

УДК 631.427.4

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-402-01-113-120

A.Н. Сизенцов**E.В. Сальникова****Е.А. Осипова****М.А. Булгакова**Оренбургский государственный
университет, Оренбург, Россия

✉ kudryavceva.elen@mail.ru

Поступила в редакцию: 17.09.2025

Одобрена после рецензирования: 11.12.2025

Принята к публикации: 26.12.2025

© Сизенцов А.Н., Сальникова Е.В.,
Осипова Е.А., Булгакова М.А.

Снижение токсичного влияния ионов свинца на *Triticum aestivum L.* и *Sinapis alba L.* под действием штамма *B. licheniformis RZn* в модели *in vitro*

РЕЗЮМЕ

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами, в том числе и ксенобиотическими элементами с высокими кумулятивными характеристиками, является актуальной проблемой в настоящее время. Приоритетным загрязнителем первого класса опасности является свинец, который попадает в окружающую среду с удобрениями и в результате технологических выбросов (пыли, паров, растворов), которые легко оседают на поверхности почвы и воды.

В качестве эффективного сорбента подвижных форм токсичных элементов возможно использование почвенных микроорганизмов рода *Bacillus* spp. с высокими аккумулирующими характеристиками. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по выделению и оценке эффективности штаммов *Bacillus* spp., с территорий с высоким уровнем техногенной нагрузки. Использование диффузионного метода лунок в комбинации с методом серийного разведения, а также метода «реплик» с высевом на субстраты с высоким уровнем катионной нагрузки посредством добавления в питательные среды $Pb(NO_3)_2$ «ЧДА» в концентрациях 0,031 М, 0,016 М и 0,008 М позволили выделить перспективный штамм *B. licheniformis RZn*, характеризующийся устойчивым ростом на средах с добавлением $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 0,031 М и показателями сорбции катионов свинца из субстрата до 65,39%. В модельном эксперименте с использованием тест-культур *Sinapis alba L.* и *Triticum aestivum L.* установлено снижение уровня токсического влияния свинца на показатели всхожести, а также морфометрические показатели растений, что свидетельствует о выраженному биологическом потенциале исследуемого штамма в качестве ремедиатора ионов свинца.

Ключевые слова: *Bacillus* spp., свинец, биоремедиация, *Sinapis alba L.*, *Triticum aestivum L.*, токсичность, сорбция

Для цитирования: Сизенцов А.Н., Сальникова Е.В., Осипова Е.А., Булгакова М.А. Снижение токсичного влияния ионов свинца на *Triticum aestivum L.* и *Sinapis alba L.* под действием штамма *B. licheniformis RZn* в модели *in vitro*. Аграрная наука. 2026; 402(01): 113–120.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-402-01-113-120>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-402-01-113-120

Aleksey N. Sizentsov**Elena V. Salnikova****Elena A. Osipova****Marina A. Bulgakova**Orenburg State University, Orenburg,
Russia

✉ kudryavceva.elen@mail.ru

Received by the editorial office: 17.09.2025

Accepted in revised: 11.12.2025

Accepted for publication: 26.12.2025

© Sizentsov A.N., Salnikova E.V.,
Osipova E.A., Bulgakova M.A.

Reducing the toxic effect of lead ions on *Triticum aestivum L.* and *Sinapis alba L.* under the action of the *B. licheniformis RZn* strain in an *in vitro* model

ABSTRACT

Environmental pollution with heavy metals, including xenobiotic elements with high cumulative characteristics, is currently an urgent problem. Lead is a priority pollutant of the first hazard class that enters the environment through fertilizers and as a result of technological emissions (dust, vapors, solutions), which easily settle on soil and water surfaces.

Soil microorganisms of the genus *Bacillus* spp. with high accumulation characteristics can be used as effective sorbents of mobile forms of toxic elements. The paper presents results of experimental studies on the isolation and evaluation of the effectiveness of *Bacillus* spp. strains isolated from territories with high anthropogenic load. The use of the well diffusion method in combination with the serial dilution method, as well as the “replica” method with seeding on substrates with high cationic load by adding $Pb(NO_3)_2$ “P.A.” in concentrations of 0.031 M, 0.016 M and 0.008 M allowed isolation of a promising *B. licheniformis RZn* strain characterized by stable growth on media with $Pb(NO_3)_2$ addition at a concentration of 0.031 M and lead cation sorption rates from the substrate up to 65.39%. In a model experiment using test cultures of *Sinapis alba L.* and *Triticum aestivum L.*, a reduction in the toxic effect of lead on germination rates as well as plant morphometric parameters was observed. This indicates the significant biological potential of the studied strain as a remediator of lead ions.

Key words: *Bacillus* spp., lead, bioremediation, *Sinapis alba L.*, *Triticum aestivum L.*, toxicity, sorption

For citation: Sizentsov A.N., Salnikova E.V., Osipova E.A., Bulgakova M.A. Reducing the toxic effect of lead ions on *Triticum aestivum L.* and *Sinapis alba L.* under the action of the *B. licheniformis RZn* strain in an *in vitro* model. Agrarian science. 2026; 402(01): 113–120 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-402-01-113-120>

Введение/Introduction

Вследствие активной индустриализации, интенсивного развития сельского хозяйства с ростом городов происходит масштабное загрязнение природных сред токсичными веществами, в частности соединениями свинца, относящимися к веществам первого класса опасности СанПин 1.2.3685-21¹ [1].

Накопление свинца в почвенном покрове может негативно влиять на рост и развитие культурных растений, а также повышать риски контаминации сельскохозяйственной продукции. Увеличивающиеся масштабы добычи свинца повышают загрязнение сельскохозяйственных почв в регионах добычи и транспортировки руд.

Наиболее крупным поставщиком концентратов свинца является Россия, в которой добыча свинца из недр за последнее десятилетие увеличилась на 38% и составляет около 333 тыс. т в год². В результате добычи руды и переработки свинцовых концентратов в окружающую среду рассеиваются около 300 кг свинца в год в виде технологических и неорганизованных выбросов (пыли, паров, растворов), которые легко оседают на поверхности почвы и воды [2].

Кроме того, соединения свинца могут поступать в окружающую среду при производстве красок, переработке свинцовых аккумуляторов, при внесении органических и минеральных удобрений [1–3]. Накопление свинца в почве приводит к снижению ее плодородия, нарушению биоценоза, уменьшению разнообразия растительности, к хлорозу растений, у растений наблюдаются замедление роста, почернение корневой системы, на фоне чего происходит нарушение водного баланса и минерального питания, приводящее к изменениям в гормональном статусе, структуре и проницаемости мембран [1, 2, 4].

С растениями свинец может перемещаться по пищевым цепям и оказывать негативное кумулятивное воздействие на нервную и половую системы, органы дыхания и пищеварения животных, что может привести к их гибели или снижению популяций [1, 5, 6].

В организм человека свинец может попадать с вдыханием загрязненного воздуха и перорально с загрязненной водой и пищей [1–5]. Накапливаясь в организме человека, свинец проявляет нефротоксичность и негативно воздействует на нервную систему, вызывая головные боли, бессонницу, раздражительность и депрессию. У детей возможны гиперактивность и задержка умственного развития [9]. Сердечно-сосудистая система человека подвержена негативному воздействию свинца, который способствует развитию атеросклероза и может приводить к инфаркту миокарда или

инфаркту [10]. При длительном воздействии токсичность свинца приводит к нарушениям в репродуктивной системе и способствует развитию заболеваний костной ткани [1].

Для очистки объектов окружающей среды во многих странах применяют различные химические и физические методы, однако они не всегда эффективны и требуют значительных финансовых затрат [11, 12].

Экологичным и эффективным методом восстановления загрязненных почв и вод является биоремедиация, основанная на способности живых организмов (растений, бактерий, водорослей, дрожжей и грибов) перерабатывать или связывать токсичные металлы, тем самым снижая концентрацию в загрязненных средах [11].

Фиторемедиация, то есть использование определенных видов растений для аккумуляции ксенобиотических элементов, является легко осуществимой и экономически эффективной, но ограничивается тем, что токсичность препятствует нормальному росту [11–13].

Для улучшения способности растений к очищению загрязненных территорий используют различные симбионты, в роли которых могут выступать различные бактерии [14, 15]. Например, ризосферный бактериальный штамм *Brevibacterium casei* МН8а колонизирует ткани растений и тем самым усиливает фитоэкстракцию кадмия, цинка и меди белой горчицей [14].

Бактерии рода *Bacillus*, *Pseudomonas* и другие часто используются для очищения почвы и воды, поскольку способны выживать в условиях повышенного содержания тяжелых металлов, что способствует тщательному изучению защитных механизмов детоксикации тяжелых металлов [15, 16]. *Bacillus* spp. использует pbr operon и активный транспорт в качестве потенциальных стратегий борьбы с токсическими эффектами Pb [12]. Микроорганизмы избавляются от него путем адсорбции через клеточную стенку, поскольку она состоит из органических макромолекул, включая полипептиды, полисахариды и белки, которые обладают способностью адсорбировать Pb с помощью электростатических сил, включая силы Van der Waальса, ковалентные или ионные связи [17].

В последнее время особое внимание уделяется биоремедиации с использованием микроорганизмов, поскольку некоторые бактерии в окружающей среде выработали различные защитные механизмы от высоких концентраций токсичных элементов, в том числе и от ионов свинца [14–24].

Установлено, что связывание токсичных элементов бактериями может осуществляться за счет сорбционных процессов (биосорбции), протекающих как на поверхности клеток бактерий,

¹ Санитарные правила и нормы СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Москва. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 года № 62296. 988 с.

² Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 13-2020. Производство свинца, цинка и кадмия. М.: Бюро НДТ. 2020; 258 (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 года № 2182).

так и внутри них, с помощью различных молекул белков, липидов, пептидов, которые прочно связывают токсичные элементы, уменьшая их биологическую доступность. Бактерии способны восстанавливать металлы или переводить их в плохо растворимые, менее токсичные формы [20, 21]. Бактерии могут помогать растениям переносить и накапливать тяжелые металлы, а также разлагать органические загрязнители, делая среду более пригодной для роста растений [21–24].

Исходя из вышеизложенного, была поставлена цель провести комплексную оценку эффективности применения почвенных изолятов *Bacillus* spp. в качестве биоремедиаторов свинца из субстратов в модельном эксперименте *in vitro*.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили на базе научно-исследовательских лабораторий кафедр биохимии и микробиологии, биологии и почвоведения и химии ФГОУ ВО «Оренбургский государственный университет» с сентября 2024 года по май 2025-го.

В рамках настоящего исследования использовали изолированные штаммы *Bacillus* spp., выделенные из почвенных образцов с территорий с высоким уровнем техногенного загрязнения антропогенного происхождения: шламовые отвалы ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат»; карьер открытого способа добычи меди Блявинского медно-колчеданного месторождения ООО «ММСК» (Оренбургская обл., «голубое» озеро); шахты (подземная добыча меди) Блявинского медно-колчеданного месторождения ООО «ММСК» (Оренбургская обл.).

Отобранные методом «конверта»³ образцы почвы подвергали предварительному нагреву в водяной бане при температуре 98 °C в течение 1,5 часов. Использование данного этапа обусловлено высоким уровнем устойчивости спор представителей рода *Bacillus* spp. к температурному воздействию.

Супензию почвенных образцов высевали на стерильные питательные среды ГРМ-агар с последующим инкубированием в термостате при температуре 37 °C в течение суток. Изолированные штаммы получали с использованием метода «реплик»⁴ на субстраты с добавлением солей эссенциальных элементов (FeSO_4 , CoSO_4 , CuSO_4 , MgSO_4 , MnSO_4 и ZnSO_4) в диапазоне двухкратного разведения от 0,125 до 0,008 М. Выделенные изоляты с максимальными показателями резистентности к массированной катионной нагрузке пересевали на агаризованные субстраты, содержащие минимальные, не ингибирующие рост концентрации исследуемых солей, с последующей

идентификацией штаммов до уровня вида с использованием метода MALDI-TOF-спектроскопии (Микробиологический масс-спектрометр MALDI-TOF Autof ms1000, Autobio Diagnostics, Китай), основанной на интенсивности и размерах пиков обнаруженных молекул на выбранной для анализа матрице, позволяющей провести точную идентификацию микроорганизмов на основе различий биоаналитов.

В процессе отбора и идентификации почвенных изолятов были получены чистые культуры трех штаммов *B. cereus* и трех штаммов *B. licheniformis* с различным уровнем пороговых значений устойчивости к эссенциальным элементам с последующим обозначением их резистентности (резистентовары): RFe, RCo, RMg, RCu, RMn и RZn, которые использовали в экспериментальной оценке их биоремедиационного потенциала в модельном эксперименте *in vitro*.

Для определения пороговых значений резистентности исследуемых штаммов в отношении свинца использовали комбинацию методических подходов, позволяющих определить влияние различных концентраций химического поллютанта, входящего в состав неорганического соединения с высоким уровнем диссоциации в водных растворах. В частности, в эксперименте использовали $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ «ЧДА» (ГОСТ 4236-77⁵).

Оценку уровня устойчивости проводили диффузионным методом в толще агара (метод лунок). Реализацию данного этапа проводили на стерильных агаризованных средах, разлитых в чашки Петри в объеме 20 мл, на поверхности которых «газоном» высевали супензию суточной культуры экспериментальных штаммов *Bacillus* spp. В толще агаровой пластиинки микробиологическим пробойником вырезали равноудаленные друг от друга лунки диаметром 5 мм, в которые вносили по 30 мкл раствора $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ в концентрациях соли 1,000 М, 0,500 М, 0,250 М, 0,125 М, 0,063 М, 0,031 М, 0,016 М и 0,008 М. Диапазон выбранных концентраций обусловлен уровнем устойчивости исследуемых штаммов *Bacillus* spp. с последующим инкубированием культур клеток в течение 24 часов при температуре 37 °C. Для получения достоверных результатов исследование проводили с 10-кратным повтором. Уровень толерантности определяли визуально путем замера зон ингибирования роста бактериальных штаммов.

Использование метода «реплик» в настоящем исследовании обусловлено выделением из общей популяции клеток изолированных штаммов с высокими адаптационными показателями (спонтанные мутации) в отношении исследуемого химического поллютанта в структуре питательной среды. В основе метода лежит использование

³ ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

⁴ ГОСТ Р ИСО 16140-2008 Микробиология продуктов питания и кормов для животных. Протокол валидации альтернативных методов.

⁵ ГОСТ 4236-77 Свинец (II) азотнокислый. Технические условия. М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. 1977: 14.

штампа Ледерберга (цилиндр) с натянутой стерильной бархатной тканью на его поверхности. Суточные колонии клеток, выросших на поверхности агаризованного субстрата, переносили на поверхность бархатной ткани, затем методом штампа (отпечатка) на поверхность субстрата («ГРМ-агар», производитель ФБУН ГНЦ ПМБ, Московская обл., пос. Оболенск, ТУ 9398-020-78095326-2006) с добавлением различных концентраций $Pb(NO_3)_2$ с последующим их культивированием в течение 48 часов при температуре 37 °C.

Уровень устойчивости штаммов проводили визуально по интенсивности роста микроорганизмов: S — отсутствие роста; I — скучный рост (единичные колонии); R — интенсивный рост (рост газоном). Для определения уровня сорбционной емкости исследуемыми штаммами свинца использовали атомно-абсорбционную спектрофотометрию (SavantAA Zeeman, GBC Scientific Equipment Pty Ltd., Австралия).

Исследование подвергали образцы биомассы и супернатанта, полученные в процессе культивирования штаммов в жидких питательных средах (ГРМ-бульон) с добавлением рабочих концентраций (минимальная, не оказывающая ингибирующего действия) $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 0,016 М. Инкубирование штаммов осуществляли в течение 48 часов при температуре 37 °C с последующим отделением биомассы центрифугированием на высокоскоростной центрифуге в течение 30 минут при 10 000 об/мин. Супернатант отделяли автоматической пипеткой. Сорбцию определяли как процент содержания исследуемого элемента в образце по отношению к вносимой дозе.

Исследование биоремедиационной активности штамма проводили в модельном эксперименте *in vitro* с использованием тест-культур *Sinapis alba* L. (горчица белая сорта Рапсодия, производитель ООО «Семенная станция», г. Пенза) и *Triticum aestivum* L. (пшеница сорта Учитель, предоставлена ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург). Для реализации данного этапа предварительно активированные семена раскладывали на фильтровальную бумагу в чашках Петри по 15 семян в каждую.

В эксперименте сравнивали результаты четырех групп образцов: интактный (чистый) контроль; контроль загрязнения поллютантом (внесение

$Pb(NO_3)_2$ в концентрации 0,031 М (выбор концентрации обусловлен присутствием в тестируемых образцах семян растений и подложки, которые потенциально могут взаимодействовать с катионами свинца, снижая его токсичность в отношении бактериальных штаммов); контроль влияния исследуемого штамма (биоремедиатора) в дозе $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл; опытный образец, включающий комбинацию поллютанта и биоремедиатора в указанных концентрациях.

При проведении исследования оценивали показатели всхожести (на 7-й день), а также морфометрические показатели, такие как длина корешка и стебля (на 14-й день).

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли с использованием официального программного комплекса Microsoft Office с применением программы Excel (Microsoft, США) с обработкой данных в Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Достоверность различий полученных результатов определяли по t-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение /

Results and discussion

В рамках проведенных предварительных исследований, направленных на оценку уровня толерантности почвенных изолятов *Bacillus spp.*, полученных с территорий с высоким уровнем техногенной нагрузки, с использованием метода диффузии в агар в сочетании с методами последовательных разведений (табл. 1), установлено, что все исследуемые штаммы обладают выраженной чувствительностью к высоким концентрациям $Pb(NO_3)_2$ в диапазоне от 1,000 до 0,125 М.

Анализ результатов исследования уровня резистентности исследуемых штаммов *Bacillus spp.* в отношении $Pb(NO_3)_2$ в различных концентрациях, полученных методом серийных разведений, в диапазоне от 1,000 М (массовое содержание Pb^{2+} 207,20 г/л) до 0,008 М (1,62 г/л), свидетельствует о наличии слабо выраженного ингибирующего действия свинца в концентрации 0,063 М (12,95 г/л) в отношении штамма *B. licheniformis* RZn. Снижение уровня свинца до 0,031 М (6,48 г/л) характеризуется отсутствием негативного влияния ксенобиотического элемента на данный штамм, что в свою очередь делает его наиболее перспективным для проведения дальнейших исследований.

Таблица 1. Экспериментальная оценка уровня резистентности почвенных изолятов *Bacillus spp.* к различным концентрациям $Pb(NO_3)_2$

Table 1. Experimental assessment of the resistance level of soil isolates of *Bacillus spp.* to different concentrations of $Pb(NO_3)_2$

Исследуемые штаммы	Концентрация $Pb(NO_3)_2$, М/С(Pb^{2+}), г/л				
	1,000 М 207,20 г/л	0,500 М 103,6 г/л	0,250 М 51,8 г/л	0,125 М 25,9 г/л	0,063 М 12,95 г/л
<i>B. cereus</i> RFe	34,91 ± 0,83	22,07 ± 0,59	21,55 ± 0,37	16,02 ± 0,28	11,85 ± 0,46
<i>B. cereus</i> RCo	32,59 ± 0,94	29,06 ± 0,68	21,98 ± 0,53	16,58 ± 1,01	13,45 ± 0,42
<i>B. cereus</i> RMg	29,54 ± 0,36	25,19 ± 0,87	19,25 ± 0,56	16,21 ± ,052	14,86 ± 0,55
<i>B. licheniformis</i> RCu	26,15 ± 0,77	22,38 ± 0,54	18,77 ± 0,63	15,08 ± 0,46	13,24 ± 0,29
<i>B. licheniformis</i> RMn	31,55 ± 1,06	30,89 ± 0,84	29,34 ± 0,69	22,16 ± 0,42	15,22 ± 0,38
<i>B. licheniformis</i> RZn	31,22 ± 0,91	30,26 ± 0,67	22,39 ± 0,75	11,92 ± 0,15	7,16 ± 0,19

Использование метода «реплик» для выделения потенциально перспективных штаммов с высокими показателями резистентности и метода атомно-абсорбционной спектрофотометрии имеет прямую корреляционную зависимость с результатами тестовых исследований резистентности (табл. 2) методом лунок. В частности, установлено, что наряду с максимальными показателями резистентности штамм *B. licheniformis* RZn обладает высокими показателями сорбции, составляющей 65,39% от вносимого объема.

Оценку ремедиационных характеристик отобранного в ходе предварительных исследований штамма *B. licheniformis* RZn проводили в модельном эксперименте с использованием тестовых культур растений *Sinapis alba* L. и *Triticum aestivum* L. В модельном эксперименте *in vitro* использовали четыре группы образцов: контрольная — 3, опытная — 1. В контроле оценивали влияние свинца путем внесения раствора $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 0,031 М (загрязнитель), суспензии бактериального штамма *B. licheniformis* RZn в концентрации $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл (ремедиатор). В качестве маркера использовали интактные образцы, полив которых осуществляли дистиллированной водой. В опытной группе использовали

комбинирование загрязнителя и ремедиатора (табл. 3).

В ходе проведенных исследований установлено, что концентрация $Pb(NO_3)_2$ оказывает выраженное токсическое влияние на семена *Sinapis alba* L., характеризующееся 100%-ным подавлением роста семян во всех образцах. Диапазон выбранных концентраций свинца определяли из уровня их токсичности в отношении почвенных изолятов микроорганизмов.

Использование *B. licheniformis* RZn незначительно снижает показатели всхожести семян (на 16,75%) и длину корешка (на 11,41%), не оказывая влияния на длину побега. Гипотетически снижение показателей всхожести семян можно объяснить наличием конкуренции за питательные вещества между растением и бактериальными штаммами, так как дополнительных источников питательных веществ в исследуемых образцах не было [25].

Внесение суспензии микроорганизмов в образцы, загрязненные нитратом свинца, стимулирует рост растений по отношению к контрольному образцу загрязнения, но уступает показателям интактных образцов — на 30,04% по всхожести, на 29,05% и 22,92% по длине корня и стебля,

Таблица 2. Оценка уровня резистентности почвенных изолятов *Bacillus spp.* в отношении свинца и их сорбционная емкость

Table 2. Assessment of the resistance level of soil isolates of *Bacillus spp.* in relation to lead and their sorption capacity

Исследуемые штаммы	Интенсивность роста популяции клеток на субстратах с добавлением различных концентраций $Pb(NO_3)_2$, М			Процентное распределение Pb в исследуемых образцах после культивирования штаммов на субстратах с добавлением $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 0,016 М	
	0,031	0,016	0,008	биомасса	супернатант
<i>B. cereus</i> RFe	I	R	R	$64,31 \pm 0,68$	$32,29 \pm 0,23$
<i>B. cereus</i> RCo	I	R	R	$64,38 \pm 0,81$	$29,59 \pm 0,54$
<i>B. cereus</i> RMg	S	I	R	$61,57 \pm 0,29$	$33,24 \pm 0,39$
<i>B. licheniformis</i> RCu	I	R	R	$64,49 \pm 0,38$	$29,95 \pm 0,52$
<i>B. licheniformis</i> RMn	I	R	R	$64,85 \pm 0,94$	$30,39 \pm 0,44$
<i>B. licheniformis</i> RZn	R	R	R	$65,39 \pm 0,83$	$28,55 \pm 0,62$

Примечание: S — отсутствие роста; I — скучный рост (единичные колонии); R — интенсивный рост (рост газоном).

Таблица 3. Оценка биоремедиационного потенциала *B. licheniformis* RZn на тест-культуратах *Sinapis alba* L. и *Triticum aestivum* L. в модельном эксперименте *in vitro*

Table 3. Assessment of the bioremediation potential of *B. licheniformis* RZn using test-cultures of *Sinapis alba* L. and *Triticum aestivum* L. in an *in vitro* model experiment

Исследуемые образцы	Анализируемые показатели	Ед. изм.	Тест-культуры	
			<i>Sinapis alba</i> L.	<i>Triticum aestivum</i> L.
Контрольные	всхожесть	%	$95,38 \pm 2,33$	$73,35 \pm 4,21$
	длина корня	мм	$7,54 \pm 1,12$	$55,39 \pm 3,22$
	длина стебля	мм	$16,23 \pm 0,98$	$82,61 \pm 3,68$
Загрязнение $Pb(NO_3)_2$ (0,031 М)	всхожесть	%	0	$34,55 \pm 2,71^{**}$
	длина корня	мм	0	$3,57 \pm 0,96^{***}$
	длина стебля	мм	0	$6,73 \pm 1,22^{***}$
Внесение <i>B. licheniformis</i> RZn ($1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл)	всхожесть	%	$78,63 \pm 1,32$	$63,54 \pm 4,44$
	длина корня	мм	$6,68 \pm 2,12$	$23,28 \pm 2,57^*$
	длина стебля	мм	$16,21 \pm 3,35$	$49,15 \pm 3,67^{**}$
Загрязнение $Pb(NO_3)_2$ (0,031 М) <i>B. licheniformis</i> RZn ($1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл)	всхожесть	%	$65,34 \pm 4,26^*$	$55,63 \pm 3,98^*$
	длина корня	мм	$5,35 \pm 1,95^*$	$28,77 \pm 1,59^{**}$
	длина стебля	мм	$12,51 \pm 2,23$	$33,16 \pm 2,16^*$

Примечание: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; достоверность рассчитывали по отношению к интактному контролю и контролю загрязнения.

а в отношении контроля ремедиатора анализируемые показатели снизились: на 13,29% ($p < 0,05$), 19,91% ($p < 0,05$) и 22,83% соответственно.

Используемая в эксперименте культура *Triticum aestivum* L. обладает слабовыраженной резистентностью в отношении свинца. Так, показатели всхожести в группе контроля загрязнения снизились на 38,80% ($p < 0,01$), длины корня и побега — на 93,56% ($p < 0,001$) и 91,85% ($p < 0,001$), соответственно, по отношению к интактным образцам.

Тестируемый ремедиатор характеризуется отрицательной динамикой анализируемых показателей в сравнении с чистым контролем, проявляющейся в снижении показателя всхожести семян на 9,81%, длины корня и стебля на 57,97% ($p < 0,05$) и 40,50% ($p < 0,01$), что, на взгляд авторов, подтверждает гипотезу конкуренции за питательные вещества. Внесение в исследуемые образцы, подвергнутые загрязнению нитратом свинца, суспензии *B. licheniformis* RZn значительно увеличило показатели: всхожести — на 21,08% ($p < 0,05$), длины корня — на 87,59% ($p < 0,01$), длины стебля — на 79,71% ($p < 0,01$) по отношению к контрольным образцам загрязнения.

Выводы/Conclusions

Обобщая результаты проведенных исследований, следует отметить, что все рассматриваемые штаммы почвенных образцов обладают выраженной чувствительностью в отношении высоких концентраций нитрата свинца в диапазоне от 1,000 до 0,063 М, при этом максимальные

показатели толерантности регистрируются у штамма *B. licheniformis* RZn, характеризующегося устойчивым ростом на питательных субстратах с добавлением $Pb(NO_3)_2$ в дозировке 0,031 М (массовая доля свинца 6,48 г/л) и прямой корреляционной зависимостью с показателями сорбции с уровнем накопления металла в биомассе клеток до 65,39%. При этом следует отметить, что все исследуемые штаммы обладают высокими показателями сорбции (более 60%).

Результаты исследования биоремедиационного потенциала на тест-культурах *Sinapis alba* L. и *Triticum aestivum* L., основанные на проведении анализа исследуемых показателей в сравнении с интактными образцами и образцами, подвергнутыми загрязнению в концентрациях, аналогичных опытным образцам, свидетельствуют о выраженной положительной динамике всхожести, а также морфометрических показателей, характеризующихся увеличением на 21,08% ($p < 0,05$), 87,59% ($p < 0,01$) и 79,71% ($p < 0,01$) по отношению к контрольным образцам *Triticum aestivum* L., подвергнутым загрязнению $Pb(NO_3)_2$ и выраженным стимулированием роста *Sinapis alba* L. по отношению к контрольному образцу загрязнения, в котором зарегистрировано 100%-ное подавление роста, но уступают показателям интактных образцов на 30,04% по всхожести, на 29,05% и 22,92% по длине корня и стебля, что свидетельствует о выраженному биологическом потенциале исследуемого штамма в качестве ремедиатора ионов свинца.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.
All authors made an equal contribution to the work.
The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.
The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FSGU-2023-0007 (соглашение с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации от 15.11.2023 № 075-03-2023-012/8).

FUNDING

The research was carried out within the framework of the state task No. FSGU-2023-0007 (agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated 11/15/2023 No. 075-03-2023-012/8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тепляя Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы). Астраханский вестник экологического образования. 2013; (1): 182–192. <https://www.elibrary.ru/pxntrr>
2. Ayilara M.S., Babalola O.O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*. 2023; 5: 1183691. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>
3. Luo J. et al. Bioaccessibility, source and human health risk of Pb, Cd, Cu and Zn in windowsill dusts from an area affected by long-term Pb smelting. *Science of The Total Environment*. 2022; 842: 156707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156707>
4. Yap C.K., Al-Mutairi K.A. Ecological-Health Risk Assessments of Heavy Metals (Cu, Pb, and Zn) in Aquatic Sediments from the ASEAN-5 Emerging Developing Countries: A Review and Synthesis. *Biology*. 2022; 11(1): 7. <https://doi.org/10.3390/biology11010007>
5. Chandwani S., Kayasth R., Naik H., Amaresan N. Current status and future prospect of managing lead (Pb) stress through microbes for sustainable agriculture. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023; 195(4): 479. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11061-8>
6. Teplaya G.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution (literature review). *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013; (1): 182–192 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/pxntrr>
7. Ayilara M.S., Babalola O.O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*. 2023; 5: 1183691. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>
8. Luo J. et al. Bioaccessibility, source and human health risk of Pb, Cd, Cu and Zn in windowsill dusts from an area affected by long-term Pb smelting. *Science of The Total Environment*. 2022; 842: 156707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156707>
9. Yap C.K., Al-Mutairi K.A. Ecological-Health Risk Assessments of Heavy Metals (Cu, Pb, and Zn) in Aquatic Sediments from the ASEAN-5 Emerging Developing Countries: A Review and Synthesis. *Biology*. 2022; 11(1): 7. <https://doi.org/10.3390/biology11010007>
10. Chandwani S., Kayasth R., Naik H., Amaresan N. Current status and future prospect of managing lead (Pb) stress through microbes for sustainable agriculture. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023; 195(4): 479. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11061-8>

6. Сизенцов Я.А., Сальникова В.И., Сальникова Е.В., Сизенцов А.Н., Исаикина Е.Ю. Геохимические характеристики содержания свинца на территории Оренбургской области и оценка его влияния на микробиоту кишечника животных. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018; (6): 142–145. <https://www.elibrary.ru/ysucdb>
7. Nag R., Cummins E. Human health risk assessment of lead (Pb) through the environmental-food pathway. *Science of The Total Environment*. 2022; 810: 151168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151168>
8. Соколова О.Я., Науменко О.А., Бибарцева Е.В., Васильева Т.Н. Трансформационная способность свинца в агроценозах Оренбуржья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018; (5): 40–43. <https://www.elibrary.ru/yndpcp>
9. Sanders A.P. et al. Combined exposure to lead, cadmium, mercury, and arsenic and kidney health in adolescents age 12–19 in NHANES 2009–2014. *Environment International*. 2019; 131: 104993. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104993>
10. Tang J. et al. Total arsenic, dimethylarsinic acid, lead, cadmium, total mercury, methylmercury and hypertension among Asian populations in the United States: NHANES 2011–2018. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022; 241: 113776. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113776>
11. Sarker A. et al. Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*. 2023; 332: 138861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138861>
12. Alotaibi B.S., Khan M., Shamim S. Unraveling the Underlying Heavy Metal Detoxification Mechanisms of *Bacillus* Species. *Microorganisms*. 2021; 9(8): 1628. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081628>
13. Jiang R., Zhu C., Wen S., Zhang M., Hou X. Phosphate-solubilizing bacteria for lead heavy metal phytoremediation by reducing bermudagrass stress and enhancing lead bioaccumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025; 299: 118371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118371>
14. Płociniczak T., Sinkkonen A., Romantschuk M., Sułowicz S., Piotrowska-Seget Z. Rhizospheric Bacterial Strain *Brevibacterium casei* MH8a Colonizes Plant Tissues and Enhances Cd, Zn, Cu Phytoextraction by White Mustard. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7: 101. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00101>
15. Hui C.-y., Ma B.-c., Wang Y.-q., Yang X.-q., Cai J.-m. Designed bacteria based on natural *pbr* operons for detecting and detoxifying environmental lead: A mini-review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 267: 115662. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115662>
16. Семочкина М.А. Обзор организмов-биоремедиаторов и механизмов ферментативной биоремедиации углеводородов. *The scientific heritage*. 2017; (12–1): 17–20.
17. Qiao W. et al. Bioimmobilization of lead by *Bacillus subtilis* X3 biomass isolated from lead mine soil under promotion of multiple adsorption mechanisms. *Royal Society Open Science*. 2019; 6(2): 181701. <https://doi.org/10.1098/rsos.181701>
18. Сизенцов А.Н., Сальникова Е.В. Бактериальная ремедиация и перспективы ее использования (обзор). *Экосистемы*. 2024; 38: 150–165. <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-38-150-165>
19. Александров А.Ю. Характеристика штаммов микроорганизмов, участвующих в процессах биоремедиации. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология*. 2009; (1): 231–237. <https://www.elibrary.ru/kyfod>
20. Jing Y.-d., He Z.-l., Yang X.-e. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University-Science B*. 2007; 8(3): 192–207. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0192>
21. Qin H., Wang Z., Sha W., Song S., Qin F., Zhang W. Role of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria in Plant Machinery for Soil Heavy Metal Detoxification. *Microorganisms*. 2024; 12(4): 700. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700>
22. Rahman Z., Singh V.P. Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020; 27(22): 27563–27581. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08903-0>
23. Gallert C., Winte J. Bioremediation of soil contaminated with alkyllead compounds. *Water Research*. 2002; 36(12): 3130–3140. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00543-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00543-7)
6. Sizentsov Ya.A., Salnikova V.I., Salnikova E.V., Sizentsov A.N., Isaikina E.Yu. Geochemical characteristics of lead content on the territory of Orenburg region and assessment of its influence on the intestinal microbiota of animals. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018; (6): 142–145 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/ysucdb>
7. Nag R., Cummins E. Human health risk assessment of lead (Pb) through the environmental-food pathway. *Science of the Total Environment*. 2022; 810: 151168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151168>
8. Sokolova O.Ya., Naumenko O.A., Bibartseva E.V., Vasiliyeva T.N. Transformational ability of lead in agroecosystems of Orenburzhye. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018; (5): 40–43 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yndpcp>
9. Sanders A.P. et al. Combined exposure to lead, cadmium, mercury, and arsenic and kidney health in adolescents age 12–19 in NHANES 2009–2014. *Environment International*. 2019; 131: 104993. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104993>
10. Tang J. et al. Total arsenic, dimethylarsinic acid, lead, cadmium, total mercury, methylmercury and hypertension among Asian populations in the United States: NHANES 2011–2018. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022; 241: 113776. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113776>
11. Sarker A. et al. Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*. 2023; 332: 138861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138861>
12. Alotaibi B.S., Khan M., Shamim S. Unraveling the Underlying Heavy Metal Detoxification Mechanisms of *Bacillus* Species. *Microorganisms*. 2021; 9(8): 1628. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081628>
13. Jiang R., Zhu C., Wen S., Zhang M., Hou X. Phosphate-solubilizing bacteria for lead heavy metal phytoremediation by reducing bermudagrass stress and enhancing lead bioaccumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025; 299: 118371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118371>
14. Płociniczak T., Sinkkonen A., Romantschuk M., Sułowicz S., Piotrowska-Seget Z. Rhizospheric Bacterial Strain *Brevibacterium casei* MH8a Colonizes Plant Tissues and Enhances Cd, Zn, Cu Phytoextraction by White Mustard. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7: 101. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00101>
15. Hui C.-y., Ma B.-c., Wang Y.-q., Yang X.-q., Cai J.-m. Designed bacteria based on natural *pbr* operons for detecting and detoxifying environmental lead: A mini-review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 267: 115662. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115662>
16. Семочкина М.А. Review of bioremediators and mechanisms of enzymatic bioremediation of hydrocarbons. *The scientific heritage*. 2017; (12–1): 17–20 (in Russian).
17. Qiao W. et al. Bioimmobilization of lead by *Bacillus subtilis* X3 biomass isolated from lead mine soil under promotion of multiple adsorption mechanisms. *Royal Society Open Science*. 2019; 6(2): 181701. <https://doi.org/10.1098/rsos.181701>
18. Sizentsov A.N., Salnikova E.V. Bacterial remediation and prospects for its utilization (review). *Ekosistemy*. 2024; 38: 150–165 (in Russian). <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-38-150-165>
19. Alexandrov A.Yu. Properties of microorganisms' strains participating in bioremediation processes. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 3: Economics. Ecology*. 2009; (1): 231–237 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/kyfod>
20. Jing Y.-d., He Z.-l., Yang X.-e. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University-Science B*. 2007; 8(3): 192–207. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0192>
21. Qin H., Wang Z., Sha W., Song S., Qin F., Zhang W. Role of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria in Plant Machinery for Soil Heavy Metal Detoxification. *Microorganisms*. 2024; 12(4): 700. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700>
22. Rahman Z., Singh V.P. Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020; 27(22): 27563–27581. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08903-0>
23. Gallert C., Winte J. Bioremediation of soil contaminated with alkyllead compounds. *Water Research*. 2002; 36(12): 3130–3140. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00543-7](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00543-7)

24. Домрачева Л.И. Использование организмов и биосистем в ремедиации территорий. *Теоретическая и прикладная экология*. 2009; (4): 4–16.
<https://www.elibrary.ru/kztihp>
25. Кулакова А.Ю., Доманская О.В., Доманский В.О. Оценка эффективности влияния бактериальных штаммов, выделенных из мерзлых отложений Западной Сибири, на рост и развитие растений озимой пшеницы. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (6).
<https://www.elibrary.ru/vjpyhd>

ОБ АВТОРАХ

Алексей Николаевич Сизенцов
 кандидат биологических наук, доцент
 asizen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1099-3117>

Елена Владимировна Сальникова
 доктор биологических наук, доцент
 salnikova_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8901-1798>

Елена Александровна Осипова
 кандидат химических наук
 kudryavceva.elen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-2766>

Марина Александровна Булгакова
 кандидат биологических наук, доцент
 biosu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1238-6276>

Оренбургский государственный университет,
 пр-т Победы, 13, Оренбург, 460018, Россия

24. Domracheva L.I. Territory remediation with the help of organisms and biosystems. *Theoretical and applied ecology*. 2009; (4): 4–16 (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/kztihp>
25. Kulakova A.Yu., Domanskaya O.V., Domansky V.O. Evaluating the effectiveness of influence of bacterial strains isolated from permafrost Western Siberia to the growth and development of winter wheat. *Modern problems of science and education*. 2015; (6) (in Russian).
<https://www.elibrary.ru/vjpyhd>

ABOUT THE AUTHORS

Alexey Nikolaevich Sizentsov
 Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
 asizen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1099-3117>

Elena Vladimirovna Salnikova
 Doctor of Biological Sciences, Associate Professor
 salnikova_ev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8901-1798>

Elena Alexandrovna Osipova
 Candidate of Chemical Sciences
 kudryavceva.elen@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-2766>

Marina Aleksandrovna Bulgakova
 Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
 biosu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1238-6276>

Orenburg State University,
 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russia

PRO ЯБЛОКО

ЗДЕСЬ ФОРМИРУЕТСЯ БУДУЩЕЕ
 РОССИЙСКОГО САДОВОДСТВА

9-11 июня 2026
 МВЦ «МинводыЭКСПО»

ОРГАНИЗАТОРЫ:



ПОДРОБНАЯ
 ИНФОРМАЦИЯ
 О ВЫСТАВКЕ >

