

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 579.262

EDN: WZTRIV

DOI: 10.21285/achb.958



**Влияние активности микроорганизмов,
выделенных из ризосферы *Hedysarum zundukii*,
на рост и развитие растений пшеницы**

И.А. Васильев, М.С. Карепова, Ю.А. Маркова[✉], И.С. Петрушин

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время исследования бактерий, стимулирующих рост растений, являются актуальными. Ризобактерии способствуют развитию корневой системы, росту растений, улучшают доступность питательных веществ, защищают от болезней, подавляя рост фитопатогенов. Создание новых биопрепаратов на основе местных штаммов ризобактерий, стимулирующих рост растений, является перспективным направлением в агрономии и представляет теоретический и практический интерес. Местные штаммы обладают более высокой адаптивностью к специфическим условиям окружающей среды по сравнению с зарубежными аналогами. Именно такими свойствами, по нашему мнению, должны обладать микроорганизмы из ризосферы эндемика Приольхонья (Ольхонский район Иркутской области, Россия) копеечника зундукского (*Hedysarum zundukii*), произрастающего в условиях высокой инсоляции и низкого уровня осадков. Цель проведенного исследования заключалась в изучении влияния ризосферных микроорганизмов, выделенных из *Hedysarum zundukii*, на рост и развитие пшеницы в нормальных условиях и в условиях дефицита воды. В результате проведенной работы установлено, что активность микроорганизмов положительно влияет на рост и развитие пшеницы. При этом при засухе положительное воздействие исследуемых микроорганизмов на растения усиливалось. При обработке семян пшеницы штаммом *Bacillus sp. Hz 7* стимулирующее воздействие на рост корней возрастило на 8%. При обработке семян пшеницы штаммом *Streptomyces sp. Hz 21* оно увеличилось с 19 до 31%, использование штамма *Pseudomonas sp. Hz 19* способствовало увеличению корнеобразования на 16%. Полученные результаты подчеркивают потенциал ризосферных микроорганизмов для повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к стрессовым условиям.

Ключевые слова: ризосферные микроорганизмы, индолилуксусная кислота, биопрепарат, засуха, пшеница

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российской научного фонда № 23-26-00204.

Для цитирования: Васильев И.А., Карепова М.С., Маркова Ю.А., Петрушин И.С. Влияние активности микроорганизмов, выделенных из ризосферы *Hedysarum zundukii*, на рост и развитие растений пшеницы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 1. DOI: 10.21285/achb.958. EDN: WZTRIV.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

**Effect of microorganisms isolated
from the rhizosphere of *Hedysarum zundukii*
on wheat growth and development**

Ilya A. Vasilev, Marina S. Karepova, Yuliya A. Markova[✉], Ivan S. Petrushin

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Studies on bacteria stimulating plant growth are currently relevant. Rhizobacteria are known to promote root system development and plant growth, improve nutrient availability, and protect against diseases by inhibiting the growth of phytopathogens. The creation of new biopreparations from local plant-growth-promoting rhizobacteria strains

constitutes a promising direction for agronomy and is of theoretical and practical interest. Local strains exhibit higher adaptability to specific environmental conditions than their foreign counterparts. We believe that such properties should be exhibited by microorganisms from the rhizosphere of *Hedysarum zundukii*, an endemic to the Olkhon region, growing under high insolation and low precipitation conditions (Olkhonsky District, Irkutsk Oblast, Russia). The conducted study was aimed at examining the effect produced by the rhizosphere microorganisms of *Hedysarum zundukii* on wheat growth and development under normal and water deficit conditions. The conducted study revealed that microbial activity has a positive effect on wheat growth and development. Noteworthy is that the positive effect of analyzed microorganisms on plants was enhanced under drought conditions. When wheat seeds were treated with *Bacillus* sp. strain Hz 7, an 8% increase in root growth stimulation was observed. In the case of *Streptomyces* sp. Hz 21, this effect increased from 19 to 31%; the use of *Pseudomonas* sp. strain Hz 19 contributed to a 16% increase in root formation. The obtained results indicate the potential of rhizosphere microorganisms for improving the stress tolerance of crops.

Keywords: rhizosphere microorganisms, indolylic acid, biopreparation, drought, wheat

Funding. The Russian Science Foundation financially supported this work (project no. 23-26-00204).

For citation: Vasilev I.A., Karepova M.S., Markova Yu.A., Petrushin I.S. Effect of microorganisms isolated from the rhizosphere of *Hedysarum zundukii* on wheat growth and development. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.958. EDN: WZTRIV.

ВВЕДЕНИЕ

Растения, будучи частью экосистемы, находятся в тесном и постоянном контакте с микрофлорой, населяющей поверхность их корней и размножающейся в прикорневом слое почвы [1]. Этот слой, известный как ризосфера, представляет собой уникальную экосистему, где происходит активное взаимодействие между растениями и микроорганизмами. Это взаимодействие приводит к изменениям в составе, качестве и количестве корневых выделений растений, которые, в свою очередь, влияют на микробный компонент [2].

Таким образом, растения посредством корневых выделений формируют состав микробного сообщества в ризосфере [3]. Ризосферные микроорганизмы могут положительно влиять на рост растений, а также играть важную роль их в адаптации к условиям обитания, способствуя выживаемости в неблагоприятных условиях, таких как засуха, загрязнение тяжелыми металлами и полициклическими ароматическими углеводородами, а также заражение фитопатогенами [4].

В последнее время активно изучаются ризосферные бактерии, стимулирующие рост растений [5]. Стимулирующее действие микроорганизмов связывают с тремя основными механизмами: продукцией фитогормонов, регулирующих рост растений, повышением доступности питательных веществ [6], защитой растений от болезней [7]. Способность бактерий синтезировать фитогормоны, такие как ауксины, гибереллины и цитокинины, описывается в литературе как одна из форм взаимодействия между микрофлорой и растением-хозяином [8, 9]. Одним из наиболее важных прикладных аспектов способности образования индолилуксусной кислоты штаммами является их перспективное использование в агрономических мероприятиях по инокуляции семян и проростков, а также обработке саженцев растений [10]. Эффективность такого воздействия выражается в стимуляции корнеобразования, ускорении прорастания семян и наращивании биомассы [11, 12]. Кроме того, ауксины, вырабатываемые бактериями, могут снижать вредное воздействие различных абиотических стрессов, что в свою очередь увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур [13].

Ризосферные микроорганизмы обладают способностью к превращению органического фосфора в растворимую форму – минерализации фосфора [14]. Повышают

доступность цинка для растений, растворяя его сложные соединения и тем самым устраняя дефицит цинка в растениях [15]. Также повышают доступность железа – одного из основных микроэлементов, играющих важную роль в регулировании клеточных процессов, необходимых для роста и развития растений [16] (хотя железо является четвертым по распространенности элементом на Земле, его доступность для растений очень низка).

Защитные свойства ризобактерий связаны с синтезом биологически активных соединений различной природы: антибиотиков [17], литических ферментов [18, 19] сидерофоров [18]. В связи с этим определенные перспективы имеет использование ризосферных микроорганизмов в сельском хозяйстве для стимуляции роста растений или защиты их от фитопатогенов.

Цель проведенного исследования заключалась в изучении влияния наиболее перспективных бактерий, входящих в состав ризосферы эндемика Прибайкалья копеечника зундука (Hedysarum zunduki), на рост пшеницы сорта Иреть, выращиваемой в условиях нормального и недостаточного увлажнения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовались штаммы бактерии, которые ранее были выделены из ризосферы *Hedysarum zunduki* Peschkova [20]. Был проведен скрининг штаммов на их способность синтезировать ауксины – одни из самых распространенных в природе фитогормонов. Наибольшую активность в группе ауксинов проявляет индолилуксусная кислота, которая управляет процессами вегетативного роста, цветения и плодоношения растений, а также влияет на фотосинтез, образование пигментов, биосинтез различных метаболитов и устойчивость растений к стрессовым факторам среды. Ауксины определяли на среде 8E [21] с добавлением 2 г/л триптофана. Среду разливали в пробирки по 5 мл, автоклавировали. Затем вносили бактерии и инкубировали в течение 2 суток. Из полученной суспензии отбирали по 1 мл и центрифугировали при 14000 об/мин в течение 10 мин. 500 мкл супернатанта переносили в стерильную пробирку и смешивали с 1 мл реактива Сальковского (FeCl_3 – 1 г, dH_2O – 250 мл, H_2SO_4 (конц.) – 150 мл). Пробирки инкубировали при комнатной температуре в течение 45 мин в темноте. Развитие розовой окраски свидетельствовало о присутствии индолилуксусной кислоты.

Количество синтезируемой индолилуксусной кислоты рассчитывали по калибровочной кривой на основании измерения оптической плотности образцов (планшетный фотометр Bio Rad iMark, Bio Rad Laboratories Inc., США).

Для изучения влияния выделенных штаммов на рост и развитие растений использовали семена яровой пшеницы сорта Иреть. Стерилизованные семена замачивали в суспензии бактерий, содержащей концентрации микроорганизмов от 20×10^3 до 20×10^9 КОЕ/мл. Контролем служили растения, семена которых были замочены в стерильной воде. Затем семена в количестве 35 шт. высевали в контейнеры со стерильным увлажненным песком (60% влагоемкости). Увлажнение почвы проводили путем добавления среды Мурасиге – Скуга перед экспериментом и через каждые 3 дня для создания нормальных условий. Для имитации условий засухи увлажнение проводили однократно только в начале эксперимента. Инкубацию проводили в регулируемой климатической камере Binder KBF 240 (Binder, Германия) (освещение – 16 ч 30 мин, начало дня – 4:50, окончание – 21:20; дневная температура – 27 °C, ночная – 15 °C, влажность воздуха – 40%). На 14-е сутки анализировали всхожесть, длину надземной и подземной части растений. Для анализа статистических данных использовали программу SigmaPlot v. 12.0.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее было показано, что из ризосферы *H. zundukii* было выделено 57 штаммов, из которых 12 могли солюбилизировать фосфаты [20]. В настоящей работе изучали способность штаммов к синтезу индолилуксусной кислоты. Установлено, что данным качеством обладают 19 штаммов: Hz-10, 11, 12, 13, 15, 19, 20-2, 21, 25, 35-2, 35-3, 48, 49, 51, 53, 57, 61, 65, 68-2. Для дальнейшего изучения были выбраны 7 штаммов, обладающих вышеуказанными способностями (табл. 1). Данные штаммы были идентифицированы [20].

Таблица 1. Количество индолилуксусной кислоты, синтезируемое исследуемыми штаммами

Table 1. Amount of indolylacetic acid synthesized by the studied strains

Штамм	Концентрация индолилуксусной кислоты, мг/мл
<i>Mycolicibacterium</i> sp. Hz 35.2	0,065±0,006
<i>Pantoea</i> sp. Hz 68.2	0,071±0,009
<i>Phyllobacterium</i> sp. Hz 48	0,041±0,006
<i>Pseudomonas</i> sp. Hz 19	0,138±0,004
<i>Bacillus</i> sp. Hz 7	Не синтезирует
<i>Streptomyces</i> sp. Hz 21	0,12±0,011
<i>Pseudomonas</i> sp. Hz 11	0,089±0,005

Изучение влияния исследуемых штаммов на рост и развитие растений проводили с использованием растений пшеницы сорта Иреть, выращиваемой в нормальных условиях и в условиях засухи

Штамм *Pseudomonas* sp. Hz 19 в нормальных условиях оказал незначительное влияние на размеры растений (статистически значимой разницы нет (рис. 1, 2)). Вместе с тем отмечено значимое увеличение длины корней в условиях недостатка влаги, которое достигало 16% при концентрации микроорганизмов 20×10^6 КОЕ/мл (рис. 3, 4).

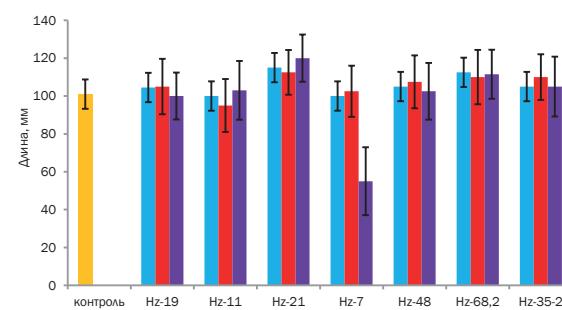


Рис. 1. Длина корней пшеницы, обработанной ризосферными микроорганизмами в различных концентрациях: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 КОЕ/мл, в контролльных условиях ($M \pm \mu$)

Fig. 1. Length of wheat roots treated with rhizospheric microorganisms at various concentrations: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 KOE/ml, under control conditions ($M \pm \mu$)

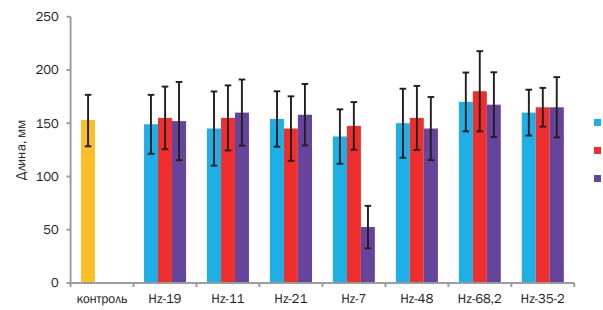


Рис. 2. Длина побегов пшеницы, обработанной ризосферными микроорганизмами в различных концентрациях: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 КОЕ/мл, в контролльных условиях ($M \pm \mu$)

Fig. 2. Length of wheat shoots treated with rhizospheric microorganisms at various concentrations: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 KOE/ml, under control conditions ($M \pm \mu$)

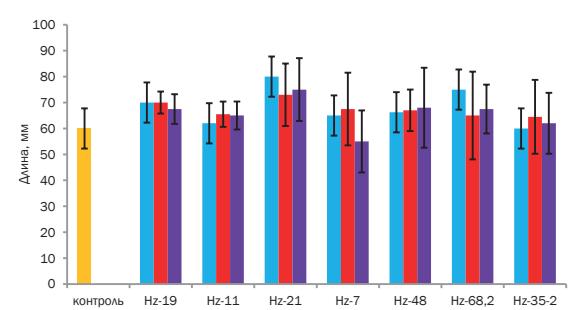


Рис. 3. Длина корней пшеницы, обработанной ризосферными микроорганизмами в различных концентрациях: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 КОЕ/мл, в условиях, имитирующих недостаток воды ($M \pm \mu$)

Fig. 3. Length of wheat roots treated with rhizospheric microorganisms at various concentrations (1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 KOE/ml, under conditions simulating water deficiency ($M \pm \mu$))

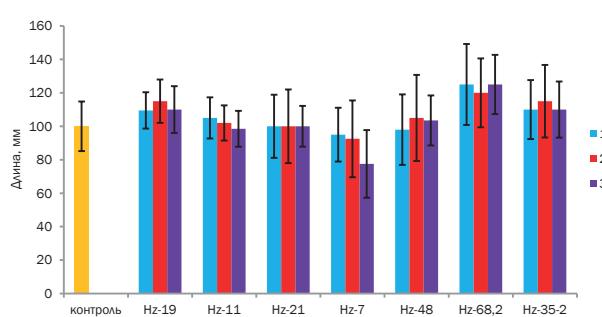


Рис. 4. Длина побегов пшеницы, обработанной ризосферными микроорганизмами в различных концентрациях: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 КОЕ/мл, в условиях, имитирующих недостаток воды ($M \pm \mu$)

Fig. 4. Length of wheat shoots treated with rhizospheric microorganisms at various concentrations: 1 – 20×10^3 ; 2 – 20×10^6 ; 3 – 20×10^9 KOE/ml, under conditions simulating water deficiency ($M \pm \mu$)

Штамм *Pseudomonas* sp. Hz 11 не оказал ярко выраженного влияния на рост пшеницы при нормальных условиях. Положительное воздействие на рост корней в условиях имитации засухи составило от 3 до 8%. На всходы статистически значимого воздействия в условиях дефицита влаги также не было обнаружено.

Штамм *Streptomyces* sp. Hz 21 показал способность к стимуляции роста корней пшеницы как в нормальных условиях (11–19%), так и в условиях, имитирующих засуху (21–32%). Длина надземной части в обоих экспериментах в целом соответствовала значениям контроля, статистически значимой разницы нет.

Штамм *Bacillus* sp. Hz 7 оказался единственным из использованных нами штаммов, не показавшим способности к синтезу индолилуксусной кислоты. В высоких концентрациях (2×10^9 КОЕ/мл) он значительно ингибировал рост как в контрольных условиях (корни – 45%, всходы – 60%), так и в условиях дефицита воды (корни – 8%, всходы – 22,5%). Тем не менее при более низких концентрациях (10^3 – 10^6 КОЕ/мл) негативный эффект на растение отсутствовал, отмечалась даже стимуляция корневой системы (8%).

При замачивании семян пшеницы в суспензии бактерий *Phyllobacterium* sp. штамма Hz 48 наблюдалась

стимуляция корней (8%) в условиях дефицита воды. В остальных экспериментах статистически значимого положительного или негативного эффекта данный штамм не оказывал.

Штамм *Pantoea* sp. Hz 68.2 способствовал выраженной стимуляции роста всех органов растения как в контрольных условиях (всходы – 11%, корни – 16%), так и в условиях засухи (всходы – 12%, корни – 25%) вне зависимости от начальной концентрации микроорганизмов.

Культура штамма *Mycolicibacterium* sp. Hz 35.2 также демонстрировала стимулирующую активность во всех экспериментах. Прирост по длине относительно контроля в нормальных условиях составил 5% для всходов и до 10% для корневой системы. В условиях дефицита влаги положительный эффект составил 13 и 8% для всходов и корней соответственно.

На всхожесть пшеницы использованные микроорганизмы не оказывали значимого эффекта при любых концентрациях. Исключение составил штамм *Bacillus* sp. Hz 7, подавляющий прорастание семян при концентрации 2×10^9 КОЕ/мл (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования микроорганизмов, выделенных из ризосфера эндемика Прибайкалья копеечника зундукского (*Hedysarum zundukii*), было установлено, что все 7 исследованных штаммов не оказывали негативного воздействия на растения. Исключение составил штамм *Bacillus* sp. Hz-7, который проявил ингибирующее действие на всхожесть и рост растений пшеницы лишь при высоких концентрациях (10^9 КОЕ/мл), что маловероятно в условиях внешней среды. Это свидетельствует о том, что в реальных агрономических условиях риск негативного воздействия данного штамма минимален. Исследованные микроорганизмы продемонстрировали различную способность к стимуляции роста растений в зависимости от условий и концентрации, что указывает как на различные механизмы действия, позволяющие им адаптироваться к специфическим условиям окружающей среды, так и на зависимость от физиологических и биохимических характеристик самих бактерий.

Особое внимание следует обратить на тот факт, что в условиях дефицита воды положительное воздействие на растения не только не снижалось, но в ряде случаев даже усиливалось. Так, при инокуляции семян штаммом

Таблица 2. Всхожесть пшеницы в зависимости от условий и степени инокуляции суспензией ризосферных микроорганизмов, %

Table 2. Germination of wheat depending on conditions and degree of inoculation with a suspension of rhizosphere microorganisms, %

Вариант опыта, штамм	Условия роста растений, титр жидкой культуры штамма, КОЕ/мл					
	Достаточное увлажнение (контроль)			Засуха		
	20×10^3	20×10^6	20×10^9	20×10^3	20×10^6	20×10^9
Контроль	100,0±3	90,0±3	100,0±3	93,3±4	100,0±4	86,7±4
Hz 11	90,0±5	83,3±5	96,6±5	90,0±4	86,7±4	96,7±4
Hz 19	86,6±5	90,0±5	83,3±6	96,7±3	100,0±3	90,0±3
Hz 7	96,6±7	86,6±7	43,3±10	93,3±8	83,3±8	73,3±8
Hz 21	100,0±4	96,6±4	93,3±4	86,7±3	93,3±3	93,3±3
Hz 48	93,3±4	96,6±4	86,6±4	90,0±3	96,7±3	96,7±3
Hz 68,2	76,6±5	90,0±5	96,6±5	100,0±3	90,0±3	96,7±3
Hz 35,2	90,0±5	80,0±5	97,0±5	86,7±4	93,3±4	93,3±4

Bacillus sp. Hz 7 корнеобразование возрастало на 8%, штаммом *Streptomyces* sp. Hz 21 – увеличилось с 19 до 31%, при использовании штамма *Pseudomonas* sp. Hz 19 увеличение длины корней достигало 16%. По всей видимости, этот эффект обусловлен спецификой условий произрастания *Hedysarum zundukii*. Следствием этого является набор адаптаций микроорганизмов, присутствующих в его ризосфере, которые, очевидно, развивались и приспособливались вместе с растением на протяжении длительного времени.

Таким образом, выделенные штаммы микроорганизмов *Bacillus* sp. Hz 7, *Pseudomonas* sp. Hz 11, *Pseudomonas* sp. Hz 19, *Streptomyces* sp. Hz 21, *Mycolicibacterium* sp. Hz 35.2, *Pantoea* sp. Hz 68.2 имеют перспективы применения как непосредственно в качестве

биологического удобрения, действующего на растения за счет синтеза индолилуксусной кислоты и мобилизации фосфатов, так и в качестве микробной композиции, способной разнообразить микробное сообщество сельскохозяйственных земель. Это может повысить возможности адаптации растений к условиям засухи.

Результаты данного исследования подчеркивают важность использования ризосферных микроорганизмов для повышения продуктивности сельского хозяйства и устойчивости растений к стрессовым условиям. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке эффективных биопрепаратов на основе местных штаммов бактерий, что будет способствовать более устойчивому и экологически чистому сельскому хозяйству.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1.** Курдыш И.К., Чуйко Н.В., Бега З.Т. Хемотаксисные и адгезивные свойства *Azotobacter vinelandii* и *Bacillus subtilis* // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46. N 1. С. 58–63. EDN: KZMATD.
- 2.** Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., van der Putten W.H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere // Nature Reviews Microbiology. 2013. Vol. 11. P. 789–799. DOI: 10.1038/nrmicro3109.
- 3.** Dessaix Y., Grandclément C., Faure D. Engineering the rhizosphere // Trends in Plant Science. 2016. Vol. 21, no. 3. P. 266–278. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.01.002.
- 4.** Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробиотехнологиях // Агрономия. 2018. N 10. С. 54–66. DOI: 10.1134/S0002188118100034. EDN: YMFRJJ.
- 5.** Петрова С.Н., Андронов Е.Е., Белимов А.А., Береговая Ю.В., Денищиков В.А., Минаков Д.Л. Изменение структуры прокариотного сообщества в ризосфере рапса ярового (*Brassica napus* L.) в зависимости от внесения бактерий, утилизирующих 1-аминоциклогексан-1-карбоксилат // Микробиология. 2020. Т. 89. N 1. С. 121–128. DOI: 10.31857/S0026365620010115. EDN: GHEXEC.
- 6.** Thepbandit W., Athinuwat D. Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense // Microorganisms. 2024. Vol. 12, no. 3. P. 558. DOI: 10.3390/microorganisms12030558.
- 7.** Ха Т.З., Канарский А.В., Канарская З.А., Щербаков А.В., Щербакова Е.Н. Ключевой стимулятор роста растений – ризобактерии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2020. N 3. С. 58–73. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.3.58. EDN: SPHHXP.
- 8.** Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria // Annual Reviews of Microbiology. 2009. Vol. 63. P. 541–556. DOI: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162918.
- 9.** Hakim S., Naqqash T., Nawaz M.S., Laraib I., Sidique M.J., Zia R., et al. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. Vol. 5. P. 617157. DOI: 10.3389/fsufs.2021.617157.
- 10.** Юсупова Д.М., Бареева Б.Ш., Гальперина А.Р., Сопрунова О.Б. Изучение способности ризосферных микроорганизмов к продукции ИУК и влиянию на рост растений // Инновации и продовольственная безопасность. 2023. N 3. С. 83–90. DOI: 10.31677/2311-0651-2023-41-3-83-90. EDN: KLDYQD.
- 11.** Ali S., Hameed S., Imran A., Iqbal M., Lazarovits G. Genetic, physiological and biochemical characterization of *Bacillus* sp. strain RMB7 exhibiting plant growth promoting and broad spectrum antifungal activities // Microbial Cell Factories. 2014. Vol. 13. P. 144. DOI: 10.1186/preaccept-6657919731258908.
- 12.** Imran A., Mirza M.S., Shah T.M., Malik K.A., Hafeez F.Y. Differential response of kabuli and desi chickpea genotypes toward inoculation with PGPR in different soils // Frontiers in Microbiology. 2015. Vol. 6. P. 859. DOI: 10.3389/fmicb.2015.00859.
- 13.** Kudoyarova G., Arkhipova T.N., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O., Dodd I.C. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. P. 1368. DOI: 10.3389/fpls.2019.01368.
- 14.** Suleman M., Yasmin S., Rasul M., Yahya M., Atta B.M., Mirza M.S. Phosphate solubilizing bacteria with glucose dehydrogenase gene for phosphorus uptake and beneficial effects on wheat // PLoS One. 2018. Vol. 13, no. 9. P. e0204408. DOI: 10.1371/journal.pone.0204408.
- 15.** Kumar A., Dewangan S., Lawate P., Bahadur I., Prajapati S. Zinc-solubilizing bacteria: a boon for sustainable agriculture // Plant growth promoting rhizobacteria for sustainable stress management. Microorganisms for sustainability / eds R. Sayyed, N. Arora, M. Reddy. Singapore: Springer, 2019. Vol. 12. P. 139–155. DOI: 10.1007/978-981-13-6536-2_8.
- 16.** İpek M., Aras S., Arıkan Ş., Eşitken A., Pırlak L., Dönmez M.F., et al. Root plant growth promoting rhizobacteria inoculations increase ferric chelate reductase (FC-R) activity and Fe nutrition in pear under calcareous soil conditions // Scientia Horticulturae. 2017. Vol. 219. P. 144–151. DOI: 10.1016/j.scientia.2017.02.043.
- 17.** Carmona-Hernandez S., Reyes-Pérez J.J., Chiquito-Contreras R.G., Rincon-Enriquez G., Cerdan-Cabrera C.R., Hernandez-Montiel L.G. Biocontrol of postharvest fruit fungal diseases by bacterial antagonists: a review // Agronomy. 2019. Vol. 9, no. 3. P. 121. DOI: 10.3390/agronomy9030121.
- 18.** Xie J., Shi H., Du Z., Wang T., Liu X., Chen S. Comparative genomic and functional analysis reveal conservation of plant growth promoting traits in *Paenibacillus polymyxa* and its closely related species // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 21329. DOI: 10.1038/srep21329.

- 19.** Chen M., Wang J., Liu B., Zhu Y., Xiao R., Yang W., et al. Biocontrol of tomato bacterial wilt by the new strain *Bacillus velezensis* FJAT-46737 and its lipopeptides // *BMC Microbiology*. 2020. Vol. 20. P. 160. DOI: 10.1186/s12866-020-01851-2.
- 20.** Васильев И.А., Кривенко Д.А., Петрушин И.С., Кондратов И.Г., Огарков О.Б., Маркова Ю.А. Микроорганизмы, населяющие эндо и ризосферу эндемичного растения Прибайкалья *Hedysarum zundukii* (Fabaceae) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. № 4. С. 545–551. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-545-551. EDN: EMVBJK.
- 21.** Чугунов В.А., Ермоленко З.М., Жиглецова С.К., Мартовецкая И.И., Миронова Р.И., Жиркова Н.А. [и др.]. Создание и применение жидкого препарата на основе ассоциации нефтеокисляющих бактерий // Прикладная биохимия и микробиология. 2000. Т. 36. № 6. С. 666–671. EDN: MPGXB.

REFERENCES

- 1.** Kurdish I.K., Chuiko N.V., Bega Z.T. Chemotactic and adhesive properties of *Azotobacter vinelandii* and *Bacillus subtilis*. *Prikladnaya biohimiya i mikrobiologiya*. 2010;46(1):58-63. (In Russian). EDN: KZMATD.
- 2.** Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., van der Putten W.H. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*. 2013;(11):789-799. DOI: 10.1038/nrmicro3109.
- 3.** Dessaix Y., Grandclement C., Faure D. Engineering the rhizosphere. *Trends in Plant Science*. 2016;21(3):266-278. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.01.002.
- 4.** Anokhina T.O., Siunova T.V., Sizova O.I., Zakharchenko N.S., Kochetkova V.V. Rhizospheric bacteria of the genus *Pseudomonas* in modern agrobiotechnology. *Agrohimiya*. 2018;10:54-66. (In Russian). DOI: 10.1134/S0002188118100034. EDN: YMFRJJ.
- 5.** Petrova S.N., Beregovaya Y.V., Denshchikov V.A., Minakov D.L., Andronov E.E., Belimov A.A. Prokaryotic community structure in the rapeseed (*Brassica napus* L.) rhizosphere depending on addition of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate-utilizing bacteria. *Microbiologiya*. 2020;89(1):121-128. (In Russian). DOI: 10.31857/S0026365620010115. EDN: GHEXEC.
- 6.** Thepbandit W., Athinuwat D. Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense. *Microorganisms*. 2024;12(3):558. DOI: 10.3390/microorganisms12030558.
- 7.** Kha T.Z., Kanarskii A.V., Kanarskaia Z.A., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N. The key plant growth stimulator – rhizobacteria. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"*. 2020;3:58-73. (In Russian). DOI: 10.25686/2306-2827.2020.3.58. EDN: SPHHXP.
- 8.** Lugtenberg B., Kamiłka F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Reviews of Microbiology*. 2009. Vol. 63. P. 541–556. DOI: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162918.
- 9.** Hakim S., Naqqash T., Nawaz M.S., Laraib I., Sidique M.J., Zia R., et al. Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:617157. DOI: 10.3389/fsufs.2021.617157.
- 10.** Yusupova D.M., Bareeva B.Sh., Galperina A.R., Sopranova O.B. Study of the ability of rhizosphere microorganisms to produce IAA and their influence on plant growth. *Innovations and Food Safety*. 2023;3:83-90. (In Russian). DOI: 10.31677/2311-0651-2023-41-3-83-90. EDN: KLDYQD.
- 11.** Ali S., Hameed S., Imran A., Iqbal M., Lazarovits G. Genetic, physiological and biochemical characterization of *Bacillus* sp. strain RMB7 exhibiting plant growth promoting and broad spectrum antifungal activities. *Microbial Cell Factories*. 2014;13:144. DOI: 10.1186/preaccept-6657919731258908.
- 12.** Imran A., Mirza M.S., Shah T.M., Malik K.A., Hafeez F.Y. Differential response of kabuli and desi chickpea genotypes toward inoculation with PGPR in different soils. *Frontiers in Microbiology*. 2015;6:859. DOI: 10.3389/fmicb.2015.00859.
- 13.** Kudoyarova G., Arkhipova T.N., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O., Dodd I.C. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1368. DOI: 10.3389/fpls.2019.01368.
- 14.** Suleman M., Yasmin S., Rasul M., Yahya M., Atta B.M., Mirza M.S. Phosphate solubilizing bacteria with glucose dehydrogenase gene for phosphorus uptake and beneficial effects on wheat. *PloS One*. 2018;13(9):e0204408. DOI: 10.1371/journal.pone.0204408.
- 15.** Kumar A., Dewangan S., Lawate P., Bahadur I., Prajapati S. Zinc-solubilizing bacteria: a boon for sustainable agriculture. In: Sayyed R., Arora N., Reddy M. (eds). *Plant growth promoting rhizobacteria for sustainable stress management. Microorganisms for sustainability*. Singapore: Springer; 2019, vol. 12, p. 139-155. DOI: 10.1007/978-981-13-6536-2_8.
- 16.** İpek M., Aras S., Arıkan Ş., Eşitken A., Pırlak L., Dönmez M.F., et al. Root plant growth promoting rhizobacteria inoculations increase ferric chelate reductase (FC-R) activity and Fe nutrition in pear under calcareous soil conditions. *Scientia Horticulturae*. 2017;219:144-151. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.02.043.
- 17.** Carmona-Hernandez S., Reyes-Pérez J.J., Chiquito-Contreras R.G., Rincon-Enriquez G., Cerdan-Cabrera C.R., Hernandez-Montiel L.G. Biocontrol of postharvest fruit fungal diseases by bacterial antagonists: a review. *Agronomy*. 2019;9(3):121. DOI: 10.3390/agronomy9030121.
- 18.** Xie J., Shi H., Du Z., Wang T., Liu X., Chen S. Comparative genomic and functional analysis reveal conservation of plant growth promoting traits in *Paenibacillus polymyxa* and its closely related species. *Scientific Reports*. 2016;6:21329. DOI: 10.1038/srep21329.
- 19.** Chen M., Wang J., Liu B., Zhu Y., Xiao R., Yang W., et al. Biocontrol of tomato bacterial wilt by the new strain *Bacillus velezensis* FJAT-46737 and its lipopeptides. *BMC Microbiology*. 2020;20:160. DOI: 10.1186/s12866-020-01851-2.
- 20.** Vasilev I.A., Krivenko D.A., Petrushin I.S., Kondratov I.G., Ogarkov O.B., Markova Yu.A. Microorganisms inhabiting the endo- and rhizosphere of *Hedysarum zundukii* (Fabaceae) endemic to the Baikal region. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):545-551. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-545-551. EDN: EMVBJK.
- 21.** Chugunov V.A., Ermolenko Z.M., Zhigletsova S.K., Martovetskaya I.I., Mironova R.I., Zhirkova N.A., et al. Development and application of a liquid preparation with oil-oxidizing bacteria. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2000;36(6):666-671. (In Russian). EDN: MPGXB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильев Илья Александрович,
аспирант, ведущий инженер,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
ilvasil85@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3793-4493>

Карепова Марина Сергеевна,
к.б.н., научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
marina-tretjakova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1222-3589>

Маркова Юлия Александровна,
д.б.н., главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
✉ juliam06@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-4204>

Петрушин Иван Сергеевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
ivan.kiel@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8788-5352>

Вклад авторов

И.А. Васильев – проведение исследования, написание черновика рукописи.
М.С. Карепова – написание рукописи – рецензирование и редактирование.
Ю.А. Маркова – курирование данных, научное руководство.
И.С. Петрушин – курирование данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.11.2024.
Одобрена после рецензирования 19.01.2025.
Принята к публикации 28.02.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya A. Vasilev,
Postgraduate Student, Lead Engineer,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
ilvasil85@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3793-4493>

Marina S. Karepova,
Cand. Sci. (Biology), Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
marina-tretjakova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1222-3589>

Yuliya A. Markova,
Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher,
Head of the Laboratory,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
✉ juliam06@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-4204>

Ivan S. Petrushin,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
ivan.kiel@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8788-5352>

Contribution of the authors

Ilya A. Vasilev – investigation, writing – original draft.
Marina S. Karepova – writing – review & editing.
Yuliya A. Markova – data curation, supervision.
Ivan S. Petrushin – data curation.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.11.2024.
Approved after reviewing 19.01.2025.
Accepted for publication 28.02.2025.