V.A. (2023). Strategy for the development of agriculture in the European North of Russia. In: Lazhentsev V.N. (Ed.). *Min-vo nauki i vysshego obrazovaniya RF, Komi nauchnyi tsentr UrO RAN, Institut sotsial'no-ekonomicheskikh i energeticheskikh problem Severa* [Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Komi Scientific Center of the Ural RAS Department, Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North]. Syktyvkar: Print.
- Jain R., Pandey A. (2016). A phenazine-1-carboxylic acid producing polyextremophilic *Pseudomonas chlororaphis* (MCC2693) strain, isolated from mountain ecosystem, possesses biocontrol and plant growth promotion abilities. *Microbiological research*, 190, 63–71. DOI: 10.1016/j.micres.2016.04.017
- Kim J., Choi O., Kang J.H. et al. (1998). Tracing of some root colonizing *Pseudomonas* in the rhizosphere using lux gene introduced bacteria. *Korean Journal of Plant Pathology*, 14, 13–18.
- Kuleshova Yu.M., Kamaeva M.V., Maksimova N.P. (2006). Production of *Pseudomonas putida* KMBU 4308 bacteria capable of overproduction of the pyoverdine pigment Pm. *Vestnik Belorusskogo gos. un-ta. Ser. 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2, 48–52 (in Russian).
- Kuleshova Yu.M., Maksimova N.P., Blazhevich O.V., Semak I.V. (2006). Identification and characterization of pyoverdine pm, a novel antiradical compound synthesized by the bacterium *Pseudomonas putida* KMBU 4308. *Trudy Belorusskogo gos. un-ta*, 1, 89–97 (in Russian).
- Kuleshova Yu.M., Rybakova V.A., Feklistova I.N. et al. (2017). Selection principles of plant korne formation stimulations among bacteria *Pseudomonas* with antagonistic activity. *Zhurnal Belorusskogo gos. un-ta. Biologiya*, 3, 54–62 (in Russian).
- Kumar A., Verma H., Singh V.K. et al. (2017). Role of *Pseudomonas* sp. in sustainable agriculture and disease management. *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*, 2, 195–215. DOI: 10.1007/978-981-10-5343-6_7
- Kumari P., Meena M., Gupta P. et al. (2018). Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 16, 163–171. DOI: 10.1016/j.bcab.2018.07.030
- Kuzmina L.Yu., Guvatova Z.G., Ionina V.I. et al. (2016). The mobilization of calcium orthophosphate by bacteria from *Advenella* and *Pseudomonas* genera. *Vestnik zashchity rastenii*, 89(3), 90–91 (in Russian).
- Maksimov I.V., Abizgil'dina R.R., Pusenkova L.I. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protections from pathogens. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 47(4), 373–385 (in Russian).
- Misra H.S., Khairnar N.P., Barik A. et al. (2004). Pyrroloquinoline-quinone: A reactive oxygen species scavenger in bacteria. *FEBS letters*, 578, 26–30. DOI: 10.1016/j.febslet.2004.10.061
- Prabhukarthikeyan S.R., Keerthana U., Raguchander T. (2018). Antibiotic-producing *Pseudomonas fluorescens* mediates rhizome rot disease resistance and promotes plant growth in turmeric plants. *Microbiological Research*, 210, 65–73. DOI: 10.1016/j.micres.2018.03.009
- Rassokhina I.I., Marakaev O.A. (2023). Assessment of morphophysiological parameters and productivity of *Hordeum vulgare* under the action of *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain suspension. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki*, 3(43), 92–104. DOI: 10.21685/2307-9150-2023-3-8 (in Russian).
- Rassokhina I.I., Platonov A.V. (2023). Effect of suspension of *pseudomonas* sp. GEOT 18 strain on growth and productivity of Barley variety sonnet. *Vestnik agrarnoi nauki*, 6(105), 50–55. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2023.6.50 (in Russian).

- Rassokhina I.I., Platonov A.V., Marakaev O.A., Zaitseva Yu.V. (2020). Effectiveness of *Avena Sativa* L. seed inoculation by the strain *Pseudomonas* sp. GEOT18 promising for creating biologicals. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal=International Agricultural Journal*, 5(377), 52–55. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-15093 (in Russian).
- Rassokhina I.I., Platonov A.V., Platonov A.A. (2022). The genus *Pseudomonas* sp. Bacteria effect on *Triticosecale* growth and productivity. *Vestnik KrasGAU=Bulletin KraSAU*, 1(178), 93–99. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-93-99 (in Russian).
- Safronova V.I., Stepanok V.V., Engqvist G.L., Alekseyev Y.V., Belimov A.A. (2006). Root-associated bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxyate deaminase improve growth and nutrient uptake by pea genotypes cultivated in cadmium supplemented soil. *Biology and Fertility of Soils*, 42, 267–272. DOI: 10.1007/s00374-005-0024-y
- Sah S., Krishnani S., Singh R. (2021). *Pseudomonas* mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100084. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100084
- Singh P., Singh R.K., Guo D.-J. et al. (2021). Whole genome analysis of sugarcane root-associated endophyte *Pseudomonas aeruginosa* B18-A plant growth-promoting bacterium with antagonistic potential against *Sporisorium scitamineum*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 628376. DOI: 10.3389/fmicb.2021.628376
- Singh P., Singh R.K., Zhou Y. et al. (2022). Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: A review. *Journal of Plant Interactions*, 17(1), 220–238. DOI: 10.1080/17429145.2022.2029963
- Symolot O.V., Kocheva N.S. (2019). Impact assessment of bacterias of *Bacillus* and *Pseudomonas* genus on soy productivity. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 10–2(88). DOI: 10.23670/IRJ.2019.88.10.02 (in Russian).
- Tiwari P., Singh J.S. (2017). A plant growth promoting rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* strain inhibits seed germination in *Triticum aestivum* (L) and *Zea mays* (L). *Microbiology Research*, 8(2), 7233. DOI: 10.4081/mr.2017.7233
- Uzair B., Kausar R., Bano S.A. et al. (2018). Isolation and molecular characterization of a model antagonistic *Pseudomonas aeruginosa* divulging in vitro plant growth promoting characteristics. *BioMed Research International*, 1–7. DOI: 10.1155/2018/6147380
- Van Peer R., Niemann G.J., Schippers B. (1991). Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of *Fusarium* wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. strain WCS 417. *Phytopathology*, 81, 728–734.
- Vansuyt G., Robin A., Briat J.F., Curie C., Lemanceau P. (2007). Iron acquisition from Fe-pyoverdine by *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 20(4), 441–447. DOI: 10.1094/MPMI-20-4-0441
- Vyas P., Gulati A. (2009). Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC Microbiology*, 9, 1–15. DOI: 10.1186/1471-2180-9-174
- Xie H., Pasternak J.J., Glick B.R. (1996). Isolation and characterization of mutants of the plant growth-promoting rhizobacteria *Pseudomonas putida* GR12-2 that overproduce indoleacetic acid. *Current Microbiology*, 32, 67–71. DOI: 10.1007/s002849900012
- Zhardetskii S.S., Khrantsova E.A. (2018). Effect of *Pseudomonas mendocina* 9-40 IRR-producing strain on plant stress tolerance. In: *Biologicheski aktivnye preparaty dlya rastenievodstva. Nauchnoe obosnovanie – rekomendatsii – prakticheskie rezul'taty: mat-ly XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Biologically Active Preparations for Crop Production. Scientific Substantiation – Recommendations – Practical Results: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference] (in Russian).
- Zhardetskii S.S., Putinskaya A.Ya., Khrantsova E.A. (2005). Growth-stimulating activity of a mutant strain of *Pseudomonas mendocina* bacteria. *Vestnik BGU. Ser. 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 32–35 (in Russian).
- Zia R., Nawaz M.S., Siddique M.J., Hakim S., Imran A. (2020). Plant survival under drought stress: implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiology Research*, 242, 126626. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126626

Information about the author

Irina I. Rassokhina – Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: rasskhinairina@mail.ru)