Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240508
EDN: https://elibrary.ru/pfuwpx
УДК 332.368:57.084.1:633.16:579.222

Научная статья

Биоремедиация нефтезагрязненной почвы, содержащей повышенные концентрации хлорида натрия и тяжелых металлов

Е.В. Кузина*, С.Р. Мухаматдьярова, М.Г. Искужина, Ю.Ю. Шарипова, Т.Ю. Коршунова

Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, 450054, Россия, г. Уфа, Пр. Октября, д. 69, лит. Е

**lab.biotech@yandex.ru*

Аннотация. Изучение влияния тяжелых металлов и хлорида натрия на окислительную активность штаммов-нефтедеструкторов рода *Acinetobacter* показало, что бактерии сохраняют способность к биодеградации нефти при концентрации ионов свинца и цинка до 1000 и 125 мг/л соответственно, хлорида натрия – до 3% масс. Присутствие нефти (5% об.) и хлорида натрия (3% масс.) не оказывало влияния на синтез микроорганизмами индолил-3-уксусной кислоты, добавление в питательную среду солей свинца и цинка стимулировало выработку данного фитогормона. В модельном эксперименте была исследована возможность применения штаммов *Acinetobacter*, а также ассоциаций этих бактерий и растений ячменя для восстановления почв, загрязненных нефтью (50 г/кг), в том числе совместно с другими поллютантами: свинцом (200 мг/кг), цинком (300 мг/кг), хлоридом натрия (5 г/кг). Внесение штаммов *Acinetobacter* в загрязненную почву увеличивало массу побегов ячменя на 20.8–38.9% по сравнению с необработанными растениями. При контаминации почвы только нефтью за счет бактеризации масса корней увеличилась на 11.7–23.1%, нефтью и тяжелыми металлами – на 23.2–33.5% соответственно. В присутствии свинца, цинка и хлорида натрия эффективность биодеградации углеводородов оказалась выше, чем в варианте, где почва была загрязнена только нефтью. За 70 суток эксперимента при совместном использовании растений и бактерий содержание нефти в почве снизилось с 50.0 г/кг до 8.0–10.5 г/кг почвы.

Ключевые слова: нефть, цинк, свинец, засоление, *Acinetobacter*, ячмень, биодеструкция, растительно-микробное взаимодействие

Финансирование. Исследование выполнено с использованием оборудования РЦКП «Агидель» в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме № 122031100163-4 на базе УИБ УФИЦ РАН.

ORCID:
Е.В. Кузина, https://orcid.org/0000-0002-6905-0108
С.Р. Мухаматдьярова, https://orcid.org/0000-0001-7641-7943
М.Г. Искужина, https://orcid.org/0000-0003-0196-9596

Ю.Ю. Шарипова, https://orcid.org/0000-0002-1794-5137
Т.Ю. Коршунова, https://orcid.org/0000-0002-6186-0827

Для цитирования: Кузина, Е.В. и др., 2025. Биоремедиация нефтезагрязненной почвы, содержащей повышенные концентрации хлорида натрия и тяжелых металлов. *Трансформация экосистем* **8** (4), 189–204. https://doi.org/10.23859/estr-240508

Поступила в редакцию: 08.05.2024
Принята к печати: 08.11.2024
Опубликована онлайн: 12.12.2025

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240508
EDN: https://elibrary.ru/pfuwpx
UDC 332.368:57.084.1:633.16:579.222

Article

Bioremediation of oil-contaminated soil containing elevated concentrations of sodium chloride and heavy metals

E.V. Kuzina*, S.R. Mukhamatdyarova, M.G. Iskuzhina, Yu.Yu. Sharipova, T.Yu. Korshunova

Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Prospekt Oktyabrya St. 69, lit. E, Ufa, 450054 Russia

**lab.biotech@yandex.ru*

Abstract. The study of the effect of heavy metals and sodium chloride on the oxidative activity of oil destructor strains of the genus *Acinetobacter* showed that the bacteria retain the ability to biodegrade oil at concentrations of lead and zinc ions up to 1000 and 125 mg/l, respectively, and sodium chloride up to 3% by weight. The presence of oil (5% by volume) and sodium chloride (3% by weight) did not affect the synthesis of indolyl-3-acetic acid by microorganisms, the addition of lead and zinc salts to the nutrient medium stimulated the production of this phytohormone. In a model experiment, the possibility of using *Acinetobacter* strains, as well as associations of these bacteria and barley plants, to restore soils contaminated with oil (50 g/kg), also including (together with other pollutants): lead (200 mg/kg), zinc (300 mg/kg), and sodium chloride (5 g/kg). The introduction of *Acinetobacter* strains into contaminated soil increased the mass of barley shoots by 20.8–38.9% compared with untreated plants. When the soil was contaminated with oil alone, due to bacterization, the root mass increased by 11.7–23.1%, and when contaminated with oil and heavy metals – by 23.2–33.5%. In the presence of lead, zinc and sodium chloride, the efficiency of hydrocarbon biodegradation turned out to be higher than in the variant where the soil was contaminated only with oil. During 70 days of the experiment, with the combined use of plants and bacteria, the oil content in the soil decreased from 50.0 g/kg to 8.0–10.5 g/kg of soil.

Keywords: oil, zinc, lead, salinization, *Acinetobacter*, barley, biodegradation, plant-microbial interaction

Funding. The study was carried out using the equipment of the Regional Center for Collective Use “Agidel” within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic № 122031100163-4 on the basis of the Ufa Institute of Biology.

ORCID:
E.V. Kuzina, https://orcid.org/0000-0002-6905-0108
S.R. Mukhamatdyarova, https://orcid.org/0000-0001-7641-7943
M.G. Iskuzhina, https://orcid.org/0000-0003-0196-9596
Yu.Yu. Sharipova, https://orcid.org/0000-0002-1794-5137
T.Yu. Korshunova, https://orcid.org/0000-0002-6186-0827

To cite this article: Kuzina, E.V. et al., 2025. Bioremediation of oil-contaminated soil containing elevated concentrations of sodium chloride and heavy metals. *Ecosystem Transformation* **8** (4), 189–204. https://doi.org/10.23859/estr-240508

Received: 08.05.2024
Accepted: 08.11.2024
Published online: 12.12.2025

Введение

В большинстве случаев загрязнение окружающей среды носит комплексный полихимический характер. При сочетанном воздействии контаминантов токсический эффект на объекты живой природы, как правило, усиливается. Таким образом, одновременное присутствие в почве нефти и других поллютантов (тяжелых металлов (ТМ), хлоридов и др.) является серьезной экологической проблемой, особенно актуальной для сельскохозяйственных угодий, соседствующих с районами нефтедобычи (Сулейманов и др., 2018; Тафеева и др., 2016; Khudur et al., 2018).

В России проблема загрязнения ТМ стоит достаточно остро. Чаще всего обнаруживается превышение гигиенических нормативов цинка, свинца и кадмия (Пищик и др., 2016). Несмотря на то, что цинк является эссенциальным элементом, его избыточное содержание в окружающей среде может приводить к нарушениям нормального физиологического состояния живых организмов (Головин и др., 2021; El-Agawany and Kaamoush, 2023).

Известно, что загрязнению почвы углеводородами может сопутствовать засоление грунтов, обусловленное поступлением легкорастворимых солей из минерализованных вод (Сулейманов и др., 2018; Camacho-Montealegre et al., 2021). При этом высокое содержание токсичных ионов отрицательно сказывается на численности чувствительных микроорганизмов, ингибирует активность почвенных ферментов, подавляет рост и развитие большинства сельскохозяйственных культур (Кузина и др., 2023; Федорова и др., 2015).

Существуют различные подходы к очистке природной среды. Основные выводы, полученные исследователями при изучении процессов детоксикации почв, сводятся к следующему. Растения значительно уступают микроорганизмам по скорости деградации и полноте утилизации органических загрязнителей (Анохина и др., 2018; Kuzina et al., 2021). Тяжелые металлы, в отличие от нефтепродуктов, не подвергаются процессам разложения, а лишь перераспределяются между природными объектами (Бабаев и др., 2015; Khalid et al., 2017). Металло-резистентные ризосферные бактерии могут оказывать определенное воздействие на поступление ТМ в растения (Анохина и др., 2018), в том числе аккумулируя данные соединения (Бузолёва и Кривошеева, 2013). Эффективность биологической очистки засоленных почв можно улучшить за счет внесения бактерий-деструкторов, толерантных к повышенной минерализации среды (Ястребова и Плотникова, 2007). При микробной ремедиации существует проблема сохранения интродуцированных штаммов в открытой экосистеме. Поскольку ризосфера как естественная среда способствует поддержанию высокой численности популяции микроорганизмов, наиболее эффективным вариантом восстановления загрязненных почв представляется использование растительно-микробных комплексов (Домрачева и др., 2022).

Значительное количество публикаций посвящено влиянию загрязнения окружающей среды на состав почвенной микробиоты: как правило, оно приводит к уменьшению численности полезных ризосферных бактерий и увеличению количества фитопатогенных микроорганизмов (Jiao et al., 2019;

Li et al., 2022; Sazykina et al., 2022). Очевидно, что в таких условиях интродукция бактерий, стимулирующих рост растений (PGPB), вполне оправдана, поскольку позволяет растениям не только легче справляться со стрессом, вызванным загрязнением почвы, но и эффективнее участвовать в процессе ее ремедиации. Известно, что искусственные микробно-растительные ассоциации отличаются сравнительно высокой адаптивностью к неблагоприятным условиям, однако некоторые факторы (влажность, физико-химические свойства почвы, состав и уровень загрязнения) могут негативно влиять на эффективность взаимодействия внесенных PGPB и растений (Анохина и др., 2018).

Целью данной работы являлось изучение возможности применения штаммов рода *Acinetobacter*, а также ассоциаций этих бактерий и растений ячменя для восстановления комплексно загрязненных почв. В качестве основного загрязнителя выступала нефть, сопутствующими ей поллютантами были свинец, цинк и хлорид натрия.

Материал и методы

В исследовании были задействованы штаммы из коллекции микроорганизмов Уфимского Института биологии УФИЦ РАН *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22 и UOM 29, а также *A. courvalinii* UOM 35, выделенные из почвенных образцов с территории Республики Башкортостан. Данные штаммы характеризуются способностью к биодеструкции нефти при 24 °С и 8 °С, синтезу индолил-3-уксусной кислоты (ИУК), устойчивостью к NaCl и ионам ТМ (Коршунова и др., 2024).

Для изучения влияния хлорида натрия и ионов ТМ на деструкцию нефти бактерии культивировали в жидкой среде Раймонда (Raymond, 1961) на термостатируемом шейкере (160 об/мин, температура +28 °С). Нефть вносили в стерильную питательную среду в количестве 5% об. Хлорид натрия, ацетат свинца и сульфат цинка добавлялись с учетом данных об устойчивости штаммов к NaCl, Pb^{2+} и Zn^{2+} (Коршунова и др., 2024): 3% масс. хлорида натрия, 1000 мг/л ионов свинца, 125 мг/л ионов цинка. Через 5 суток культивирования парафиново-нафтеновую фракцию нефти экстрагировали гексаном и анализировали на газовом хроматографе («Кристалл Люкс 4000», Россия) с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой Zebron™ ZB-1XT (30 м × 0.53 мм × 2.65 мкм; начальная температура колонки +100 °С, скорость нагрева 5 °С/мин, конечная температура +270 °С, газ-носитель – гелий). Степень биодеструкции нефти (%) рассчитывали на основе хроматографических данных по методу внутренней нормализации в соответствии с инструкциями к прибору (Борзенков и др., 2006).

Содержание ИУК в культуральной жидкости штаммов в присутствии нефти, ТМ и хлорида натрия определяли хроматографически (Стариков и Четвериков, 2020). Бактерии выращивали в течение 5 суток при 28 °С на среде с глюкозой (Дзержинская, 2008) с добавлением соответствующих веществ: нефть 5% об., Pb^{2+} 1000 мг/л, Zn^{2+} 125 мг/л, NaCl 3% масс.

Способность культур к синтезу биосурфактантов оценивали по эмульгирующей активности (E_{24}) в отношении *н*-гексадекана (Мухаматдьярова и др., 2024).

Модельный эксперимент по очистке почвы, загрязненной нефтью и сопутствующими ей поллютантами, проводили в лабораторных условиях. Использовали чернозем оподзоленный (Luvic Phaeozems) (верхний горизонт (0–20 см)), отобранный на территории Балтачевского района Республики Башкортостан со следующими характеристиками: гумус – 9.5%, pH_{KCl} – 5.9, $N_{общ}$ – 0.5%, $P_{вал}$ – 0.2%, $K_{вал}$ – 1.6%.

Опыт проходил в два этапа. На первом этапе оценивали влияние интродукции штаммов рода *Acinetobacter* на снижение содержания нефти в почве в присутствии избыточного количества NaCl и ТМ. В пластиковые контейнеры помещали 1 кг смеси почвы с песком (10% масс.), загрязненной нефтью Мамонтовского месторождения (Нефтеюганский район, ХМАО – Югра) в количестве 50 г/кг. Характеристики нефти: плотность – 0.885 г/см^3, содержание серы – 1.2%, парафинов – 3.3%, смол – 7.9%, асфальтенов – 3.1%. Далее вносили NaCl (5 г/кг) или соли ТМ. Загрязнение почвы свинцом (в виде ацетата) и цинком (в виде сульфата) проводили в дозах, превышающих ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) (СанПиН 1.2.3685-21)[1]: 200 и 300 мг/кг соответственно. Химический анализ почвы до начала эксперимента показал, что содержание свинца и цинка в ней не превышало ОДК и находилось на уровне 12.1 и 26.2 мг/кг соответственно.

Эксперимент проводили в трех повторностях. Обработку почвы микроорганизмами осуществляли дважды: в начале эксперимента и на 21 сутки – из расчета 10^6 КОЕ/г почвы. С этой целью

[1] СанПиН 1.2.3685-2. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

использовали жидкую культуру бактерий, выращенную на мясо-пептонном бульоне (Дзержинская, 2008) в течение трех суток при 28 °С. Для сравнения служила нефтезагрязненная почва, в том числе с добавками хлорида натрия, ацетата свинца и сульфата цинка, но без бактеризации.

Каждые 7 дней почву перемешивали и поливали до 60% от полной влагоемкости. Учет численности основных эколого-трофических групп микроорганизмов осуществляли путем посева почвенной суспензии на агаризованные питательные среды: аммонификаторов – на мясо-пептонный агар, микромицетов – на среду Чапека, азотфиксирующих – на среду Эшби, углеводородокисляющих – на среду Раймонда, олиготрофов – на голодный агар, амилолитических – на крахмально-аммиачный агар, фосфатрастворяющих – на среду Пиковской, целлюлозоразлагающих – на среду Гетчинсона (Дзержинская, 2008; Пиковская, 1948). Общая продолжительность первого этапа эксперимента составила 42 суток.

Задачей второго этапа эксперимента было изучение эффективности доочистки загрязненной почвы с помощью комбинаций тех же штаммов бактерий с растениями ячменя. Использовали растения ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) сорта «Челябинский 99». Выбор последнего в качестве фиторемедианта обусловлен нашими предыдущими исследованиями (Kuzina et al., 2021), в которых он хорошо зарекомендовал себя как компонент микробно-растительных комплексов для очистки нефтезагрязненной почвы. Для проведения второго этапа почвой из контейнеров (см. первый этап) заполняли пластиковые стаканы, в которые затем высаживали по 6 штук 3-х суточных проростков ячменя. Через 7 суток после этого почву в стаканах обрабатывали жидкой культурой тех же бактерий, которые были использованы на первом этапе эксперимента (из расчета 10^6 КОЕ/г почвы). Растения выращивали при комнатной температуре (+22...+24 °С) в условиях светоплощадки при интенсивности светового потока 240 мкмоль · $м^{-2}$ · $с^{-1}$ ФАР, 14-часовом фотопериоде, влажность почвы поддерживали на уровне 60% от полной влагоемкости. Продолжительность второго этапа эксперимента составила 28 суток.

После завершения опыта определяли сухую массу побегов и корней растений. Для этого каждое растение разделяли на побеги и корни. Образцы высушивали в фольге при +70 °С в течение 48 ч в сухожаровом шкафу и взвешивали на аналитических весах.

Эффективность использованных в данной работе микробно-растительных ассоциаций оценивали по убыли нефтяных углеводородов в почве и по количеству ТМ, накопленных растениями.

Содержание нефтепродуктов в почве в конце первого (42 суток) и второго (70 суток) этапов эксперимента устанавливали гравиметрически согласно ПНД Ф 16.1.41–04[2].

Содержание ТМ в растениях определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией («Квант-Z-ЭТА», Россия) согласно методическим указаниям[3].

Статистическую обработку осуществляли с применением стандартных программ MS Excel 2019. Данные представлены как среднее ± стандартная ошибка среднего. Для оценки достоверности различий использовали t-критерий Стьюдента ($p \leq 0.05$).

Результаты и обсуждение

Штаммы бактерий *Acinetobacter*, задействованные в эксперименте, ранее были проверены на устойчивость к повышенному содержанию ТМ, а также NaCl (Коршунова и др., 2024). В ходе настоящей работы было установлено, что все три штамма способны сохранять способность к разложению углеводородов нефти в присутствии солей свинца и цинка, а также хлорида натрия (Табл. 1).

Концентрация хлорида натрия в жидкой среде 3% масс. оказывала выраженное негативное воздействие на биодеструкцию нефти. В наибольшей степени способность к этому процессу сохранялась у штамма *A. courvalinii* UOM 35.

При наличии ионов свинца (1000 мг/л) и цинка (125 мг/л) способность бактерий к разложению нефти уменьшалась, но оставалась на достаточно высоком уровне (Табл. 1). При этом сульфат цинка был более токсичен для микроорганизмов, чем ацетат свинца. Вероятно, это объясняется тем, что цинковая соль серной кислоты имеет более выраженную диссоциацию водного раствора, вследствие чего высвобождение компонентов с ингибирующим эффектом происходит интенсивнее. В литературе приводятся аналогичные данные о воздействии солей металлов на бакте-

[2] ПНД Ф 16.1.41–04. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом.

[3] Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства, 1992. ЦИНАО, Москва, 61 с.

Табл. 1. Деструкция нефти в жидкой среде в присутствии ТМ и хлорида натрия, %; * – согласно Т.Ю. Коршуновой и др. (2024).

Штамм	Нефть 5% об.	Нефть + Pb^{2+} 1000 мг/л	Нефть + Zn^{2+} 125 мг/л	Нефть + NaCl 3% масс.
UOM 22	93.0*	81.0	69.5	41.8
UOM 29	95.6*	91.0	82.1	59.6
UOM 35	95.9*	86.5	84.3	77.5

рии рода *Bacillus* (Бузолёва и Кривошеева, 2013), где свинец в меньшей степени по сравнению с другими ТМ (Zn^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+}, Cd^{2+}) тормозит рост микроорганизмов и наиболее активно поглощается (адсорбируется) ими.

Присутствие нефти, ТМ и хлорида натрия в использованных концентрациях не оказывало ингибирующего действия на выработку бактериями ИУК (Табл. 2). Напротив, у штамма UOM 29 цинк стимулировал способность к образованию этого фитогормона, продукция которого выросла в 4.7 раза. В присутствии свинца его количество в культуральной жидкости штаммов UOM 29 и UOM 35 также увеличилось в 3.5 и 5.4 раза соответственно.

В противоположность выше представленным данным, в лабораторном эксперименте по очистке почвы от сочетанного загрязнения скорость биодеградации углеводородов нефти в присутствии свинца, цинка и хлорида натрия была выше, чем в вариантах, где почва была загрязнена только нефтью (Табл. 3). Вероятная причина этого заключается в следующем. Известно, что микроорганизмы при взаимодействии с ионами ТМ способны их накапливать, чтобы поддерживать нормальное функционирование ферментных систем. Параллельно с накоплением ТМ происходит процесс их детоксикации. В результате окислительно-восстановительных реакций металлы переходят из ионной формы в металлическую, образуя комплексы с органическими и неорганическими соединениями, понижая таким образом свою токсичность (Климова и Барышева, 2017; Angulo-Bejarano et al., 2021).

Кроме того, мы установили, что штаммы UOM 22, UOM 29 и UOM 35 характеризуются значительной эмульгирующей активностью (E_{24} = 54–60%). Возможно, в присутствии катионов металлов производство биосурфактантов увеличивается, что помогает интродуцентам выживать в среде, загрязненной ТМ. Выделяемые ими в среду ПАВ также защищают от токсичных соединений представителей аборигенной микробиоты, что способствует ее восстановлению и, следовательно, может являться одним из механизмов, лежащих в основе ускоренной деструкции нефти.

Согласно работе М.В. Носовой с соавторами (2023), в эпицентре загрязнения почвы нефтяными эмульсиями общая концентрация солей составляет 0.35–1.57%. В нашем эксперименте искусственное засоление почвы создавалось с помощью хлорида натрия в концентрации 0.5%, соответствующей среднему засолению (Каллас и Марон, 2018).

Повышенная концентрация соли ведет к росту осмотического давления, создавая препятствия для метаболической активности микроорганизмов, но в то же время может оказывать стимулирующее воздействие на ростовые характеристики галотолерантных бактерий (Ястребова и Плотникова, 2007). Исследуемые штаммы-деструкторы продемонстрировали, что засоление почвы в концентрации 0.5% не является препятствием для проявления ими нефтеокисляющей активности. У растений ячменя, помещенных в почву, загрязненную NaCl, наблюдалось сильнейшее угнетение роста: они погибли на стадии всходов, поэтому измерение сухой массы побегов и корней и содержания нефтепродуктов в вариантах с такой почвой не проводилось.

Наиболее существенные последствия действия ТМ на растения – это инактивация ферментов фотосинтеза, нарушение транспорта ассимилятов и минерального питания, изменение водного и гормонального статусов, ингибирование роста и уменьшение продуктивности (Головин и др., 2021; Patel et al., 2021). Представляется логичным, что увеличение концентрации ТМ в почве приводит к повышению их уровня в растительных организмах. Результаты проведенного опыта показали, что в присутствии бактерий *Acinetobacter* накопление ТМ в растениях ячменя шло менее активно (Табл. 4). В вариантах с интродукцией бактерией суммарное содержание свинца в побегах и корнях ячменя было в 1.3–1.4 раза меньше, чем в контроле. Схожие результаты описаны и в литературе. Так, И.О. Плеханова с соавторами (2023) установили, что при применении бактерий рода *Pseudomonas* наблюдается снижение поступления ТМ в вегетативную массу и корни растений яровой пшеницы.

Табл. 2. Влияние нефти, ТМ и хлорида натрия на синтез индолил-3-уксусной кислоты штаммами микроорганизмов; * – по данным Т.Ю. Коршуновой и др. (2024).

Штамм	Количество ИУК, нг/мл				
	Контроль	Нефть 5% об.	Свинец 1000 мг/л	Цинк 125 мг/л	NaCl 3% масс.
UOM 22	1416 ± 73*	1320 ± 75	1335 ± 73	1373 ± 75	1384 ± 74
UOM 29	521 ± 27*	534 ± 32	1822 ± 97	2455 ± 143	544 ± 37
UOM 35	658 ± 36*	680 ± 43	3552 ± 189	645 ± 46	687 ± 41

Вероятнее всего, наблюдаемый феномен объясняется тем, что синтез ризобактериями ИУК приводит к увеличению выделения в ризосферу растительных экссудатов (углеродных соединений и лектинов). Вследствие этого происходит интенсивное размножение бактерий, которые в свою очередь аккумулируют ТМ, связывая их в хелатные комплексы, недоступные для растений (Домрачева и др., 2022; Пищик и др., 2016).

Присутствие нефти отрицательно влияло на развитие как надземных, так и подземных органов ячменя. Во всех вариантах опыта было отмечено появление хлороза листьев. Поскольку содержание ионов ТМ в почве превышало ОДК этих элементов, неинокулированные растения, выращенные в присутствии цинка, значительно потеряли в вегетативной массе по сравнению с чистым контролем (16.9%). При этом в вариантах, где присутствовал свинец (с бактеризацией и без нее), у растений не было отмечено снижения массы побегов (Табл. 5). Возможно, отсутствие фитотоксичности свинца связано с наличием барьерных функций корневой системы по отношению к данному элементу (Лебедева и Арзамасова, 2010). Токсичность цинка для растений могла быть обусловлена тем, что его соединения, в отличие от солей свинца, более подвижны, обладают меньшим сродством к органическому веществу, большей растворимостью и, следовательно, легче проникают в корневую систему растений (Плеханова и др., 2019).

Внесение штаммов *Acinetobacter* в загрязненную нефтью почву (в отсутствие ТМ) увеличивало массу побегов ячменя на 26.3–30.7% по сравнению с необработанными растениями (Табл. 5). В вариантах опыта, где наряду с нефтью присутствовали ТМ, использование бактерий также улучшило состояние растений в почве и с цинком, и со свинцом.

Защитный эффект бактеризации можно объяснить иммобилизацией свободных ионов цинка в ризосфере растений (Анохина и др., 2018). В результате данного процесса инокулированные растения ячменя, вероятно, поглощали цинк в меньшей степени, поэтому имели более развитую надземную часть по сравнению с растениями без интродукции, выращенными при той же концентрации металла.

Формирование корневой системы ячменя шло приблизительно одинаково в почве, загрязненной только нефтью, и в тех вариантах опыта, куда кроме нефти вносили соли ТМ. Инокуляция растений стимулировала рост корневой системы. При этом контаминация почвы только нефтью с внесением бактерий привела к увеличению сухой массы корней на 11.7–23.1%, а в присутствии свинца и цинка этот показатель вырос уже на 23.2–32.3% и на 24.1–33.5% соответственно. Таким образом, мы наблюдаем пример искусственно созданной растительно-микробной системы, эффективно функционирующей в условиях абиотического стресса, вызванного комбинированным загрязнением почвы. Бактерии, помещенные в ризосферу ячменя, стимулируют корнеобразование через продуцирование ИУК, которая в числе прочего побуждает растения к синтезу специфических веществ, способствующих росту численности полезных микроорганизмов (Домрачева и др., 2022).

Одной из актуальных проблем в экологических исследованиях является изучение почвенного микробиома, существующего в антропогенно-преобразованных условиях, и его влияния на процессы трансформации веществ в экосистеме (Порхунцова и др., 2015; Prasad et al., 2021). Любой тип загрязнения почвы приводит к перестройке аборигенных микробных комплексов, что проявляется в уменьшении разнообразия видового состава, снижении количества определенных групп микроорганизмов, вспышках численности фитопатогенов и токсинообразователей.

Присутствие нефти в почве может как стимулировать размножение и развитие микроорганизмов, так и угнетать их. В нашем эксперименте загрязнение нефтью и ТМ вызвало снижение численно-

Табл. 3. Содержание нефти в почве, г/кг; «–» – данные не учитывались, т.к. растения погибли на стадии всходов.

Вариант опыта	I этап	II этап
Без интродукции бактерий	30.7 ± 1.3	22.4 ± 1.2
UOM 22	23.8 ± 0.9	10.4 ± 0.5
UOM 29	23.6 ± 1.1	10.5 ± 0.6
UOM 35	22.8 ± 0.8	8.8 ± 0.4
Без интродукции бактерий + Pb^{2+}	24.1 ± 1.1	17.4 ± 0.9
UOM 22 + Pb^{2+}	17.4 ± 0.8	8.9 ± 0.5
UOM 29 + Pb^{2+}	16.8 ± 0.8	8.3 ± 0.4
UOM 35 + Pb^{2+}	16.8 ± 0.9	8.0 ± 0.5
Без интродукции бактерий + Zn^{2+}	25.8 ± 1.3	19.4 ± 1.0
UOM 22 + Zn^{2+}	17.3 ± 0.7	8.6 ± 0.4
UOM 29 + Zn^{2+}	16.0 ± 0.8	8.6 ± 0.5
UOM 35 + Zn^{2+}	16.1 ± 0.7	8.1 ± 0.4
Без интродукции бактерий + NaCl	25.2 ± 1.1	–
UOM 22 + NaCl	16.9 ± 0.7	–
UOM 29 + NaCl	16.7 ± 0.8	–
UOM 35 + NaCl	16.9 ± 0.9	–

Табл. 4. Содержание свинца и цинка в растениях ячменя (побег + корень), мг/кг.

Вариант опыта	Содержание свинца	Содержание цинка
Без интродукции бактерий	51.3 ± 2.6	123.1 ± 6.9
UOM 22	36.2 ± 1.5	115.3 ± 5.4
UOM 29	36.6 ± 1.9	109.4 ± 5.0
UOM 35	38.4 ± 2.1	110.8 ± 6.3

Табл. 5. Сухой вес побегов и корней растений ячменя в загрязненной нефтью и ТМ почве, мг.

Вариант опыта	Масса корня	Масса побега
Без интродукции бактерий	10.21 ± 0.54	21.67 ± 1.07
UOM 22	11.40 ± 0.48	27.50 ± 1.45
UOM 29	12.00 ± 0.63	28.33 ± 1.32
UOM 35	12.57 ± 0.57	27.37 ± 1.14
Без интродукции бактерий + Pb^{2+}	10.67 ± 0.53	22.70 ± 1.02
UOM 22 + Pb^{2+}	13.15 ± 0.71	28.19 ± 1.54
UOM 29 + Pb^{2+}	14.12 ± 0.58	29.97 ± 1.53
UOM 35 + Pb^{2+}	13.57 ± 0.62	27.42 ± 1.53
Без интродукции бактерий + Zn^{2+}	10.00 ± 0.47	18.00 ± 0.93
UOM 22 + Zn^{2+}	12.41 ± 0.52	23.67 ± 1.29
UOM 29 + Zn^{2+}	13.13 ± 0.62	25.00 ± 1.35
UOM 35 + Zn^{2+}	13.35 ± 0.73	23.45 ± 1.31

сти только целлюлозоразлагающих бактерий; у представителей остальных физиологических групп численность выросла (Табл. 6). Плотность популяции углеводородокисляющих микроорганизмов и микромицетов увеличилась больше, чем на порядок. В почве, загрязненной свинцом и хлоридом натрия, количество микромицетов было наибольшим. Численность амилолитических микроорганизмов и олиготрофов заметнее выросла в вариантах с загрязнением почвы цинком. Интродукция бактерий-нефтедеструкторов сказалась в большей степени на количестве углеводородокисляющих микроорганизмов, что представляется вполне логичным. В целом численность бактерий в ризосфере растений ячменя в присутствии ионов свинца и цинка была выше, чем в вариантах без ТМ.

Выводы

1. Штаммы-нефтедеструкторы *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22, *A. calcoaceticus* UOM 29 и *A. courvalinii* UOM 35 сохраняют способность к деградации нефти в присутствии солей свинца и цинка, а также хлорида натрия. По степени негативного воздействия на окислительные свойства штаммов Zn значительно превосходит Pb. Присутствие NaCl в количестве 3% масс. снижает разложение нефти на 18.4–51.2%. В модельном эксперименте по биорекультивации почвы от сочетанного загрязнения нефтью и ТМ, а также нефтью и хлоридом натрия скорость биодеградации углеводородов в присутствии дополнительных поллютантов была выше, чем в вариантах, где присутствовала только нефть.

2. Внесение нефти, хлорида натрия и ТМ не оказывало ингибирующего действия на процесс выработки штаммами *Acinetobacter* ИУК. На фоне свинца синтез данного фитогормона увеличился у штаммов UOM 29 и UOM 35, при наличии цинка – у штамма UOM 29.

3. В присутствии бактерий *Acinetobacter* накопление ТМ растениями ячменя снизилось. Очевидно, бактерии-интродуценты, активно размножаясь в ризосфере растения-хозяина, способны регулировать количество доступных для растений токсичных ионов путем их биоаккумуляции.

4. Повышенная концентрация цинка в почве (1.5 ОДК) оказала на растения ячменя более выраженное токсическое действие, чем загрязнение свинцом (1.5 ОДК). Возможно, это объясняется тем, что соединения цинка более подвижны, обладают меньшим сродством к органическому ве-

Табл. 6. Численность различных физиологических групп микроорганизмов в ризосфере ячменя, КОЕ/г.

Вариант опыта	Аммонификаторы, $\times10^8$	Олиготрофы, $\times10^8$	Микромицеты, $\times10^5$	Углеводородокисляющие, $\times10^6$	Азотфиксирующие, $\times10^8$	Амилолитические, $\times10^7$	Фосфатрастворяющие, $\times10^6$	Целлюлозоразлагающие, $\times10^2$
Контроль	0.11	0.11	0.40	0.014	0.13	0.15	0.16	45.3
Без интродукции бактерий	0.22	0.25	5.2	0.51	0.43	0.49	0.74	4.3
UOM 22	0.51	2.5	2.0	2.2	1.3	0.80	4.5	3.0
UOM 29	1.1	3.2	1.4	1.7	0.92	0.51	3.8	2.9
UOM 35	0.55	1.2	1.9	2.0	1.2	0.79	7.0	3.6
Без интродукции бактерий + Pb^{2+}	1.3	1.8	37.4	0.50	1.1	1.1	2.0	4.1
UOM 22 + Pb^{2+}	1.4	2.8	72.1	3.4	1.2	1.7	6.3	3.6
UOM 29 + Pb^{2+}	1.3	1.8	36.0	4.2	2.7	2.0	6.4	2.7
UOM 35 + Pb^{2+}	2.3	2.3	42.4	4.1	2.1	1.3	4.8	3.8
Без интродукции бактерий + Zn^{2+}	0.76	3.6	5.0	0.36	6.4	3.1	1.9	4.2
UOM 22 + Zn^{2+}	1.3	2.0	3.2	14.1	2.5	6.4	3.8	3.1
UOM 29 + Zn^{2+}	1.2	3.8	1.3	18.2	5.0	7.8	2.8	4.2
UOM 35 + Zn^{2+}	1.7	4.5	2.3	17.3	1.5	2.0	3.6	5.4
Без интродукции бактерий + NaCl	1.1	1.1	34.3	1.1	2.3	2.0	4.5	1.4
UOM 22 + NaCl	1.7	1.7	54.2	2.2	2.5	3.1	5.2	3.8
UOM 29 + NaCl	1.8	1.8	48.3	4.6	3.8	2.8	4.3	2.9
UOM 35 + NaCl	1.5	1.5	30.2	5.2	2.0	2.2	4.6	5.1

ществу, большей растворимостью и, следовательно, легче проникают в корневую систему растения. Внесение штаммов *Acinetobacter* улучшило состояние растений как в загрязненной нефтью почве, так и там, где наряду с нефтью присутствовали ТМ.

5. Инокуляция растений усиливала рост побегов и корневой системы растений. Способность бактерий *Acinetobacter* улучшать корнеобразование и развитие растений в целом, вероятнее всего, связана с продуцированием ими экзогенной ИУК, которая стимулирует растения к выделению экссудатов, вызывающих, в свою очередь, рост численности ризосферных микроорганизмов.

6. Сочетанное загрязнение вызывало снижение численности целлюлозоразлагающих бактерий. В то же время численность представителей остальных физиологических групп выросла: количество микромицетов было наибольшим в почве, загрязненной свинцом и хлоридом натрия, численность амилолитических микроорганизмов и олиготрофов увеличилась в вариантах с загрязнением почвы цинком.

Список литературы

Анохина, Т.О., Сиунова, Т.В., Сизова, О.И., Захарченко, Н.С., Кочетков, В.В., 2018. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробиотехнологиях. *Агрохимия* **10**, 54–66. http://www.doi.org/10.1134/S0002188118100034

Бабаев, Э.Р., Фарзалиев, В.М., Мамедова, П.Ш., Мовсумзаде, Э.М., 2015. Биологическая утилизация тяжелых металлов. *Нефтегазохимия* **4**, 49–51.

Борзенков, И.А., Милехина, Е.И., Готоева, М.Т., Розанова, Е.П., Беляев, С.С., 2006. Свойства углеводородокисляющих бактерий, изолированных из нефтяных месторождений Татарстана, Западной Сибири и Вьетнама. *Микробиология* **75** (1), 82–89.

Бузолёва, Л.С., Кривошеева, А.М., 2013. Влияние тяжелых металлов на размножение патогенных бактерий. *Успехи современного естествознания* **7**, 30–33.

Головин, А.В., Скрыпник, Л.Н., Масютин, Я.А., 2021. Особенности накопления цинка и никеля некоторыми лекарственными растениями, произрастающими на территориях с различной степенью техногенной нагрузки. *Экосистемы* **26**, 67–77.

Дзержинская, И.С., 2008. Питательные среды для выделения и культивирования микроорганизмов. АГТУ, Астрахань, Россия, 348 с.

Домрачева, Л.И., Скугорева, С.Г., Ковина, А.Л., Коротких, А.И., Стариков, П.А. и др., 2022. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор). *Теоретическая и прикладная экология* **3**, 14–25. http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-014-025

Каллас, Е.В., Марон, Т.А., 2018. Мелиорация засоленных почв и методы их изучения. Издательский Дом Томского государственного университета, Томск, Россия, 138 с.

Климова, Т.А., Барышева, Е.С., 2017. Значение эссенциальных элементов в жизнедеятельности микроорганизмов. *Тезисы докладов Всероссийской научно-методической конференции Оренбургского государственного университета «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры».* Оренбург, Россия, 1925–1929.

Коршунова, Т.Ю., Кузина, Е.В., Мухаматдьярова, С.Р., Шарипова, Ю.Ю., Искужина, М.Г., 2024. Бактерии-деструкторы с ростстимулирующими свойствами для использования в экологической биотехнологии. *Теоретическая и прикладная экология* **2**, 117–124. http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-117-124

Кузина, Е.В., Рафикова, Г.Ф., Мухаматдьярова, С.Р., Шарипова, Ю.Ю., Коршунова, Т.Ю., 2023. Биологическая активность чернозема выщелоченного при нефтяном и хлоридно-натриевом загрязнении и влияние на нее обработки галотолерантными бактериями-нефтедеструкторами. *Почвоведение* **1**, 89–101. http://www.doi.org/10.31857/S0032180X22600718

Лебедева, Л.А., Арзамазова, А.В., 2010. Влияние агрохимических средств на поступление свинца в растения ячменя при загрязнении дерново-подзолистой почвы этим металлом. *Проблемы агрохимии и экологии* **2**, 22–26.

Мухаматдьярова, С.Р., Кузина, Е.В., Шарипова, Ю.Ю., Искужина, М.Г., Кульбаева, Л.А., Коршунова, Т.Ю., 2024. Биотехнологический потенциал новых штаммов углеводородокисляющих бактерий. *Известия Уфимского научного центра РАН* **2**, 38–47. http://www.doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-2-38-47

Носова, М.В., Середина, В.П., Стовбуник, С.А., 2023. Изменения почв под влиянием загрязнения сырой нефтью и минерализованными жидкостями в условиях Среднего Приобья Западной Сибири. *Трансформация экосистем* **6** (2 (20)), 64–73. http://www.doi.org/10.23859/estr-220718

Пиковская, Р.И., 1948. Мобилизация фосфора в почве в связи с жизнедеятельностью некоторых видов микроорганизмов. *Микробиология* **17** (5), 362–370.

Пищик, В.Н., Воробьев, Н.И., Проворов, Н.А., Хомяков, Ю.В., 2016. Механизмы адаптации растений и микроорганизмов в растительно-микробных системах к тяжелым металлам. *Микробиология* **85** (3), 231–247. http://www.doi.org/10.7868/S0026365616030113

Плеханова, И.О., Золотарева, О.А., Тарасенко, И.Д., Яковлев, А.С., 2019. Оценка экотоксичности почв в условиях загрязнения тяжелыми металлами. *Почвоведение* **10**, 1243–1258. http://www.doi.org/10.1134/S0032180X19100083

Плеханова, И.О., Куликов, В.О., Шабаев, В.П., 2023. Влияние ризосферных бактерий на продуктивность растений пшеницы и поступление элементов из загрязненных почв. *Вестник Московского университета. Почвоведение* **78** (3), 76–82. http://www.doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-76-82

Порхунцова, О.А., Бушуева, В.И., Федоренчик, А.А., Алещенкова, З.М., 2015. Микробно-растительная ассоциация как эффективный фиторемедиант загрязненных нефтепродуктами почв. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии* **2**, 87–91.

Стариков, С.Н., Четвериков, С.П., 2020. Штамм *Enterobacter* sp. UOM-3 способен к синхронной деструкции галогенсодержащих гербицидов и синтезу индол-3-уксусной кислоты. *Экобиотех* **3** (4), 716–721. http://www.doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-4-716-721

Сулейманов, Р.А., Бактыбаева, З.Б., Валеев, Т.К., Рахматуллин, Н.Р., Иванов, Д.Е. и др., 2018. Эколого-гигиеническая характеристика окружающей среды и состояние здоровья населения на территориях добычи и транспорта нефти. *Ульяновский медико-биологический журнал* **4**, 124–142. http://www.doi.org/10.23648/UMBJ.2018.32.22703

Тафеева, Е.А., Иванов, А.В., Титова, А.А., Петров, И.В., 2016. Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в почве на территории нефтедобывающих районов республики Татарстан. *Гигиена и санитария* **95** (10), 939–941.

Федорова, Ю.А., Чиглинцева, Н.Н., Ягафарова, Г.Г., Ягафарова, Д.И., Сафаров, А.Х., 2015. Подбор фитомелиорантов для рекультивации нефтезасоленных почв. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика* **3** (19), 60–68.

Ястребова, О.В., Плотникова, Е.Г., 2007. Галотолерантные бактерии-деструкторы полициклических ароматических углеводородов рода *Arthrobacter. Вестник Пермского университета* **5** (10), 100–106.

Angulo-Bejarano, P.I., Puente-Rivera, J., Cruz-Ortega, R., 2021. Metal and metalloid toxicity in plants: An overview on molecular aspects. *Plants* **10** (4), 635. https://doi.org/10.3390/plants10040635

Camacho-Montealegre, C.M., Rodrigues, E.M., Morais, D.K., Tótola, M.R., 2021. Prokaryotic community diversity during bioremediation of crude oil contaminated oilfield soil: effects of hydrocarbon concentration and salinity. *Brazilian Journal of Microbiology* **52**, 787–800. https://doi.org/10.1007/s42770-021-00476-5

El-Agawany, N.I., Kaamoush, M.I., 2023. Role of zinc as an essential microelement for algal growth and concerns about its potential environmental risks. *Environmental Science and Pollution Research* **30** (28), 71900–71911. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20536-z

Jiao, S., Chen, W., Wei, G., 2019. Resilience and assemblage of soil microbiome in response to chemical contamination combined with plant growth. *Applied and Environmental Microbiology* **85** (6), e02523-18. https://doi.org/10.1128/AEM.02523-18

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I. et al., 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration* **182**, 247–268. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021

Khudur, L.S., Gleeson, D.B., Ryan, M.H., Shahsavari, E., Haleyur, N. et al., 2018. Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils. *Environmental Pollution* **243**, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.040

Kuzina, E., Rafikova, G., Vysotskaya, L., Arkhipova, T., Bakaeva, M. et al., 2021. Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil. *Plants* **10** (8), 1745. http://www.doi.org/10.3390/plants10081745

Li, Y., Li, C., Xin, Y., Huang, T., Liu, J., 2022. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **246**, 114129. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114129

Patel, M., Surti, M., Ashraf, S.A., Adnan, M., 2021. Physiological and molecular responses to heavy metal stresses in plants. In: Husen, A. (ed.), *Harsh environment and plant resilience*. Springer, Cham, Germany, 171–202.

Prasad, S., Malav, L.C., Choudhary, J., Kannojiya, S., Kundu, M. et al., 2021. Soil microbiomes for healthy nutrient recycling. In: Yadav, A.N. et al. (eds.), *Current trends in microbial biotechnology for sustainable agriculture*. *Environmental and microbial biotechnology*. Springer, Singapore, 1–21.

Raymond, R.L., 1961. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons. *Development Industrial Microbiology* **2** (1), 23–32.

Sazykina, M.A., Minkina, T.M., Konstantinova, E.Y., Khmelevtsova, L.E., Azhogina, T.N. et al., 2022. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia. *Microbiological Research* **254**, 126913. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126913

References

Angulo-Bejarano, P.I., Puente-Rivera, J., Cruz-Ortega, R., 2021. Metal and metalloid toxicity in plants: An overview on molecular aspects. *Plants* **10** (4), 635. https://doi.org/10.3390/plants10040635

Anokhina, T.O., Siunova, T.V., Sizova, O.I., Zakharchenko, N.S., Kochetkov, V.V., 2018. Rizosfernye bakterii roda *Pseudomonas* v sovremennykh agrobiotekhnologiiakh [Rhizospheric bacteria of the genus *Pseudomonas* in modern agrobiotechnology]. *Agrokhimiia [Agrochemistry]* **10**, 54–66. (In Russian). http://www.doi.org/10.1134/S0002188118100034

Babayev, E.R., Farzaliyev, V.M., Mamedova, P.Sh., Movsumzadeh, E.M., 2015. Biologicheskaia utilizatsiia tiazhelykh metallov [Biological utilization of heavy metals]. *Neftegazokhimiia [Oil and Gas Chemistry]* **4**, 49–51. (In Russian).

Borzenkov, I.A., Milekhina, E.I., Gotoeva, M.T., Rozanova, E.P., Belyaev, S.S., 2006. Svoistva uglevodorodokisliaiushchikh bakterii, izolirovannykh iz neftianykh mestorozhdenii Tatarstana, Zapadnoi Sibiri i V'etnama [The properties of hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from the oilfields of Tatarstan, Western Siberia, and Vietnam]. *Mikrobiologiia [Microbiology]* **75** (1), 82–89. (In Russian).

Buzoleva, L.S., Krivosheeva, A.M., 2013. Vliianie tiazhelykh metallov na razmnozhenie patogennykh bakterii [Effects of heavy metals on pathogenic bacteria]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia [Advances in Current Natural Sciences]* **7**, 30–33. (In Russian).

Camacho-Montealegre, C.M., Rodrigues, E.M., Morais, D.K., Tótola, M.R., 2021. Prokaryotic community diversity during bioremediation of crude oil contaminated oilfield soil: effects of hydrocarbon concentration and salinity. *Brazilian Journal of Microbiology* **52**, 787–800. https://doi.org/10.1007/s42770-021-00476-5

Domracheva, L.I., Skugoreva, S.G., Kovina, A.L., Korotkikh, A.I., Starikov, P.A. et al., 2022. Spetsifika rastitel'no-mikrobnykh kompleksov pri antropogennom zagriaznenii pochvy (obzor) [Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review)]. *Teoreticheskaia i prikladnaia ekologiia [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 14–25. (In Russian). http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-014-025

Dzerzhinskaya, I.S., 2008. Pitatel'nye sredy dlia vydeleniia i kul'tivirovaniia mikroorganizmov [Nutrient media for isolation and cultivation of microorganisms]. Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, 348 p. (In Russian).

El-Agawany, N.I., Kaamoush, M.I., 2023. Role of zinc as an essential microelement for algal growth and concerns about its potential environmental risks. *Environmental Science and Pollution Research* **30** (28), 71900–71911. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20536-z

Fedorova, Yu.A., Chiglintseva, N.N., Yagafarova, G.G., Yagafarova, D.I., Safarov, A.H., 2015. Podbor fitomeliorantov dlia rekul'tivatsii neftezasolennykh pochv [Selection of phytoameliorants for recultivation of the petrosalted soils]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiia. Urbanistika (Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Development]* **3** (19), 60–68. (In Russian).

Golovin, A.V., Skrypnik, L.N., Masyutin, Ya.A., 2021. Osobennosti nakopleniia tsinka i nikelia nekotorymi lekarstvennymi rasteniiami, proizrastaiushchimi na territoriiakh s razlichnoi stepen'iu tekhnogennoi nagruzki [Particularities of zinc and nickel accumulation by certain medicinal plants in territories with varying degrees of technological load]. *Ekosistemy [Ecosystems]* **26**, 67–77. (In Russian).

Jiao, S., Chen, W., Wei, G., 2019. Resilience and assemblage of soil microbiome in response to chemical contamination combined with plant growth. *Applied and Environmental Microbiology* **85** (6), e02523-18. https://doi.org/10.1128/AEM.02523-18

Kallas, E.V., Maron, T.A., 2018. Melioratsiia zasolennykh pochv i metody ikh izucheniia [Reclamation of saline soils and methods of their study]. Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, Russia, 138 p. (In Russian).

Klimova, T.A., Barysheva, E.S., 2017. Znachenie essentsial'nykh elementov v zhiznedeiatel'nosti mikroorganizmov [The importance of essential elements in the vital activity of microorganisms]. *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta «Universitetskii kompleks kak regional'nyi tsentr obrazovaniia, nauki i kul'tury» [Abstracts of the All-Russian Scientific and methodological conference of Orenburg State University "University*

complex as a regional center of education, science and culture"]. Orenburg, Russia, 1925–1929. (In Russian).

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I. et al., 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration* **182**, 247–268. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021

Khudur, L.S., Gleeson, D.B., Ryan, M.H., Shahsavari, E., Haleyur, N. et al., 2018. Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils. *Environmental Pollution* **243**, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.040

Korshunova, T.Yu., Kuzina, E.V., Mukhamatdyarova, S.R., Sharipova, Yu.Yu., Iskuzhina, M.G., 2024. Bakterii-destruktory s roststimuliruiushchimi svoistvami dlia ispol'zovaniia v ekologicheskoi biotekhnologii [Bacteria-destructors with growth-stimulating properties for use in ecological biotechnology]. *Teoreticheskaia i prikladnaia ekologiia [Theoretical and Applied Ecology]* **2**, 117–124. (In Russian). http://www.doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-117-124

Kuzina, E., Rafikova, G., Vysotskaya, L., Arkhipova, T., Bakaeva, M. et al., 2021. Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil. *Plants* **10** (8), 1745. http://www.doi.org/10.3390/plants10081745

Kuzina, E.V., Rafikova, G.F., Mukhamatdyarova, S.R., Sharipova, Yu.Yu., Korshunova, T.Yu., 2023. Biologicheskaia aktivnost' chernozema vyshchelochennogo pri neftianom i khloridno-natrievom zagriaznenii i vliianie na nee obrabotki galotolerantnymi bakteriiami-neftedestruktorami [Biological activity of leached chernozem under oil and sodium chloride pollution and the effect of treatment with halotolerant oil-destructing bacteria]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]* **1**, 89–101. (In Russian). http://www.doi.org/10.31857/S0032180X22600718

Lebedeva, L.A., Arzamazova, A.V., 2010. Vliianie agrokhimicheskikh sredstv na postuplenie svintsa v rasteniia iachmenia pri zagriaznenii dernovo-podzolistoi pochvy etim metallom [The influence of agrochemicals on the intake of lead into barley plants during contamination of sod-podzolic soil with this metal.] *Problemy agrokhimii i ekologii [Agrochemistry and Ecology Problems]* **2**, 22–26. (In Russian).

Li, Y., Li, C., Xin, Y., Huang, T., Liu, J., 2022. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **246**, 114129. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114129

Mukhamatdyarova, S.R., Kuzina, E.V., Sharipova, Yu.Yu., Iskuzhina, M.G., Kulbaeva, L.A., Korshunova, T.Yu., 2024. Biotekhnologicheskii potentsial novykh shtammov uglevodorodokisliaiushchikh bakterii [Biotechnological potential of new strains of hydrocarbon-oxidizing bacteria]. *Izvestiia Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre]* **2**, 38–47. (In Russian). http://www.doi.org/10.31040/2222-8349-2024-0-2-38-47

Nosova, M.V, Seredina, V.P., Stovbunik, S.A., 2023. Assessment of soil changes causing contamination with crude oil and mineralized liquids in the Middle Ob region (Western Siberia). *Ecosystem transformation* **6** (2 (20)), 64–73. http://www.doi.org/10.23859/estr-220718

Patel, M., Surti, M., Ashraf, S.A., Adnan, M., 2021. Physiological and molecular responses to heavy metal stresses in plants. In: Husen, A. (ed.), *Harsh environment and plant resilience*. Springer, Cham, Germany, 171–202.

Pikovskaya, R.I., 1948. Mobilizatsiia fosfora v pochve v sviazi s zhiznedeiatel'nost'iu nekotorykh vidov mikroorganizmov [Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species]. *Mikrobiologiia [Microbiology]* **17** (5), 362–370. (In Russian).

Pishchik, V.N., Vorob'ev, N.I., Provorov, N.A., Khomyakov, Yu.V., 2016. Mekhanizmy adaptatsii rastenii i mikroorganizmov v rastitel'no-mikrobnykh sistemakh k tiazhelym metallam [Mechanisms of plant and microbial adaptation to heavy metals in plant–microbial systems]. *Mikrobiologiia [Microbiology]* **85** (3), 231–247. (In Russian). http://www.doi.org/10.7868/S0026365 616030113

Plekhanova, I.O., Kulikov, V.O., Shabaev, V.P., 2023. Vliianie rizosfernykh bakterii na produktivnost' rastenii pshenitsy i postuplenie elementov iz zagriaznennykh pochv [Influence of rhisospheric bacteria on the productivity of wheat plants and the input of elements from polluted soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Pochvovedenie [Moscow University Soil Science Bulletin]* **78** (3), 76–82. (In Russian). http://www.doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-76-82

Plekhanova, I.O., Zolotareva, O.A., Tarasenko, I.D., Yakovlev, A.S., 2019. Otsenka ekotoksichnosti pochv v usloviiakh zagriazneniia tiazhelymi metallami [Assessment of ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]* **10**, 1243–1258. (In Russian). http://www.doi.org/10.1134/S0032180X19100083

Porhuntsova, O.A., Bushueva, V.I., Fedorenchik, A.A., Aleshhenkova, Z.M., 2015. Mikrobno-rastitel'naia assotsiatsiia kak effektivnyi fitoremediant zagriaznennykh nefteproduktami pochv [Microbial-plant association as an effective phytoremediant of oil-polluted soils]. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]* **2**, 87–91. (In Russian).

Prasad, S., Malav, L.C., Choudhary, J., Kannojiya, S., Kundu, M. et al., 2021. Soil microbiomes for healthy nutrient recycling. In: Yadav, A.N. et al. (eds.), *Current trends in microbial biotechnology for sustainable agriculture*. *Environmental and microbial biotechnology*. Springer, Singapore, 1–21.

Raymond, R.L., 1961. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons. *Development Industrial Microbiology* **2** (1), 23–32.

Sazykina, M.A., Minkina, T.M., Konstantinova, E.Y., Khmelevtsova, L.E., Azhogina, T.N. et al., 2022. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia. *Microbiological Research* **254**, 126913. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126913

Starikov, S.N., Chetverikov, S.P., 2020. Shtamm *Enterobacter* sp. UOM-3 sposoben k sinkhronnoi destruktsii galogensoderzhashchikh gerbitsidov i sintezu indol-3-uksusnoi kisloty [Strain *Enterobacter* sp. UOM-3 is able to synchronous destruction of halogen-containing herbicides and synthesis of indol-3-acetic acid]. *Ekobiotekh [Ecobiotech]* **3** (4), 716–721. (In Russian). http://www.doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-4-716-721

Suleymanov, R.A., Baktybaeva, Z.B., Valeev, T.K., Rakhmatullin, N.R., Ivanov, D.E. et al., 2018. Ekologo-gigienicheskaia kharakteristika okruzhaiushchei sredy i sostoianie zdorov'ia naseleniia na territoriiakh dobychi i transporta nefti [Environmental and hygienic environmental characteristics and public health on the territories of crude oil production and transportation]. *Ul'ianovskii mediko-biologicheskii zhurnal [Ulyanovsk Medico-Biological Journal]* **4**, 124–142. (In Russian). http://www.doi.org/10.23648/UMBJ.2018.32.22703

Tafeeva, E.A., Ivanov, A.V., Titova, A.A., Petrov, I.V., 2016. Soderzhanie tiazhelykh metallov i nefteproduktov v pochve na territorii neftedobyvaiushchikh raionov respubliki Tatarstan [Content of heavy metals and petroleum products in the soil on the territory of oilproducing areas of the republic of Tatarstan]. *Gigiena i sanitariia [Hygiene and Sanitation]* **95** (10), 939–941. (In Russian).

Yastrebova, O.V., Plotnikova, E.G., 2007. Galotolerantnye bakterii-destruktory politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov roda *Arthrobacter* [Halotolerant bacteria of the genus *Arthrobacter,* capable of growth on polycyclic aromatic hydrocarbons]. *Vestnik Permskogo universiteta [Bulletin of Perm University]* **5** (10), 100–106. (In Russian).