

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАКТЕРИЙ РОДА *BACILLUS*
В БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЁННЫХ СВИНЦОМ

A.N. Sizenzov, M.A. Bulgakova, E.V. Salnikova

PROSPECTS FOR THE USE OF *BACILLUS* BACTERIA
IN BIOREMEDIATION OF LEAD-CONTAMINATED SOILS

Аннотация. Целью настоящего исследования является оценка воздействия бактериального препарата на основе *Bacillus* sp. и свинца, как по отдельности, так и в комбинации, на физиологическое состояние дождевых червей *Eisenia fetida* в контролируемых лабораторных условиях, для предварительной оценки потенциальных рисков и преимуществ применения данного бактериального штамма в биоремедиации свинец-загрязнённых почв. Выделение почвенных изолятов *Bacillus* spp. осуществляли из образцов с территории ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат. Для опыта было протестировано четыре экспериментальные группы: контроль (дистиллированная вода), *Bac*+H₂O, Pb+H₂O, Pb+*Bac*. Снижение относительной массы дождевых червей до 68,8%, относительно контроля, к 14-м суткам, зафиксировано в варианте со свинцом без бактерий (Pb+H₂O). В комбинированной группе (Pb+*Bac*) на протяжении всего периода наблюдений зарегистрировано стабильное превышение показателей, так на 3-й день масса червей превосходила контроль на 11,7%, на 14-й – на 15,6%, а к 21 суткам – 19,3%. Таким образом присутствие бактерий штамма *Bacillus licheniformis* resistantPb нивелирует токсическое действие свинца и способствующий росту червей. Исследование подтверждает целесообразность использования биологических тест-систем, в частности *Eisenia fetida*, для объективной оценки эффективности и безопасности биоремедиационных технологий. Полученные данные подчёркивают потенциал применения бактерий рода *Bacillus* для снижения фитотоксичности тяжёлых металлов и восстановления почвенных экосистем.

Ключевые слова: биоремедиация, свинец (Pb), *Bacillus*, *Eisenia fetida*, токсичность почв, биодоступность.

Сведения об авторах: Сизенцов Алексей Николаевич, ORCID: 0000-0003-1099-3117, канд. биол. наук,

Abstract. The aim of this study was to evaluate the effect of a bacterial preparation based on *Bacillus* sp. and lead, both separately and in combination, on the physiological state of *Eisenia fetida* earthworms under controlled laboratory conditions, for a preliminary assessment of the potential risks and benefits of using this bacterial strain in the bioremediation of lead-contaminated soils. Soil isolates of *Bacillus* spp. were isolated from samples from the territory of PJSC Gai Mining and Processing Plant. Four experimental groups were tested for the experiment: control (distilled water), *Bac*+H₂O, Pb+H₂O, Pb+*Bac*. A decrease in the relative weight of earthworms to 68.8%, relative to the control, by day 14 was recorded in the variant with lead without bacteria (Pb + H₂O). In the combined group (Pb + *Bac*), a consistently higher value was recorded throughout the observation period: on day 3, worm weight exceeded the control by 11.7%, on day 14 by 15.6%, and by day 21 by 19.3%. Thus, the presence of *Bacillus licheniformis*-resistantPb bacteria neutralizes the toxic effect of lead and promotes worm growth. The study confirms the feasibility of using biological test systems, in particular *Eisenia fetida*, for an objective assessment of the effectiveness and safety of bioremediation technologies. The obtained data highlight the potential of using *Bacillus* bacteria to reduce the phytotoxicity of heavy metals and restore soil ecosystems.

Keywords: bioremediation, lead (Pb), *Bacillus*, *Eisenia fetida*, soil toxicity, bioavailability.

About the authors: Alexey N. Sizenzov, ORCID: 0000-0003-1099-3117, Candidate of Biological Sciences, Orenburg State University

Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия, asizen@mail.ru; Булгакова Марина Александровна, ORCID: 0000-0002-1238-6276, канд. биол. наук, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия, biosu@mail.ru; Сальникова Елена Владимировна, ORCID: 0000-0002-8901-1798, д-р биол. наук, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, г. Оренбург, Россия, salnikova_ev@mail.ru

named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, asizen@mail.ru; Marina A. Bulgakova, ORCID: 0000-0002-1238-6276, Candidate of Biological Sciences, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, biosu@mail.ru; Elena V. Salnikova, ORCID: 0000-0002-8901-1798, Doctor of Biological Sciences, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, salnikova_ev@mail.ru

Сизенцов А.Н., Булгакова М.А., Сальникова Е.В. Перспективы применения бактерий рода *Bacillus* в биоремедиации почв, загрязнённых свинцом // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2026. № 2(74). С. 50-59. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/26-2/05>

Sizenov, A.N., Bulgakova, M.A., & Salnikova, E.V. (2026). Prospects for the Use of *Bacillus* Bacteria in Bioremediation of Lead-Contaminated Soils. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(74), 50-59. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/26-2/05>

Введение

Антропогенная деятельность, включающая промышленные выбросы, применение пестицидов и неправильную утилизацию отходов, привела к повсеместному загрязнению почв тяжёлыми металлами [3]. Свинец (Pb), как один из наиболее распространённых и опасных загрязнителей, обладает выраженными токсикологическими свойствами, негативно влияя на здоровье живых организмов и функционирование всей экосистемы [10]. Его накопление в почве нарушает микробиологическую активность, снижает плодородие и представляет прямую угрозу передачи по трофическим цепям [11]. В связи с этим разработка эффективных и устойчивых методов очистки почв от загрязнения свинцом является приоритетной задачей современной экологии и природопользования.

Фиторемедиация и химическая экстракция имеют ряд ограничений, связанных с климатическими условиями, глубиной очистки и высокой стоимостью [12]. Биоремедиация, основанная на использовании метаболического потенциала микроорганизмов и растений, предлагает экономичную и экологически дружественную альтернативу [2]. Среди микроорганизмов особый интерес представляют спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, известные своей устойчивостью к неблагоприятным условиям, высокой ферментативной активностью и способностью иммобилизовать или трансформировать тяжёлые металлы за счёт механизмов биосорбции, биопреципитации и внутриклеточного накопления [7].

Из-за высокой токсичности свинца не каждый организм способен его выдержать, но существуют несколько видов рода *Bacillus*, которые проявляют резистентность по отношению к этому металлу. Бактерии проявляют устойчивость к загрязнению свинцом за счет внеклеточного осаждения, испарения, биометилирования, связывания клеточной поверхности, внутриклеточной секвестрации и усиленной продукции сидерофора [15].

Bacillus spp. используют *pbp* оперон и активный транспорт в качестве потенциальных стратегий борьбы с токсическими эффектами Pb [4]. 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 Ван-дер-Ваальса, ковалентные или ионные связи [4].

Однако эффективность и безопасность биоремедиационных технологий требуют всесторонней оценки, включая анализ их воздействия на почвенную мезофауну, являющуюся ключевым компонентом почвообразовательных процессов. Дождевые черви *Eisenia fetida* являются стандартным тест-объектом в экотоксикологических исследованиях согласно руководствам OECD и ISO [9; 14], так как они напрямую контактируют с почвой, обладают высокой чувствительностью к загрязнителям и играют важную роль в разложении органического вещества и аэрации почвы. Параметры их выживаемости, роста и поведения служат интегральными индикаторами качества среды.

Целью данного исследования была оценка воздействия бактериального препарата на основе *Bacillus* sp. и свинца, как по отдельности, так и в комбинации, на физиологическое состояние дождевых червей *Eisenia fetida* в контролируемых лабораторных условиях, для предварительной оценки потенциальных рисков и преимуществ применения данного бактериального штамма в биоремедиации свинец-загрязнённых почв.

Материалы и методы

Предварительный этап проводимых исследований был направлен на выделение металлрезистентных в отношении свинца штаммов *Bacillus* spp. из почвенных образцов с территории ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат», отобранных методом конверта. Выделение почвенных изолятов *Bacillus* spp. осуществляли путем термической обработки 100 г. средней навески в водяной бане при температуре 98°C в течении 90 минут. Один грамм навески почвенного образца суспендировали в 10 мл стерильной дистиллированной воды и проводили серию последовательных разведений от 1:10 до 1:10000. Высев исследуемых микроорганизмов осуществляли на накопительные питательные среды (ГРМ-агар Оболенск: панкреатический гидролизат рыбной муки, натрия хлорид, агар микробиологический), путем переноса 100 мкл суспензии с последующим инкубированием культуры при температуре 37°C в течение 24 часов и идентификацией микроорганизмов на основании культуральных характеристик и окраски по Граму.

Предварительную оценку уровня резистентности выделенных изолятов к химическим соединениям свинца с высоким уровнем диссоциации в водных растворах ($Pb(NO_3)_2$, $Pb(CH_3COO)_2$) осуществляли с использованием метода диффузии в агар (метод лунок) в комбинации с методом серийных разведений. В чашки Петри заливали 20 мл стерильного агаризованного субстрата (ГРМ-агар) с содержанием агар-агара 2,5%. На поверхность субстрата осуществляли высев исследуемых смешанных культур микроорганизмов рода

Bacillus spp. «газоном» путем переноса 100 мкл суспензии по МакФарланду (OD 0,1 при длине волны 625 нм). Микробиологическим пробойником в толще субстрата вырезали лунки, в которые вносили по 30 мкл исследуемых растворов с последующим инкубированием микроорганизмов в термостате при температуре 37°C в течение 24 часов. Учет реакции производили путем замера зон ингибирования роста микроорганизмов. Для отбора колоний обладающих высоким потенциалом металлрезистентности использовали метод «реплик» (метод Ледерберга). Специфика метода заключается в переносе популяции бактериальных клеток с одной чашки Петри на множество других с разными концентрациями исследуемых химических соединений, что в свою очередь позволяет быстро находить микроорганизмы, способных расти в присутствии в субстратах с высоким уровнем катионной нагрузки.

Для идентификации выделенных изолятов до уровня вида использовали метод MALDI-TOF масс-спектрометрия. При проведении MALDI-анализа выделенные изолированные культуры микроорганизмов смешивали с матрицей, обладающей оптической абсорбцией в диапазоне используемых длин волн. Процессинг интактных микроорганизмов в MALDI-TOF проводился с предварительной пробоподготовкой включающей добавление спирта, так как анализируемые микроорганизмы обладают высокой спорулирующей способностью. Анализ включал измерение размера и интенсивности пиков обнаруженных молекул с последующей идентификацией на основании выраженных различий маркеров «отпечатков пальцев» биоаналитов [1].

Подготовку чистой культуры *B. licheniformis* resistantPb осуществляли культивированием популяции бактериальных клеток в течение 48 часов на накопительных питательных средах, в качестве которых использовали ГРМ-агар, до наступления стационарной фазы роста. По окончании этапа культивирования биомассу клеток смывали с поверхности питательной среды путем добавления 2 мл стерильного 0,7% раствора NaCl с удалением биомассы стерильным шпателем Дригальского. Биомассу суспендировали в стерильных колбах с доведением оптической плотности до значения 0,1 OD при длине волны 625 нм, что соответствует степени разведения 0,5 по МакФарланду или $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл. Полученную суспензию вносили в почвенные образцы, в дозировке 100 мл/кг почвы, подвергнутые предварительному загрязнению свинцом в дозе 10 ПДК для почв (60 мг/кг), соответствующей выбор а в качестве источника факториальной ксенобиотической нагрузки использовали водный раствор $Pb(CH_3COO)_2$ (ЧДА) (0,1098 г/ кг почвы) выбор которого обусловлен тем, что анионный компонент оказывает минимальное влияние на тестируемый штамм в условиях модельного эксперимента.

В работе использовались четыре экспериментальные группы:

1. Контроль: внесение в почву 50 мл дистиллированной воды с дальнейшим перемешиванием до однородности.
2. Вариант 1 (*Bac*): внесение в почву 25 мл суспензии бактерий *Bacillus* sp. + 25 мл дистиллированной воды с дальнейшим перемешиванием до однородности.

3. Вариант 2 (Pb): внесение в почву 25 мл раствора свинца (Pb) + 25 мл дистиллированной воды с дальнейшим перемешиванием до однородности.

4. Вариант 3 (Pb+Bac): внесение в почву 25 мл раствора свинца, перемешивание образца, внесение 25 мл суспензии *Bacillus* sp. и повторное перемешивание.

Влажность почв корректировалась дважды в неделю путём добавления дистиллированной воды. После тщательного перемешивания субстрата с тестируемыми растворами в каждую ёмкость помещали по 10 здоровых половозрелых особей *Eisenia fetida* с развитым клителлумом, стандартизированных по размеру и массе. В течение всего 21-дневного эксперимента червей еженедельно докармливали овсяной мукой из расчёта 0,5 г на червя.

Наблюдения и измерения проводились на 3, 7, 14 и 21 сутки эксперимента. Регистрировались особенности поведения, выживаемость и масса червей. Обработка данных включала расчёт процентного изменения массы тела червей относительно контрольной группы и относительно их исходной массы на первые сутки эксперимента.

Статистическая обработка данных выполнена с расчётом средней арифметической и стандартной ошибки (SE).

Результаты и обсуждение

В рамках предварительных исследований, направленных на выделение и идентификацию почвенных изолятов микроорганизмов рода *Bacillus*, методом Ледерберга («реплик») с использованием насыщенных субстратов (ГРМ-агар с добавлением $Pb(CH_3COO)_2$ (ЧДА) в дозах 0,250 моль, 0,125 моль и 0,063 моль) выделен штамм проявляющий максимальные показатели металлтолерантности, идентифицированный как *B. licheniformis* resistantPb. Проведенный сравнительный анализ устойчивости данного штамма к химическим соединениям свинца, позволил установить пороговые значения минимальных ингибирующих доз, так в отношении $Pb(CH_3COO)_2$ она составила 0,125 моль, $Pb(NO_3)_2$ – 0,063 моль соответственно (табл. 1).

Важнейшим показателем приемлемости условий эксперимента и острой токсичности является выживаемость тест-организмов. В течение 21 дня эксперимента в контрольных ёмкостях не было зафиксировано ни одной гибели червей. Эталонная выживаемость в 100% сохранилась и во всех опытных вариантах (Bac, Pb, Pb+Bac). Для оценки стимулирующего или угнетающего влияния обработок на рост червей был проведён анализ изменения их массы в процентах к среднему значению массы червей в контроле на соответствующие сутки (табл. 2).

Таблица 1

**Сравнительный анализ токсичности исследуемых соединений свинца
в отношении *B. licheniformis resistantPb***

соединения свинца					
Pb(CH ₃ COO) ₂			Pb(NO ₃) ₂		
Моль	концентрация Pb, г/М	зона ингибирования роста, мм	Моль	концентрация Pb, г/М	зона ингибирования роста, мм
1,000	63,697	31,26±0,51	1,000	62,559	33,58±0,95
0,500	31,849	23,49±0,45***	0,500	31,280	27,74±0,53**
0,250	15,924	14,92±0,63***	0,250	15,540	20,30±0,43***
0,125	7,962	9,22±0,31***	0,125	7,820	15,52±0,46***
0,063	3,981	R	0,063	3,910	8,91±0,28***
0,031	1,991	R	0,031	1,955	R
0,016	0,995	R	0,016	0,978	R

Примечание: **p<0,01; *** p<0,001 (относительно предыдущей концентрации); R – резистентность (отсутствие зон ингибирования роста)

Таблица 2

Набор массы дождевых червей относительно контроля, %

Раствор / сутки	3	7	14	21
<i>Vac</i>	87,8±2,0	83,5±1,7	101,9±6,3*	104,3±4,8
Pb	117,1±4,5	104,8±7,6	68,8±2,3**	83,9±4,6*
Pb+ <i>Vac</i>	111,7±3,9	97,8±5,5	115,6±8,6	119,3±7,5

Примечание: *p<0,05; ** p<0,01

В экспериментальной группе *Vac* на 7 сутки отмечено незначительное снижение массы дождевых червей относительно контрольной группы, но к 14 суткам *Eisenia fetida* адаптируется к изменению микробного состава субстрата и показатели массы начинают превышать показатели контроля. Полученные результаты коррелируют с литературными данными и дают возможность предположить благоприятное влияние на загрязненные почвы бактериальной инокуляции в отдаленной перспективе [7].

Вариант опыта Pb оказал наиболее выраженное токсическое воздействие на культуру *Eisenia fetida*. В первые 7 суток эксперимента было отмечено существенное превышение контрольных значений (104,8%), однако уже к 14-му дню опыта масса червей резко сократилась до 68,8% и несмотря на то, что к концу наблюдений зарегистрирована частичная компенсация массы (83,9%), она оставалась ниже контрольного уровня. Проявленная динамика массы червей соответствует картине проявления токсического стресса [10].

Важнейший результат опыта был получен в комбинированной группе Pb+*Vac*. На протяжении всего периода наблюдений зарегистрировано стабильное превышение показателей, так на 3-й день масса червей превосходила контроль на 11,7%, на 14-й – на 15,6%, а к 21 суткам – 19,3%. Таким образом присутствие бактерий штамма *B. licheniformis resistantPb* нивелирует токсическое действие свинца и стимулирует рост.

Наблюдение за изменением массы тела относительно первых суток позволяет зарегистрировать динамику биомассы во всех опытах в ходе эксперимента (табл. 3).

Таблица 3

Динамика массы дождевых червей относительно первых суток, %

Раствор / сутки	3	7	14	21
<i>Bac</i>	98,5±5,9	96,4±5,8	88,1±6,9	103,1±8,4
Pb	90,7±7,0	95,1±6,3	86,4±5,4	103,8±6,6
Pb+ <i>Bac</i>	92,7±6,8	91,3±7,6	50,0±3,1**	122,7±8,2***

Примечание: ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

В группах с *B. licheniformis* resistantPb и свинцом к 14-му дню было зарегистрировано снижение массы относительно первых суток 88,1% и 86,4% соответственно. В варианте Pb+*Bac* несмотря на значительную утрату массы к 14-м суткам (50,0%), к концу опыта был отмечен рост показателя до 122,7%.

Таким образом, присутствие бактерий штамма *B. licheniformis* resistantPb в червеобитаемом субстрате не только останавливает существенное сокращение массы червей в следствии воздействия свинца, но и обеспечивает стабильное превышение контрольных значений на протяжении эксперимента. Биосорбционные свойства бактерии либо позволяют им связывать ионы свинца на поверхности клеток, либо переводят их малодоступные формы посредством биопреципитации, что, в любом из возможных вариантов, снижает фактическую концентрацию токсиканта в почвенном растворе [8; 16]. Кроме вышеобозначенного можно предположить, что бактериальная деструкция органического вещества почв сокращает энергетические затраты червей, что, вероятно, позволяет компенсировать затраты организма на стресс-реакцию [5; 6].

Заключение

Подводя итог можно говорить о том, что к 14-м суткам свинец ингибирует набор биомассы дождевыми червями подтверждая тем самым, свое токсическое воздействие. Однако, внесение *B. licheniformis* resistantPb в загрязненную свинцом почву нивелирует негативный эффект металла, что отражается в наборе массы червей, достигающей к 21-м суткам 119,3% относительно контроля. Полученные результаты свидетельствуют о высоком биоремедиационном потенциале исследованного штамма бактерий рода *Bacillus*, способного эффективно снижать токсичность свинца для почвенной мезофауны и стимулировать ее рост. Исследование подтверждает целесообразность использования биологических тест-систем, в частности *Eisenia fetida*, для объективной оценки эффективности и безопасности биоремедиационных технологий [5].

Перспективы дальнейших исследований должны быть направлены на изучение молекулярных механизмов взаимодействия штамма *B. licheniformis* resistantPb как с ионами свинца (иммобилизация, трансформация), так и с организмом дождевых червей. Необходимы прямые химические анализы содержания подвижных форм Pb в почве в

динамике, а также исследования на клеточном и биохимическом уровнях для полного раскрытия природы протекторного эффекта.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания (FSGU-2023-0007)
соглашение с Минобрнауки России от 15.11.2023 № 075-03-2023-012/8*

Литература

1. Баранцевич Е.П. Применение MALDI–TOF масс-спектрометрии в клинической микробиологии // Трансляционная медицина. 2014. № 6. С. 23-28.
2. Ahemad M., Kibret M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective // Journal of King Saud University – Science. 2014. Vol. 26, № 1. P. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
3. Asif L., Tehami S., Qadeer Y.K., Virani S.S., Lavie C.J., Krittanawong C. Toxic Grounds: A Narrative Review of the Role of Heavy Metal Soil and Water Contamination in Cardiovascular Disease Development // Heart and Mind. 2025. Vol. 9, № 6. P. 527-537. <https://doi.org/10.4103/hm.HM-D-24-00108>
4. Alotaibi B.S., Khan M., Shamim S. Unraveling the Underlying Heavy Metal Detoxification Mechanisms of *Bacillus* Species // Microorganisms. 2021. Vol. 9, № 8. P. 1628. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081628>
5. Calabrese E.J., Baldwin L.A. Hormesis: the dose-response revolution // Annual Review of Pharmacology and Toxicology. 2003. Vol. 43, № 1. P. 175-197. <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223>
6. Christopher J.M., Sridharan R., Somasundaram S., et al. Bioremediation of aromatic hydrocarbons contaminated soil from industrial site using surface modified amino acid enhanced biosurfactant // Environmental Pollution. 2021. Vol. 289. P. 117917. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117917.7>
7. Dixit R., Malaviya D., Pandiyan K., Singh U.B., Sahu A., Shukla R., Singh B.P., Rai J.P., Sharma P., Lade H., Paul D. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes // Sustainability. 2015. Vol. 7, № 2. P. 2189-2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>
8. Gadd G.M. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation // Microbiology. 2010. Vol. 156, № 3. P. 609-643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>
9. ISO. ISO 11268-1:1993 Soil quality – Effects of pollutants on earthworms – Part 1: Determination of acute toxicity to *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*. Geneva: International Organization for Standardization, 1993.
10. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. <https://doi.org/10.1201/b10158>
11. Ma Y., Oliveira R.S., Freitas H., Zhang C. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation // Frontiers in Plant Science. 2016. Vol. 7. P. 918. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00918>

12. Mulligan C.N., Yong R.N., Gibbs B.F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation // *Engineering Geology*. 2001. Vol. 60, № 1-4. P. 193-207. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00101-0)
13. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2010. Vol. 8, № 3. P. 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
14. OECD. Test No. 222: Earthworm Reproduction Test (*Eisenia fetida/Eisenia andrei*). OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. Paris: OECD Publishing, 2004. <https://doi.org/10.1787/9789264070325-en>
15. Sahoo S., Goli D. Bioremediation of lead by a halophilic bacteria *Bacillus pumilus* isolated from the mangrove regions of Karnataka // *International Journal of Scientific Research*. 2020. Vol. 9, № 7. P. 1337-1343.
16. Van Gestel C.A. Soil ecotoxicology: state of the art and future directions // *ZooKeys*. 2012. № 176. P. 275-296. <https://doi.org/10.3897/zookeys.176.2275>

References

1. Barancevich, E.P. (2014). Primenenie MALDI–TOF mass–spektrometrii v klinicheskoy mikrobiologii. *Translyacionnaya medicina*, 6, 23-28. (in Russ.).
2. Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *Journal of King Saud University – Science*, 26(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
3. Asif, L., Tehami, S., Qadeer, Y.K., Virani, S.S., Lavie, C.J., & Krittanawong, C. (2025). Toxic grounds: A narrative review of the role of heavy metal soil and water contamination in cardiovascular disease development. *Heart and Mind*, 9(6), 527-537. <https://doi.org/10.4103/hm.HM-D-24-00108>
4. Alotaibi, B.S., Khan, M., & Shamim, S. (2021). Unraveling the underlying heavy metal detoxification mechanisms of *Bacillus* species. *Microorganisms*, 9(8), 1628. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081628>
5. Calabrese, E.J., & Baldwin, L.A. (2003). Hormesis: the dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 43(1), 175-197. <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223>
6. Christopher, J.M., Sridharan, R., Somasundaram, S., et al. (2021). Bioremediation of aromatic hydrocarbons contaminated soil from industrial site using surface modified amino acid enhanced biosurfactant. *Environmental Pollution*, 289, 117917. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117917>
7. Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U.B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B.P., Rai, J.P., Sharma, P., Lade, H., & Paul, D. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7(2), 2189-2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>

8. Gadd, G.M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609-643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>
9. ISO. (1993). ISO 11268-1:1993 Soil quality – Effects of pollutants on earthworms – Part 1: Determination of acute toxicity to *Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*. *International Organization for Standardization*.
10. Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
11. Ma, Y., Oliveira, R.S., Freitas, H., & Zhang, C. (2016). Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 7, 918. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00918>
12. Mulligan, C.N., Yong, R.N., & Gibbs, B.F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60(1-4), 193-207. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00101-0)
13. Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., & Sreekanth, T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3), 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
14. OECD. (2004). Test No. 222: Earthworm reproduction test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*). OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264070325-en>
15. Sahoo, S., & Goli, D. (2020). Bioremediation of lead by a halophilic bacteria *Bacillus pumilus* isolated from the mangrove regions of Karnataka. *International Journal of Scientific Research*, 9(7), 1337-1343.
16. Van Gestel, C.A. (2012). Soil ecotoxicology: state of the art and future directions. *ZooKeys*, (176), 275-296. <https://doi.org/10.3897/zookeys.176.2275>

дата поступления: 19.03.2026

дата принятия: 27.05.2026

© Сизенцов А.Н., Булгакова М.А., Сальникова Е.В., 2026