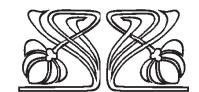
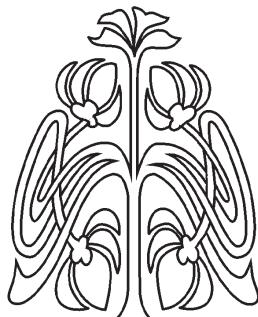
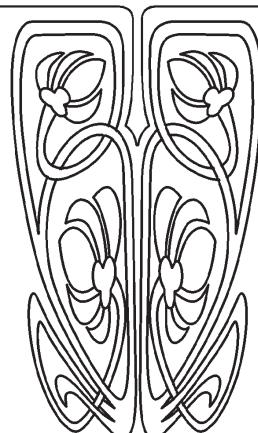


БИОЛОГИЯ



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология.

2025. Т. 25, вып. 2. С. 184–194

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 184–194

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-184-194>

EDN: NBNQIP

Научная статья

УДК [632.9:579.852.11]+579.64

Оценка способности бактерий *Bacillus velezensis* к продукции циклических липопептидов и характеристика их ростстимулирующих и биоремедиационных свойств

Д. Л. Басалаева¹, К. А. Роденко², М. И. Никельшпарг²,
С. С. Евстигнеева^{3,4}, Д. М. Голубев², Е. В. Глинская²✉

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

³Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Россия, 410049, г. Саратов, просп. Энтузиастов, д. 13

⁴Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

Басалаева Дарья Леонидовна, аспирант биологического факультета, dbasalaewa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7228-6552>

Роденко Ксения Андреевна, студент биологического факультета, ksenia-rodenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7428-6506>

Никельшпарг Матвей Ильич, студент биологического факультета, matveynikel@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7197-7175>

Евстигнеева Стелла Сергеевна, кандидат биологических наук, ³научный сотрудник лаборатории биохимии, ⁴доцент кафедры биохимии и клинической лабораторной диагностики, stels20295@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6789-7324>

Голубев Дмитрий Михайлович, студент биологического факультета, dimagolubev2018@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Глинская Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, elenavg-2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

Аннотация. В последние годы сельское хозяйство столкнулось с проблемой поиска перспективных препаратов, эффективных в борьбе с болезнями растений, альтернативных синтетическим пестицидам, которые могут оказывать негативное воздействие как на живые организмы, так и на окружающую среду в целом. Для решения этой проблемы изучается возможность использования биологических методов защиты сельскохозяйственных культур. В частности, особое внимание уделяется поиску новых штаммов бактерий – естественных антагонистов патогенных микроорганизмов, которые можно было бы использовать вместо синтетических химикатов. Целью настоящего исследования являлась



оценка способности бактерий *Bacillus velezensis* HR13 к продукции вторичных метаболитов, обладающих антагонистическими и ростстимулирующими свойствами. Проведена характеристика циклических липопептидов, выявленных в культуральной жидкости бактерий, методом времепролетной масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI-ToF MS). Показано положительное влияние бактерий *B. velezensis* HR13 на морфометрические показатели проростков растений при инокуляции исследуемым штаммом в концентрации 10^6 – 10^7 м. к./мл. Определена способность бактерий *B. velezensis* HR13 к использованию в качестве единственного источника углерода представителей таких групп действующих веществ синтетических фунгицидов, как триазолы и фенилпирролы в различных концентрациях.

Ключевые слова: *Bacillus velezensis*, вторичные метаболиты, циклические липопептиды, ростстимуляция растений

Для цитирования: Басалаева Д. Л., Роденко К. А., Никельшпарг М. И., Евстигнеева С. С., Голубев Д. М., Глинская Е. В. Оценка способности бактерий *Bacillus velezensis* к продукции циклических липопептидов и характеристика их ростстимулирующих и биоремедиационных свойств // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 184–194. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-184-194>, EDN: NBNQIP

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Assessment of the ability of *Bacillus velezensis* bacteria to produce cyclic lipopeptides and characteristics of their growth-stimulating and bioremediation properties

D. L. Basalaeva¹, K. A. Rodenko², M. I. Nikelshparg², S. S. Evstigneeva^{3,4}, D. M. Golubev², E. V. Glinskaya²✉

¹Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

³Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia

⁴Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachiya St., Saratov 410012, Russia

Daria L. Basalaeva, dbasalaewa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7228-6552>

Ksenia A. Rodenko, ksenia-rodenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7428-6506>

Matvey I. Nikelshparg, matveynikel@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7197-7175>

Stella S. Evstigneeva, stels20295@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6789-7324>

Dmitrii M. Golubev, dimagolubev2018@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Elena V. Glinskaya, elenavg-2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

Abstract. In recent years, agriculture has faced the problem of finding promising drugs that are effective in combating plant diseases, alternatives to synthetic pesticides that can have a negative impact on both living organisms and the environment as a whole. To solve this problem, the possibility of using biological methods of protecting agricultural crops is being studied. In particular, special attention is paid to the search for new strains of bacteria – natural antagonists of pathogenic microorganisms that could be used instead of synthetic chemicals. The aim of this study was to assess the ability of *Bacillus velezensis* HR13 bacteria to produce secondary metabolites with antagonistic and growth-stimulating properties. The cyclic lipopeptides identified in the bacterial culture fluid were characterized using matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-ToF MS). The positive effect of *B. velezensis* HR13 bacteria on the morphometric parameters of plant seedlings was shown when inoculated with the studied strain at a concentration of 10^6 – 10^7 m.c./ml. The ability of *B. velezensis* HR13 bacteria to use representatives of such groups of active substances of synthetic fungicides as triazoles and phenylpyrroles in various concentrations as the sole carbon source was determined.

Keywords: *Bacillus velezensis*, antagonistic activity, cyclic lipopeptides, plant growth stimulation

For citation: Basalaeva D. L., Rodenko K. A., Nikelshparg M. I., Evstigneeva S. S., Golubev D. M., Glinskaya E. V. Assessment of the ability of *Bacillus velezensis* bacteria to produce cyclic lipopeptides and characteristics of their growth-stimulating and bioremediation properties. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 184–194 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-184-194>, EDN: NBNQIP

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Поиск бактерий, которые способны к продукции antimикробных веществ, стимуляции роста и развития растений, биоремедиации окружающей среды от различного рода ксе-

нобиотиков, является одним из перспективных направлений фармакологии и сельского хозяйства. Наиболее многообещающими в этом плане выступают новые штаммы бактерий рода *Bacillus*, производящие широкий спектр биологически активных веществ и

проявляющие антагонистические свойства в отношении патогенных бактерий и грибов, а также стимулирующие ростовые процессы в растениях и осуществляющие деградацию поллютантов. Представители бактерий рода *Bacillus* являются удобными объектами исследований, поскольку широко распространены в природе, легко культивируются на различных питательных субстратах, устойчивы к неблагоприятным условиям среды, в том числе благодаря спорообразованию, и характеризуются разнообразными метаболическими путями [1, 2].

В связи с повсеместным использованием синтетических пестицидов и риском накопления их остатков в почве и обработанных пищевых продуктах, исследователи заинтересованы в поиске и характеристике вторичных метаболитов бактерий рода *Bacillus*, антагонистически активных в отношении различных возбудителей болезней растений.

Bacillus velezensis (Ruiz-Garcia, 2005) – вид, который впервые был получен из реки Велез (Малага, Испания) [3]. Изолированные представители вида являются непатогенными для человека и животных и способны вступать во взаимовыгодные отношения с растениями. *B. velezensis* продуцирует липопептиды, фунгицидные антибиотики и аминогликозиды, которые находят применение в различных отраслях агропромышленности и медицины [4]. Также представители этого вида известны своими богатыми ферментными системами, которые позволяют микроорганизмам использовать в качестве источников углерода большое количество различных соединений – от простых сахаров до углеводородов нефти и различных пестицидов [5].

Основную фракцию antimикробных соединений бактерий *B. velezensis* составляют циклические липопептиды – нерибосомально синтезируемые пептиды, являющиеся мембранотропными веществами и обладающими амфильтальными свойствами. Основными представителями циклических липопептидов являются сурфактины, фенгицины и итурины. Бактерии *B. velezensis* также относятся к группе PGPR и обладают способностью стимулировать прорастание семян растений [6, 7].

Ранее нами было показано, что бактерии *Bacillus velezensis* HR13 проявляют антаго-

нистическую активность в отношении ряда тест-культур грамположительных бактерий и фитопатогенных грибов [8].

Целью настоящего исследования являлась оценка способности бактерий *Bacillus velezensis* HR13 к продукции вторичных метаболитов, обладающих антагонистическими и ростстимулирующими свойствами.

Материал и методы

Исследования проводились в 2019–2022 гг. на кафедре микробиологии и физиологии растений Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского, в лаборатории биохимии Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», а также на базе отдела диагностики инфекционных болезней ФКУЗ РосНИПЧИ «Микроб» Роспотребнадзора.

Объектом исследований являлся штамм *Bacillus velezensis* HR13, выделенный с поверхности листьев ястребинки могучей *Hieracium robustum* Fr. s. L., 1848 (рис. 1).

Получение веществ липопептидной природы из культуральной жидкости штамма *B. velezensis* HR13 осуществляли метанольной экстракцией в соответствии с методикой, описанной в работе [8].

Для получения циклических липопептидов бактерии культивировали в жидкой питательной среде Ленди (рН 7,0–7,4) следующего состава, г/л: глюкоза – 30,0; глутаминовая кислота – 5,0; $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 0,5; KCl – 0,5; KH_2PO_4 – 1,0; $MnSO_4$ – 0,005; дрожжевой экстракт – 1,0; $CuSO_4 \times 5H_2O$ – 0,00016, $FeSO_4 \times 7H_2O$ – 0,00015 на протяжении 48 ч при температуре 30 °C, после чего подвергали центрифугированию при 4400 об/мин в течение 30 мин.

К культуральной жидкости добавляли 10% HCl до значений рН 2,0, помещали в ходильник на ночь и затем центрифугировали (4400 об/мин, 30 мин). К сформированным осадкам добавляли метанол, встраивали до полной гомогенизации и выдерживали при комнатной температуре на протяжении 1,5 ч. Полученный раствор центрифугировали (4400 об/мин, 30 мин) и отбирали метанольный экстракт. Подобную процедуру обработки



Рис. 1. Микрофотография бактерий: *а* – *B. velezensis* HR13 (окраска по Граму, $\times 1500$); *б* – колония *B. velezensis* HR13 на среде LB ($\times 10$) (цвет онлайн)

Fig. 1. Micrography of *B. velezensis*: *a* – bacteria HR13 (Gram stain, $\times 1500$); *b* – *B. velezensis* HR13 colony on a LB medium ($\times 10$) (color online)

культуральной жидкости повторяли трижды. Объединенные метанольные экстракты концентрировали на ротационном испарителе. В качестве контроля была использована чистая среда Ленди без бактерий, из которой путем вышеуказанных операций также были извлечены метанольные экстракты.

Полученные экстракты анализировали методами ТСХ, ИК-спектроскопии [7] и методом времяпролетной масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией/ионизацией (MALDI-ToF MS). В лунку MSP-чипа вносили 1 мкл полученного метанольного экстракта. Сразу после высыхания нанесенной на чип капли экстракта сверху наносили 1 мкл матрицы. В лунку H12 MSP-чипа вносили 1 мкл калибровочного стандарта для масс-спектрометрии, на который также после высыхания наносили 1 мкл матрицы. После полного высыхания раствора матрицы проводили масс-спектрометрические исследования. В качестве матрицы брали α -циано-4-гидроксикоричную кислоту. Для получения одиночного масс-спектра использовали 40 импульсов лазера (частота 60 Гц), анализируемый диапазон масса/заряд составлял 2000–20000 Да. С каждой ячейки чипа снимали исходный спектр, представляющий собой сумму шести одиночных спектров (240 импульсов лазера).

Определение влияния исследуемого штамма на морфометрические показатели проростков растений проводили в соответствии со стандартной методикой [8]. В качестве тестового объекта использовали семена растения редьки посевной (*Raphanus sativus* L., 1753) сорта Розово-красный с белым кончиком и семена твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf., 1798) сорта Николаша.

Для установления деструкционного потенциала исследуемого штамма были проведены опыты по использованию различных соединений синтетических пестицидов в качестве единственного источника углерода.

Бактерии культивировали на минимальной среде М9 (состав, г/л: Na_2HPO_4 – 6,0; KH_2PO_4 – 3,0; NaCl – 0,5; NH_4Cl – 1,0, агар 20,0) с внесением разведений препаратов синтетических фунгицидов в количестве 1 мл на 20 мл среды. В качестве рабочих концентраций выбранные фунгициды разводили по инструкции производителей и затем делали серийные разведения для определения минимальной концентрации, которую способен использовать исследуемый штамм (таблица). Исследуемый штамм засевали бактериологической петлей штрихом по всей поверхности среды на чашке Петри и инкубировали при 28°C в течение 24–36 ч. Результаты оценивали по наличию роста культуры исследуемого штамма *B. velezensis* HR13 на среде, содержащей фунгицид.



Рабочие концентрации исследуемых препаратов синтетических фунгицидов
Table. Working concentrations of the studied synthetic fungicide preparations

Фунгицид / Fungicide	Действующее вещество / Active substance	Рабочие концентрации / Working concentrations		
«Максим» / “Maksim”	Флудиоксонил / Fludioxonil	0,2 мл/мл / ml/ml	0,02 мл/мл/ ml/ml	0,002 мл/мл/ ml/ml
«Топаз» / “Topaz”	Пенконазол / Penconazole	0,2 мл/мл/ ml/ml	0,02 мл/мл/ ml/ml	0,002 мл/мл/ ml/ml
«Хорус» / “Horus”	Ципродинил / Ciprodinil	0,033 г/мл/ g/ml	0,0033 г/мл/ g/ml	0,00033 г/мл/ g/ml
«Ширма» / “Shirma”	Флуазинам / Fluazimes	0,4 мл/мл/ ml/ml	0,04 мл/мл/ ml/ml	0,004 мл/мл/ ml/ml
«Ревус» / “Revus”	Мандипропамид / Mandipropamide	0,1 мл/мл/ ml/ml	0,01 мл/мл/ ml/ml	0,001 мл/мл/ ml/ml
«Раёк» / “Rayok”	Дифеноконазол / Difenoconazole	0,08 мл/мл/ ml/ml	0,008 мл/мл/ ml/ml	0,0008 мл/мл/ ml/ml
«Пропи Плюс» / “Propi plus”	Пропиконазол / Propiconazole	0,1 мл/мл/ ml/ml	0,01 мл/мл/ ml/ml	0,001 мл/мл/ ml/ml
«Медея» / “Medeya”	Флутриафол + дифеноконазол / Flutriafol+ difenoconazole	0,9 мл/мл/ ml/ml	0,09 мл/мл/ ml/ml	0,009 мл/мл/ ml/ml
«Ордан» / “Ordan”	Цимоксанил / Cimoxanil	0,5 г/мл/ g/ml	0,05 г/мл/ g/ml	0,005 г/мл/ g/ml

Эксперименты проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Результаты экспериментов подвергали статистической обработке. Данные представлены в виде средних значений, доверительные интервалы определяли для 95%-го уровня значимости.

Результаты и их обсуждение

Поскольку для ранее изученных штаммов бактерий *B. velezensis* была продемонстрирована продукция сурфактинов, нами был выполнен поиск веществ липопептидной природы в культуральной жидкости штамма *B. velezensis* HR13.

Масс-спектрометрический анализ образца липопептидов, выделенных из культуральной жидкости бактерий *B. velezensis* HR13, продемонстрировал наличие мажорных пиков в диапазоне 600–1100 m/z (отношение массы к суммарному заряду). Сравнение полученных результатов с литературными данными показало, что ионы в диапазоне от 600 до 1000 m/z могут быть отнесены к изоформам курстакина [9–11].

Так, молекулярные ионы при 893,2 и 960,6 m/z были предварительно соотнесены

с изоформами курстакина C9 $[M + 2Na]^{+}$ и C11 $[M + K + 2Na]^{+}$ соответственно. Также были обнаружены три типа ионов как $[M + H]^{+}$ при m/z 865,5, 879,5 и 893,5, различающиеся на 14 Да, что соответствовало изоформам курстакина C10, C11 и C12. Группа пиков от 1000 до 1200 m/z может указывать на наличие в образце изоформ сурфактина [12, 13]. В частности, ионы с m/z 1067,9 и 1082,5 были отнесены к ионам $[M + 2Na]^{+}$ C14/C15 и C15 изоформ сурфактина соответственно (рис. 2).

Группа пиков в диапазоне масс 1400–1600 m/z относится к изоформам фенгицина. Так, ионы m/z 1471,8, 1485,8 и 1499,8 предположительно были определены как ионы $[M + Na]^{+}$ C15, C16 и C17 фенгицина A. Молекулярный ион при m/z 1551,4 может быть связан с $[M + K]^{+}$ C16 гомологом фенгицина B [9, 12, 13].

Инокуляция семян редьки посевной клетками бактерий *B. velezensis* HR13 в концентрациях от 10^5 до 10^9 м.к./мл положительно влияла на развитие корневой системы тестового растения. Обработка семян редьки посевной исследуемым штаммом в концентрациях 10^6 – 10^7 м.к./мл

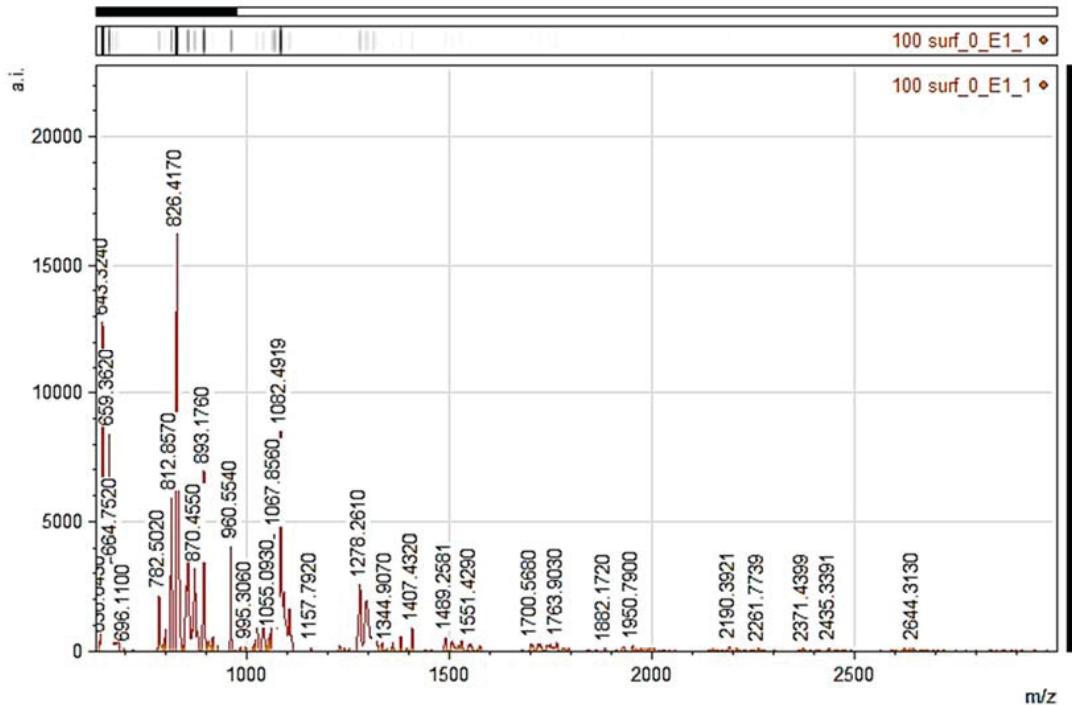


Рис. 2. Масс-спектрометрический анализ образца липопептидов, полученных из культуральной жидкости бактерий *B. velezensis* HR13

Fig. 2. Mass spectrometric analysis of a sample of lipopeptides obtained from the culture liquid of *B. velezensis* HR13 bacteria

стимулировала развитие стебля. Наибольший эффект оказывали бактерии в концентрации 10^6 м.к./мл. Длина стебля редьки посевной, обработанной супензией бактерий в этой концентрации, была больше необработанных в 1,5 раза, корней – в 3 раза.

Обработка семян растений твердой пшеницы супензией бактерий *B. velezensis* HR13 в концентрациях от 10^6 до 10^9 м.к./мл также оказывала положительный эффект на развитие корневой системы тестового растения. Обработка семян исследуемой культурой в концентрациях 10^6 – 10^7 м.к./мл стимулировала развитие стебля. Максимальный эффект наблюдался при концентрации 10^7 м.к./мл, длина стебля твердой пшеницы в эксперименте превышала контрольные значения в 1,5 раза, корней – в 1,3 раза (рис. 3).

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о положительном влиянии бактерий *B. velezensis* HR13 на ростовые показатели семян растений редьки посевной и твердой пшеницы. Исследуемые растения являются значимыми для сельского хозяйства, и стимуляция их ростовых параметров может оказывать положительный эффект на урожайность.

Для изучения деструкционного потенциала бактерий *B. velezensis* HR13 были использованы 9 препаратов синтетических фунгицидов с различными действующими веществами. Оценку способности к деградации фунгицидов проводили визуально по наличию или отсутствию роста исследуемого штамма на питательной среде М9 с добавлением препаратов синтетических пестицидов в различных концентрациях (рис. 4).

Штамм *B. velezensis* HR13 использовал в качестве источника углерода такие группы действующих веществ синтетических фунгицидов, как триазолы, фенилпирролы и прочие вещества в различных концентрациях.

Действующее вещество препарата «Ордан» (цимоксанил) исследуемый штамм использовал только в концентрации 0,005 г/мл.

Поскольку исследуемый штамм *B. velezensis* HR13 показал способность к использованию в качестве единственного источника углерода препараты синтетических фунгицидов, целесообразно использовать данный штамм при проведении биоремедиационных мероприятий различных объектов окружающей среды, в первую очередь почвы.

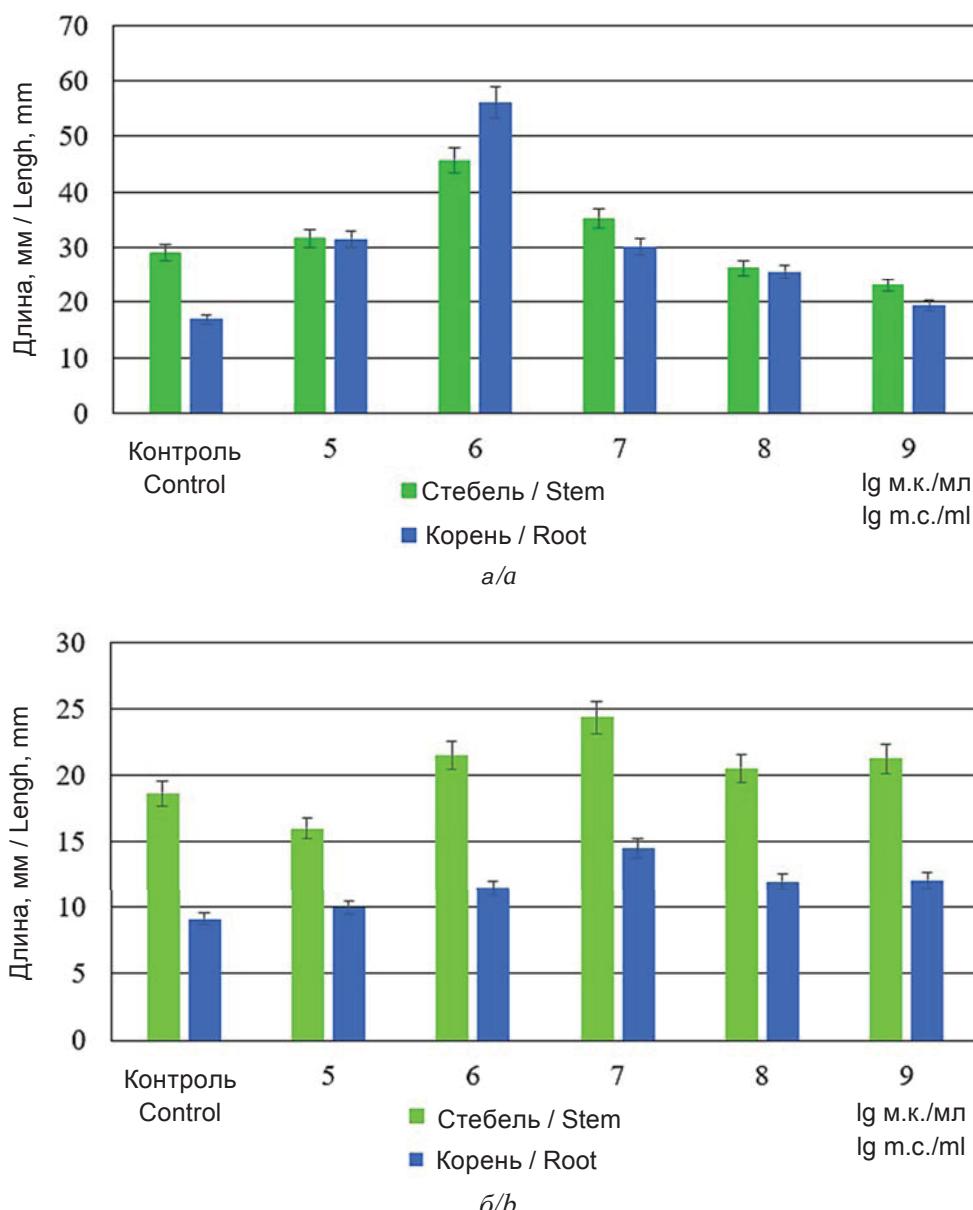


Рис. 3. Влияние бактерий *B. velezensis* HR13 на морфометрические показатели проростков *Raphanus sativus* (а) и *Triticum durum* (б) ($M \pm m$, $p < 0,05$) (цвет онлайн)

Fig. 3. The effect of *B. velezensis* HR13 bacteria on the morphometric parameters of seedlings of *Raphanus sativus* (a) and *Triticum durum* (b) ($M \pm m$, $p < 0,05$) (color online)

В ходе экстракции и характеристики препарата циклического липопептида из культуральной жидкости исследуемого штамма *B. velezensis* HR13 и сравнения с литературными данными было выяснено, что данный препарат содержит в себе 4 изоформы липопептида курстакина (C9 – C12), разнообразные фракции сурфактина (C13 – C16), фенгицина А (C15 – C17) и, вероятно, гомолог фенгицина В. Обнаруженные представители группы циклических липопептидов выделяются различными видами

бактерий рода *Bacillus* и известны своими разнообразными антимикробными свойствами.

В настоящее время ведутся активные исследования бактерий рода *Bacillus*, которые относятся к группе стимулирующих рост и развитие растений ризобактерий (PGPR) и являются продуцентами широкого спектра поверхностно-активных веществ с антимикробными и противогрибковыми свойствами. Вид *B. velezensis* был выделен сравнительно недавно и, по имеющимся данным,

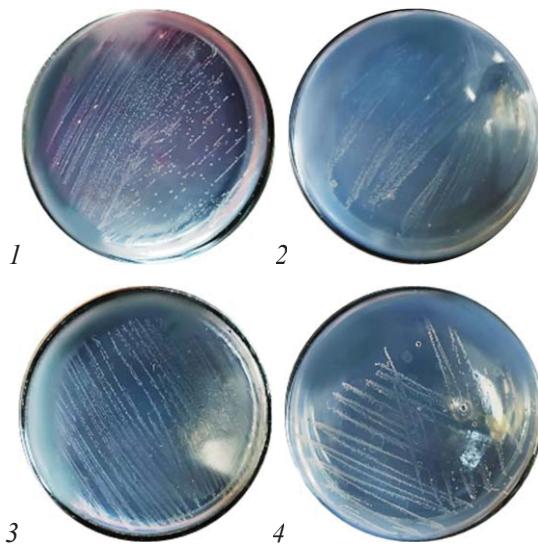


Рис. 4. Наличие роста исследуемого штамма *B. velezensis* HR13 на среде M9 с различными синтетическими фунгицидами, мл/мл: 1 – «Максим» 0,02; 2 – «Раек» 0,008; 3 – «Топаз» 0,002; 4 – «Топаз» 0,0002 (цвет онлайн)

Fig. 4. The presence of growth of the studied strain *B. velezensis* HR13 on M9 medium with various synthetic fungicides, ml/ml: 1 – “Maxim” 0.02; 2 – “Raek” 0.008; 3 – “Topaz” 0.002; 4 – “Topaz” 0.0002 (color online)

может быть перспективным для различных отраслей сельского хозяйства и биотехнологии.

Заключение

Исследования показали, что штамм *B. velezensis* HR13 обладает перспективами для потенциального применения в различных отраслях промышленности, включая сельское хозяйство и охрану окружающей среды. Этот штамм бактерий продуцирует несколько заслуживающих внимания соединений, включая липопептиды, которые обладают различными полезными свойствами. Кроме того, бактерии *B. velezensis* обладают способностью разлагать синтетические пестициды, загрязняющие почву и воду, что делает их полезным агентом для восстановления загрязненных территорий.

Констатируя полученные нами данные, можно сделать вывод о положительном влиянии бактерий *B. velezensis* HR13 на ростовые показатели семян редьки посевной и твердой пшеницы. Исследуемые растения являются важными возделываемыми культурами, и

стимуляция их ростовых параметров может значительно повышать урожайность. Анализ литературных данных показал, что бактерии вида *B. velezensis* способны стимулировать рост и развитие кипарисовика туполистного (*Chamaecyparis obtusa* Endl., 1847) и яблони хубейской (*Malus hupehensis* Rehd., 1934), а другие виды рода *Bacillus* проявляют сходный эффект в отношении различных растений, среди которых разные сорта риса, пшеницы, перец стручковый, томат и другие сельскохозяйственные культуры [14–20].

Поскольку исследуемый штамм *B. velezensis* HR13 оказался способен утилизировать в качестве единственного источника углерода препараты синтетических пестицидов, считается целесообразным использование данного штамма при проведении восстановительных мероприятий загрязненных почв и водоемов. Бактерии *B. velezensis* способны к деградации атразина, широко применяемого в растениеводстве токсичного гербицида из класса хлортриазинов [21–27].

Полученные данные открывают новые возможности для использования исследуемого штамма бактерий *B. velezensis* в сельском хозяйстве и в целях охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Breuer U. Book review: Brock mikrobiologie. By M. T. Madigan, J. M. Martinko, J. Parker (founded by T. D. Brock) // Acta Biotechnologica. 2001. № 4 (21). P. 369–370. [https://doi.org/10.1002/1521-3846\(200111\)21:43.3CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1521-3846(200111)21:43.3CO;2-Z)
2. Schneider T., Müller A., Miess H., Gross H. Cyclic lipopeptides as antibacterial agents – potent antibiotic activity mediated by intriguing mode of actions // International Journal of Medical Microbiology. 2014. № 304, part 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2013.08.009>
3. Ruis-Garsia C., Be'jar V. *Bacillus velezensis* sp. Nov., a surfactant-producing bacterium isolated from the river Velez in Malaga, Southern Spain // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2005. № 55, part 1. P. 191–195. <https://doi.org/10.1099/ijts.0.63310-0>
4. Pat. US-2018020676-A1 USA. 2014. *Bacillus velezensis* rti301 compositions and methods of use for benefiting plant growth and treating plant disease / S. Taghavi, D. van der Lelie, J. Lee, A. Devine. Priority December 29, 2014.
5. Лазарев С. А., Михайлова Н. А. Ферментативные свойства пробиотических штаммов бактерий рода *Bacillus* // Актуальная биотехнология. 2019. № 3 (30). С. 404–406.



6. Иркитова А. Н., Каган Я. Р., Соколова Г. Г. Сравнительный анализ методов определения антагонистической активности молочнокислых бактерий // Известия Алтайского государственного университета. 2012. № 3, часть 1 (75). С. 41–44.
7. Chen L., Chong X. Y., Zhang Y. Y., Lv Y. Y., Hu Y. S. Genome shuffling of *Bacillus velezensis* for enhanced surfactin production and variation analysis // Curr. Microbiol. 2020. № 77, part 1. P. 71–78. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01807-4>
8. Басалаева Д. Л., Никельшпарг М. И., Евстигнеева С. С., Глинская Е. В. Антагонистическая активность бактерий *Bacillus velezensis* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 57–63. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-57-63>
9. Мелентьев А. И., Курченко В. П., Кузьмина Л. Ю. Циклические липопептиды – перспективный биотехнологический продукт // Перспективы и проблемы развития биотехнологии в рамках единого экономического пространства стран Содружества : материалы междунар. науч-практ. конф. (Минск-Нарочь, 25–28 мая 2005 г.). Минск : РИВШ, 2005. С. 140–141.
10. Смирнова Ю. В., Гамоненко О. В. Влияние *Bacillus subtilis* на рост горчицы сарептской // Проблемы и перспективы изучения естественных и антропогенных источников экосистем Урала и прилегающих районов : материалы IX Всерос. науч-практ. конф. (Стерлитамак, 25 мая 2019 г.). Стерлитамак : Издательство Башкирского государственного университета, 2019. С. 121–124.
11. Яковлева О. В. Аэробные спорообразующие бактерии рода *Bacillus* Cohn – продуценты поверхностно-активных веществ : дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2004. 117 с.
12. Hathout Y., Ho Y. P., Ryzhov V., Demirev P., Fenselau C. Kurstakins: A new class of Lipopeptides isolated from *Bacillus thuringiensis* // Journal of Natural Products. 2000. № 63. P. 1492–1496. <https://doi.org/10.1021/np000169q>
13. Li X., Zhang Y., Wei Z., Guan Z., Cai Y., Liao X. Antifungal activity of isolated *Bacillus amyloliquefaciens* SYBC H47 for the biocontrol of peach gummosis // PloS ONE. 2016. № 11. P. 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162125>
14. Zhi Y., Wu Q., Xu Y. Genome and transcriptome analysis of surfactin biosynthesis in *Bacillus amyloliquefaciens* MT45 // Scientific Reports. 2017. № 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep40976>
15. de Faria A. F., Stéfani D., Vaz B. G., Silva I. S., Garcia J. S., Eberlin M. N., Grossman M. J., Alves O. L., Durrant L. R. Purification and structural characterization of fengycin homologues produced by *Bacillus subtilis* LSFM-05 grown on raw glycerol // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2011. № 38. P. 863–871. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-0980-1>
16. Dimkić I., Stanković S., Nišavić M., Petković M., Ristivojević P., Fira D., Berić T. The profile and antimicrobial activity of *Bacillus* lipopeptide extracts of five potential biocontrol strains // Frontiers in Microbiology. 2017. № 8. P. 925–936. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00925>
17. Lu K., Jin Q., Lin Y., Lu W., Li S., Zhou C., Jin J., Jiang Q., Ling L., Xiao M. Cell-free fermentation broth of *Bacillus velezensis* strain S3-1 improves Pak Choi nutritional quality and changes the bacterial community structure of the rhizosphere soil // Frontiers in Microbiology. 2020. № 11. P. 2043–2056. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02043>
18. Wang C., Zhao D., Qi G., Mao Z., Hu X., Du B., Liu K., Ding Y. Effects of *Bacillus velezensis* FKM10 for promoting the growth of *Malus hupehensis* Rehd. and inhibiting *Fusarium verticillioides* // Frontiers in Microbiology. 2020. № 10. P. 2889–2904. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02889>
19. Hashem A., Tabassum B., Allah E. F. A. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress // Saudi Journal of Biological Sciences. 2019. Vol. 26. P. 1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
20. Kumar A., Singh S., Mukherjee A., Rastogi R. P., Verma J. P. Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress // Microbiol. Res. 2021. Vol. 242. Art. 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020>
21. Kazerooni E. A., Maharachchikumbura S. S. N., Adhikari A., Al-Sadi A. M., Kang S. M., Kim L. R., Lee I. J. Rhizospheric *Bacillus amyloliquefaciens* protect *Capsicum annuum* cv. *Geumsugangsan* from multiple abiotic stress via multifarious plant growth-promoting attributes // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. P. 669–693. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669693>
22. Syed Nabi R. B., Shahzad R., Tayade R., Shahid M., Hussain A., Ali M. W., Yun B. W. Evaluation potential of PGPR to protect tomato against *Fusarium* wilt and promote plant growth // Peer. J. 2021. Vol. 16. P. 1–20. <https://doi.org/10.7717/peerj.11194>
23. Awan S. A., Ilyas N., Khan I., Raza M. A., Rehman A. U., Rizwan M., Rastogi A., Tariq R., Brestic M. *Bacillus siamensis* reduces cadmium accumulation and improves growth and antioxidant defense system in two wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties // Plants (Basel). 2020. Vol. 9. P. 878–891. <https://doi.org/10.3390/plants9070878>
24. Roy T., Bandopadhyay A., Paul C., Majumdar S., Das N. Role of plasmid in pesticide degradation and metal tolerance in two plant growth-promoting rhizobacteria *Bacillus cereus* (NCIM 5557) and *Bacillus safensis* (NCIM 5558) // Current Microbiology. 2022. Vol. 79, № 4. P. 106–112. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-02793-w>
25. Podbielska M., Kus-Liśkiewicz M., Jaguszyn B., Piechowicz B., Sadło S., Słowiak-Borowiec M., Twarużek M.,



- Szpyrka E. Influence of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* on penthiopyrad degradation under laboratory and field studies // *Molecules*. 2020. Vol. 25, № 6. P. 1421–1436. <https://doi.org/10.3390/molecules25061421>
26. Zhao J., Chi Y., Xu Y., Jia D., Yao K. Co-metabolic degradation of β -cypermethrin and 3-phenoxybenzoic acid by co-culture of *Bacillus licheniformis* B-1 and *Aspergillus oryzae* M-4 // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 11. P. 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166796>
27. Chen S., Deng Y., Chang C., Lee J., Cheng Y., Cui Z., Zhou J., He F., Hu M., Zhang L. H. Pathway and kinetics of cyhalothrin biodegradation by *Bacillus thuringiensis* strain ZS-19 // *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. P. 84–87. <https://doi.org/10.1038/srep08784>
28. Jakinala P., Lingampally N., Kyama A., Hameeda B. Enhancement of atrazine biodegradation by marine isolate *Bacillus velezensis* MHNK1 in presence of surfactin lipopeptide // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. Vol. 182. P. 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109372>
8. Basalaeva D. L., Nikelshparg M. I., Evstigneeva S. S., Glinskaya E. V. Antagonistic activity of *Bacillus velezensis*. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 57–63 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-57-63>
9. Melentiev A. I., Kurchenko V. P., Kuzmina L. Yu. Cyclic lipopeptides – promising biotechnological product. In: *Prospects and Problems of Biotechnology Development within the Framework of the Common Economic Space of the Commonwealth Countries: Proc. of the Intern. sci. and pract. conf.* (Minsk, Naroch', May 25–28, 2005). Minsk, Republican Institute of Higher Education Publ., 2005, pp. 140–141 (in Russian).
10. Smirnova Yu. V., Gamonenko O. V. The effect of *Bacillus subtilis* on the growth of Sarepta mustard. *Problems and Prospects of Studying Aesthetic and Anthropogenic Sources Ecosystem of the Urals and Adjacent Regions: Proc. of IX All-Russian sci. and pract. conf.* (Sterlitamak, May 25, 2019). Sterlitamak, Bashkir State University Publ., 2019, pp. 121–124 (in Russian).
11. Yakovleva O. V. *Aerobic Spore-Forming Bacteria of the Genus Bacillus Cohn as Producers of Surfactants*. Diss. Cand. Sci. (Biol.). Ufa, 2004. 117 p. (in Russian).
12. Hathout Y., Ho Y. P., Ryzhov V., Demirev P., Fenselau C. Kurstakins: A new class of Lipopeptides isolated from *Bacillus thuringiensis*. *Journal of Natural Products*, 2000, no. 63, pp. 1492–1496. <https://doi.org/10.1021/np000169q>
13. Li X., Zhang Y., Wei Z., Guan Z., Cai Y., Liao X. Antifungal activity of isolated *Bacillus amyloliquefaciens* SYBC H47 for the biocontrol of peach gummosis. *PLOS ONE*, 2016, no. 11, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162125>
14. Zhi Y., Wu Q., Xu Y. Genome and transcriptome analysis of surfactin biosynthesis in *Bacillus amyloliquefaciens* MT45. *Scientific Reports*, 2017, no. 7, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep40976>
15. de Faria A. F., Stéfani D., Vaz B. G., Silva I. S., Garcia J. S., Eberlin M. N., Grossman M. J., Alves O. L., Durrant L. R. Purification and structural characterization of fengycin homologues produced by *Bacillus subtilis* LSFM-05 grown on raw glycerol. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2011, no. 38, pp. 863–871. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-0980-1>
16. Dimkić I., Stanković S., Nišavić M., Petković M., Ristivojević P., Fira D., Berić T. The profile and antimicrobial activity of *Bacillus* lipopeptide extracts of five potential biocontrol strains. *Frontiers in Microbiology*, 2017, no. 8, pp. 925–936. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00925>
17. Lu K., Jin Q., Lin Y., Lu W., Li S., Zhou C., Jin J., Jiang Q., Ling L., Xiao M. Cell-free fermentation broth of *Bacillus velezensis* strain S3-1 improves Pak Choi nutritional quality and changes the bacterial community structure of the rhizosphere soil. *Frontiers in Microbiology*, 2020, no. 11, pp. 2043–2056. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02043>

References

1. Breuer U. Book review: *Brock mikrobiologie*. By M. T. Madigan, J. M. Martinko, J. Parker (foundered by T. D. Brock). *Acta Biotechnologica*, 2001, no. 4 (21), pp. 369–370. [https://doi.org/10.1002/1521-3846\(200111\)21:43.3CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1521-3846(200111)21:43.3CO;2-Z)
2. Schneider T., Müller A., Miess H., Gross H. Cyclic lipopeptides as antibacterial agents – potent antibiotic activity mediated by intriguing mode of actions. *International Journal of Medical Microbiology*, 2014, no. 304, part 1, pp. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2013.08.009>
3. Ruis-Garsia C., Be'jar V. *Bacillus velezensis* sp. Nov., a surfactant-producing bacterium isolated from the river Velez in Malaga, Southern Spain. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, no. 55, part 1, pp. 191–195. <https://doi.org/10.1099/ijss.0.63310-0>
4. Pat. US-2018020676-A1 USA. 2014. *Bacillus velezensis rti301 compositions and methods of use for benefiting plant growth and treating plant disease*. Taghavi S., van der Lelie D., Lee J., Devine A. Priority December 29, 2014.
5. Lazarev, S. A., Mikhailova, N. A. Enzymatic properties of probiotic bacterial strains of the genus *Bacillus*. *Current Biotechnology*, 2019, no. 3 (30), pp. 404–406.
6. Irkitova A. N., Kagan Ya. R., Sokolova G. G. Comparative analysis of methods for determining the antagonistic activity of lactic acid bacteria. *Proceedings of the Altai State University*, 2012, no. 3, part 1 (75), pp. 41–44.
7. Chen L., Chong X. Y., Zhang Y. Y., Lv Y. Y., Hu Y. S. Genome shuffling of *Bacillus velezensis* for enhanced surfactin production and variation analysis. *Curr. Microbiol.*, 2020, no. 77, part 1, pp. 71–78. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01807-4>



18. Wang C., Zhao D., Qi G., Mao Z., Hu X., Du B., Liu K., Ding Y. Effects of *Bacillus velezensis* FKM10 for promoting the growth of *Malus hupehensis* Rehd. and inhibiting *Fusarium verticillioides*. *Frontiers in Microbiology*, 2020, vol. 10, pp. 2889–2904. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02889>
19. Hashem A., Tabassum B., Allah E. F. A. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2019, vol. 26, pp. 1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
20. Kumar A., Singh S., Mukherjee A., Rastogi R. P., Verma J. P. Salt-tolerant plant growth-promoting *Bacillus pumilus* strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiol. Res.*, 2021, vol. 242, art. 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020>
21. Kazerooni E. A., Maharachchikumbura S. S. N., Adhikari A., Al-Sadi A. M., Kang S. M., Kim L. R., Lee I. J. Rhizospheric *Bacillus amyloliquefaciens* protect *Capsicum annuum* cv. *Geumsugangsan* from multiple abiotic stress via multifarious plant growth-promoting attributes. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 12, pp. 669–693. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669693>
22. Syed Nabi R. B., Shahzad R., Tayade R., Shahid M., Hussain A., Ali M. W., Yun B. W. Evaluation potential of PGPR to protect tomato against *Fusarium* wilt and promote plant growth. *Peer. J.*, 2021, vol. 16, pp. 1–20. <https://doi.org/10.7717/peerj.11194>
23. Awan S. A., Ilyas N., Khan I., Raza M. A., Rehman A. U., Rizwan M., Rastogi A., Tariq R., Brestic M. *Bacillus siamensis* reduces cadmium accumulation and improves growth and antioxidant defense system in two wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Plants (Basel)*, 2020, vol. 9, pp. 878–891. <https://doi.org/10.3390/plants9070878>
24. Roy T., Bandopadhyay, A., Paul C., Majumdar S., Das N. Role of plasmid in pesticide degradation and metal tolerance in two plant growth-promoting rhizobacteria *Bacillus cereus* (NCIM 5557) and *Bacillus safensis* (NCIM 5558). *Current Microbiology*, 2022, vol. 79, no. 4, pp. 106–112. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-02793-w>
25. Podbielska M., Kus-Liśkiewicz M., Jaguszyn B., Piechowicz B., Sadło S., Słowiak-Borowiec M., Twarużek M., Szpyrka E. Influence of *Bacillus subtilis* and *Trichoderma harzianum* on penthiopyrad degradation under laboratory and field studies. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 6, pp. 1421–1436. <https://doi.org/10.3390/molecules25061421>
26. Zhao J., Chi Y., Xu Y., Jia D., Yao K. Co-metabolic degradation of β -cypermethrin and 3-phenoxybenzoic acid by co-culture of *Bacillus licheniformis* B-1 and *Aspergillus oryzae* M-4. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, no. 11, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166796>
27. Chen S., Deng Y., Chang C., Lee J., Cheng Y., Cui Z., Zhou J., He F., Hu M., Zhang L. H. Pathway and kinetics of cyhalothrin biodegradation by *Bacillus thuringiensis* strain ZS-19. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, pp. 84–87. <https://doi.org/10.1038/srep08784>
28. Jakinala P., Lingampally N., Kyama A., Hameeda B. Enhancement of atrazine biodegradation by marine isolate *Bacillus velezensis* MHNK1 in presence of surfactin lipopeptide. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 182, pp. 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109372>

Поступила в редакцию 20.07.2024; одобрена после рецензирования 22.03.2025;
принята к публикации 01.04.2025; опубликована 30.06.2025

The article was submitted 20.07.2024; approved after reviewing 22.03.2025;
accepted for publication 01.04.2025; published 30.06.2025