



ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>



УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИЕ БАКТЕРИИ, УСТОЙЧИВЫЕ К ГЕРБИЦИДАМ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ ФИТОБИОРЕМЕДИАЦИИ

Кузина Е.В.*, Искужина М.Г.,
Мухаматдырова С.Р., Рамеев Т.В.,
Коршунова Т.Ю.

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия
*E-mail: lab.biotech@yandex.ru

Наиболее экологически безопасным и экономически выгодным способом очистки окружающей среды является микробиологический. Чаще всего антропогенное загрязнение носит комплексный характер, поэтому бактерии-деструкторы должны обладать дополнительными полезными характеристиками, такими как устойчивость к присутствию дополнительных загрязнителей и ростстимулирующая активность. Целью работы являлось изучение возможности применения шести углекислородокисляющих микроорганизмов рода *Pseudomonas* для усиления роста растений-ремедиантов на территориях с комбинированным загрязнением нефтью и гербицидами. Все штаммы обладали толерантностью к гербицидам Тапир (д.в. имазетапир), Спецназ (д.в. трибенурон-метил) и Октапон экстра (д.в. 2,4-Д) в диапазоне концентраций 1-10 мл (г)/л и способностью к их разложению на 3.9-41.5% (за исключением *P. frederiksbergensis* UOM 11). Загрязнители по-разному воздействовали на способность бактерий к биодеструкции нефти (Спецназ не влиял, другие – снижали до 3-4 раз), продукции ИУК (нефть и Октапон экстра стимулировали, Тапир подавлял), фосфатмобилизации (нефть и гербициды снижали индекс солубилизации, особенно Тапир), подавлению роста фитопатогенов (нефть уменьшала, Тапир усиливал). Использование бактерий оказывало положительный эффект на ростовые показатели растений ячменя и клевера в почве, загрязненной нефтью и Тапиром. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения изученных микроорганизмов для очистки почвы от загрязнения нефтью и гербицидами совместно с растениями-фитомелиорантами.

Ключевые слова: *Pseudomonas*, ♦ штаммы-нефтедеструкторы ♦ гербициды ♦ ростстимулирующая активность ♦ ремедиация

Поступила в редакцию: 03.09.2024

[Цитировать | Cite as](#)

DOI: 10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163

EDN: MUCUVF

HYDROCARBON-OXIDIZING BACTERIA RESISTANT TO HERBICIDES, PROMISING FOR PHYTOBIOREMEDIATION

Kuzina E.V.*, Iskuzina M.G.,
Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V.,
Korshunova T.Yu.

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of
the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia
*E-mail: lab.biotech@yandex.ru

The most environmentally friendly and cost-effective way to clean the environment is the microbiological method. Most often, anthropogenic pollution is complex. Therefore, bacteria-destroyers must have additional useful characteristics, such as resistance to additional pollutants and growth-promoting activity. The purpose of the work was to study the possibility of using six hydrocarbon-oxidizing microorganisms of the genus *Pseudomonas* to enhance the growth of remediator plants in areas with combined oil and herbicide pollution. All strains were tolerant to the herbicides Tapir (active substance imazethapyr), Spetsnaz (active substance tribenuron-methyl) and Octapon extra (active substance 2,4-D) in the concentration range of 1-10 ml (g)/ l and the ability to decompose them by 3.9-41.5% (with the exception of *P. frederiksbergensis* UOM 11). Pollutants had different effects on the ability of bacteria to biodegrade oil (Spetsnaz had no effect, others reduced it up to 3-4 times), IAA production (oil and Octapone Extra stimulated, Tapir suppressed), phosphate mobilization (oil and herbicides reduced the solubilization index, especially Tapir), suppression of the growth of phytopathogens (oil reduced, Tapir enhanced). The use of bacteria had a positive effect on the growth characteristics of barley and clover plants in soil contaminated with oil and Tapir. The results obtained indicate the prospects of using the studied microorganisms to clean soil from oil and herbicide contamination together with phytomeliiorant plants.

Keywords: *Pseudomonas* ♦ oil-degrading strains ♦ herbicides ♦ growth-stimulating activity ♦ remediation

Принято в печать: 26.09.2024



ВВЕДЕНИЕ

Предприятия нефтяной промышленности принято рассматривать в качестве основных загрязнителей окружающей среды. В большинстве случаев аварийные разливы происходят во время бурения скважин или транспортировки нефти и нефтепродуктов. Поскольку разложение нефтяных углеводородов естественным образом протекает достаточно медленно, исследователями были предложены разнообразные стратегии рекультивации загрязненных территорий [Ambaye et al., 2022]. К числу серьезных экологических проблем, также требующих решения, относится сельскохозяйственное воздействие на окружающую среду. В отличие от промышленного загрязнения неконтролируемое использование пестицидов носит хронический характер. Значительная доля опасных веществ, входящих в состав пестицидов, при многолетнем использовании накапливается в почве, и их остаточная концентрация зачастую превышает пределы, разрешенные нормативными актами [Raffa, Chiampo, 2021].

На сегодняшний день, как правило, требуется восстановление территорий, подвергшихся комплексному загрязнению. При этом необходимо учитывать, что одновременное присутствие в почве ксенобиотиков разных классов может вызвать сложные химические взаимодействия и синергические эффекты, которые оказывают отрицательное влияние на эффективность рекультивации [Ye et al., 2017].

Микробиологическая деструкция поллютантов, попадающих в почву, хорошо изучена и признана одной из самых экономически оправданных технологий ремедиации [Chen et al., 2015]. На наш взгляд, среди перспективных объектов экологической биотехнологии особого внимания заслуживают бактерии рода *Pseudomonas*, поскольку эти микроорганизмы являются не только активными деструкторами органических соединений различных классов, но и обладают полезными для растений свойствами [Korshunova et al., 2021].

Целью данной работы являлось описание штаммов углекислородокисляющих микроорганизмов рода *Pseudomonas*, эффективных для стимуляции роста растений на территориях с комбинированным загрязнением, в том числе нефтью и гербицидами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментах были задействованы углекислородокисляющие бактерии из коллекции микроорганизмов УИБ УФИЦ РАН: *Pseudomonas alcaligenes* UOM 10, *P. frederiksbergensis* UOM 11, *P. chlororaphis* ИБ 93, *P. putida* ИБ 23, *P. turukhanskensis* ИБ 1.1, *Pseudomonas* sp. НЗ.1 [Кузина и др., 2024; Вакаева et al., 2020; Korshunova et al., 2023].

Устойчивость штаммов к действию гербицидов Октапон экстра (класс феноксикарбоксилаты, д.в. – 2,4-Д), Тапир (класс имидазолиноны, д.в. – имазетапир) и Спецназ (класс сульфонилмочевины, д.в. – трибенурон-метил) определяли визуально по интенсивности роста на питательном агаре, г/л (пептон – 10.0; дрожжевой экстракт – 3.0; глюкоза – 1.0; NaCl – 5.0; агар-агар – 15.0) с добавлением различных концентраций препаратов.

Способность микроорганизмов к разложению д.в. гербицидов изучали в системе ВЭЖХ LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором SPD-M20A («Shimadzu», Япония). Штаммы выращивали в течение 10 суток в жидкой среде Раймонда [Raymond, 1961], содержащей в качестве единственного источника углерода одно из следующих веществ: трибенурон-метил – 0.5 г/л, 2,4-Д – 0.5 г/л, имазетапир – 0.2 г/л. Полученную культуральную жидкость центрифугировали при 12000 g. Для хроматографического разделения

супернатантов, содержащих 2,4-Д и трибенурон-метил, использовали колонку Discovery® C18 5µm (250×3.0 мм) («SUPELCO», США). В качестве подвижной фазы в варианте с 2,4-Д применяли 50%-ный раствор ацетонитрила в 0.1 н уксусной кислоте, скорость элюирования – 1.0 мл/мин, объем вводимой пробы – 50 мкл, поглощение регистрировали при длине волны – 280 нм. В качестве подвижной фазы в варианте с трибенурон-метилом использовали 10%-ный раствор ацетонитрила в воде, скорость элюирования – 1.0 мл/мин, объем вводимой пробы – 20 мкл, поглощение регистрировали при длине волны – 223 нм. Для хроматографического разделения супернатантов, содержащих имазетапир, использовали колонку Nova-Pak® C18 4µm (300×3.9 мм) («Waters», Ирландия). В качестве подвижной фазы использовали 50%-ный раствор ацетонитрила в 0.1 н уксусной кислоте, скорость элюирования – 1.0 мл/мин, объем вводимой пробы – 10 мкл, поглощение регистрировали при длине волны – 255 нм.

Влияние гербицидов на биодеструкцию нефти бактериями исследовали методом газовой хроматографии так, как описано [Борзенков и др., 2006]. Бактерии культивировали 5 суток в жидкой среде Раймонда, в которую одновременно с нефтью (4.0 об.%) добавляли гербициды в количестве 1.0 об.%.

Воздействие нефти и гербицидов (вносили в среду в количестве 0.5 и 1.0 об.%) на содержание индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) в культуральной жидкости штаммов устанавливали хроматографически [Стариков, Четвериков, 2020] после выращивания бактерий на среде с глюкозой [Дзержинская, 2008] в течение 5 суток.

Для изучения влияния загрязнителей на фосфатмобилизирующую активность бактерий гербициды добавляли в среду Пиковской [Пиковская, 1948] перед тем, как разливать в чашки Петри (0.5 и 1.0 об.%), а нефть наносили на поверхность застывшей агаризованной среды (250 мкл). Индекс солюбилизации (SI) [Lisboa et al., 2021] оценивали через 10 суток культивирования. Он представляет собой отношение диаметра зоны просветления вокруг колонии бактерий (мм) к диаметру колонии (мм). Были выбраны следующие критерии оценки: SI<2, SI=2-3, SI>3 – изолят обладает низким, средним или высоким потенциалом солюбилизации соответственно.

Наличие антагонизма в отношении фитопатогенных микромицетов, в том числе в присутствии нефти и гербицидов, выявляли при совместном выращивании бактерий и грибов в чашках Петри [Четвериков, Логинов, 2009] на картофельно-глюкозном агаре [Дзержинская, 2008] путем учета диаметра зоны подавления роста гриба. Гербициды добавляли в среду перед тем, как разливать ее в чашки Петри (0.5 об.%), нефть наносили на поверхность застывшей агаризованной среды (250 мкл).

Наличие у штаммов способности к стимуляции роста растений в загрязненной почве проверяли на семенах ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) сорта Челябинский 99 и клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) сорта Ранний 2. Опытные семена были обработаны бактериями, контрольные – водопроводной водой. После инкубации в течение 3 суток (ячмень) и 4 суток (клевер) определяли всхожесть, длину побегов и корней. Для обработки семян использовали жидкую культуру бактерий, разбавленную до титра 10⁵ КОЕ/мл. Нефть в почву вносили в количестве 20 г/кг почвы, гербицид Тапир – 15 мкг/кг почвы. Согласно литературным данным [Филиппова, Куликова, 2018; Бубнов и др., 2022], гербициды класса имидазолинонов плохо поддаются разложению и могут накапливаться в почве, поэтому ростстимулирующую активность штаммов оценивали именно в присутствии Тапира.

Статистическую обработку осуществляли с применением стандартных программ MS Excel. Данные в таблицах и на рисунке представлены как среднее \pm стандартная ошибка среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все микроорганизмы, участвующие в экспериментах, обладали толерантностью к гербицидам Тапир, Спецназ и Октапон экстра в диапазоне концентраций 1-10 мл (г)/л. Способность к разложению действующих веществ гербицидов обнаружена также у всех бактерий (за исключением *P. frederiksbergensis* УОМ 11). Наиболее активно проходила биодegradация трибенурон-метила. Минимальная степень деструкции данного соединения зафиксирована для штамма *P. chlororaphis* ИБ 93 (26.0%), а максимальная – для *P. putida* ИБ 23 (41.5%). У остальных псевдомонад этот показатель был равен 30.0% (табл. 1). Степень деструкции 2,4-Д находилась в диапазоне от 3.9 до 17.3%. Самым сложным субстратом для бактериального разложения являлся имазетапир – степень его биодegradации у *Pseudomonas* spp. составила 7.8-11.4%, у штамма *P. chlororaphis* ИБ 93 способности к биодegradации 2,4-Д и имазетапира не выявлено.

Таблица 1. Биодеструкция гербицидов (%) штаммами микроорганизмов

Штамм	Спецназ (д.в. трибенурон-метил)	Октапон экстра (д.в. 2,4-Д)	Тапир (д.в. имазетапир)
ИБ 93	26.0	–	–
ИБ 23	41.5	17.3	9.6
ИБ 1.1	30.5	10.5	10.0
УОМ 10	30.5	3.9	11.4
УОМ 11	–	–	–
НЗ.1	30.0	14.6	7.8

Примечание. «–» отсутствие деструкции.

Отмечено, что внесение в среду с нефтью гербицида Спецназ не оказало значимого влияния на процесс биодеструкции углеводов (табл. 2). Наличие препаратов Октапон экстра и Тапир в количестве 1.0 об.% значительно замедляло биодegradацию – в некоторых случаях ее скорость снизилась в 3-4 раза. Вероятно, это связано с ингибирующим действием гербицидов на окислительные ферменты, отвечающие за разложение углеводов.

Таблица 2. Биодеструкция нефти (%) штаммами микроорганизмов

Штамм	Нефть	Нефть + Спецназ	Нефть + Октапон экстра	Нефть + Тапир
ИБ 93	71.2	68.0	17.2	33.2
ИБ 23	74.5	72.5	30.2	39.5
ИБ 1.1	76.8	75.1	37.7	39.1
УОМ 10	74.8	74.4	24.6	26.9
УОМ 11	77.3	79.1	36.5	39.1
НЗ.1	73.2	75.6	35.3	37.3

Все задействованные в исследовании штаммы микроорганизмов синтезировали такой фитогормон как ИУК [Bakaeva et al., 2020; Korshunova et al., 2023]. Наибольшее количество образовывал штамм *P. turukhanskensis* ИБ 1.1 (11261 нг/мл культуральной жидкости),

остальные бактерии образовывали ее в количестве 733-3607 нг/мл (табл. 3). Внесение нефти оказывало стимулирующее воздействие на процесс выработки ИУК. При изучении влияния гербицидов на образование гормона выявлено, что в присутствии Октапона экстра, его количество в культуральной жидкости всех штаммов выросло в 1.1-5.1 раза, вероятно за счет ауксиноподобной структуры 2,4-Д, которая является основой этого препарата. Гербицид Тапир подавлял способность к образованию ИУК у всех микроорганизмов за исключением *P. frederiksbergensis* UOM 11, продукция ИУК которым выросла в 1.8 раза. Гербицид Спецназ оказал противоречивое воздействие на синтез этого фитогормона: у некоторых бактерий его содержание снижалось в 1.1-1.6 раза, у других – увеличивалось в 1.4-5.7 раза. В ходе эксперимента не было обнаружено зависимости уровня выделения ИУК от использованной концентрации загрязнителей.

Таблица 3. Влияние нефти и гербицидов на фитогормональную активность штаммов микроорганизмов

Штамм	Количество ИУК, нг/мл								
	Контроль	Нефть		Спецназ		Октапон экстра		Тапир	
		I	II	I	II	I	II	I	II
ИБ 93	733±35	2014±117	1816±103	453±29	550±40	3674±201	3702±208	<150	<150
ИБ 23	2013±127	11895±613	12891±670	2835±165	3067±175	4135±229	4087±231	<150	<150
ИБ 1.1	11261±897	15347±780	15990±852	16324±875	16489±915	12783±687	12996±679	7890±419	6735±350
UOM 10	1627±75	1783±95	1549±85	6934±368	9233±480	2013±165	1987±128	<150	<150
UOM 11	898±40	5837±305	5684±298	2015±124	2085±125	2541±134	2451±156	1532±109	1633±120
НЗ.1	3607±164	5086±240	5037±267	3105±185	3300±226	4915±276	4867±276	<150	<150

Примечание. I – поллютант вносили в питательную среду в количестве 0.5%; II – поллютант вносили в питательную среду в количестве 1.0%.

SI для изучаемых микроорганизмов составил 1.3-3.2. Высокое значение этого показателя (SI>3) зафиксировано для штаммов *P. chlororaphis* ИБ 93, *P. frederiksbergensis* UOM 11 (табл. 4).

Таблица 4. Влияние нефти и гербицидов на фосфатмобилизующую активность штаммов микроорганизмов

Штамм	Индекс солюбилизации							
	Контроль	Нефть	Спецназ		Октапон экстра		Тапир	
			I	II	I	II	I	II
ИБ 93	3.0±0.2	1.5±0.1	3.0±0.2	3.0±0.2	2.7±0.2	2.8±0.2	1.5±0.1	1.1±0.1
ИБ 23	2.5±0.1	2.5±0.2	2.0±0.1	1.6±0.1	1.6±0.1	1.6±0.1	2.2±0.1	2.2±0.1
ИБ 1.1	1.3±0.1	1.2±0.1	1.5±0.1	1.3±0.1	1.3±0.1	1.1±0.1	1.3±0.1	1.1±0.1
UOM 10	1.8±0.1	1.6±0.1	1.5±0.1	1.3±0.1	1.5±0.1	1.7±0.1	1.5±0.1	1.5±0.1
UOM 11	3.2±0.2	2.0±0.1	3.0±0.2	3.0±0.2	2.4±0.2	2.2±0.1	1.5±0.1	1.2±0.1
НЗ.1	1.5±0.1	1.3±0.1	1.5±0.1	1.5±0.1	1.5±0.1	1.5±0.1	1.3±0.1	1.1±0.1

Примечание. I – поллютант вносили в питательную среду в количестве 0.5%; II – поллютант вносили в питательную среду в количестве 1.0%.

Несмотря на то, что в присутствии гербицидов Октапон экстра или Тапир диаметр колоний бактерий значительно вырос (исключение – *P. schmalbachii* НЗ.1), SI – снизился. Наиболее заметный ингибирующий эффект на фосфатмобилизующую активность микроорганизмов оказал Тапир, при наличии которого SI уменьшился в 1.1-2.7 раза. При внесении в среду Спецназа этот показатель незначительно снижался, но у штаммов

P. frederiksborgensis UOM 11 и *P. chlororaphis* ИБ 93 он остался достаточно высоким (SI=3.0). Растворение фосфата кальция в присутствии нефти также шло менее активно, чем без нее. SI штаммов снизился в среднем в 1.3 раза, но в отличие от гербицидов, нефть не оказывала влияния на диаметр колоний бактерий. Так же, как и в случае с фитогормональной активностью, влияния концентрации загрязнителей на способность бактерий к растворению неорганического фосфата выявлено не было.

Антагонизм в отношении фитопатогенных микромицетов был обнаружен только у штаммов *P. putida* ИБ 23 и *P. chlororaphis* ИБ 93. При наличии нефти зоны вокруг колоний бактерий, первоначально свободные от роста микромицетов, достаточно быстро исчезали, что, скорее всего, связано со способностью нефти (в небольших количествах) стимулировать рост микроскопических грибов [Рафикова и др., 2020; Chernykh. Baeva, 2018]. Гербицид Тапир оказывал стимулирующее действие на развитие бактерий, в его присутствии отмечено увеличение скорости роста бактериальных колоний, а также пигментообразования. Наличие Октапона экстра и Спецназа также приводило к усилению пигментации и активации роста микроорганизмов, но при этом наблюдалось выраженное фунгистатическое действие гербицидов. В совокупности оба этих фактора повлияли на то, что вокруг колоний бактерий образовалась зона, где рост микромицетов был полностью подавлен.

Одной из задач исследований было сформировать микробно-растительные ассоциации и оценить эффективность взаимоотношений в них по способности бактерий снижать фитотоксический эффект загрязнителей на всхожесть и прорастание семян растений. Для эксперимента были отобраны микроорганизмы, продуцирующие ИУК в количестве более 2000 нг/мл культуральной жидкости.

Всхожесть семян ячменя на нефтезагрязненной почве и в почве с гербицидом Тапир оказалась одинаково высокой – 100% (табл. 5). Бактеризация всеми микроорганизмами снижала ее на 4-8%. В почве с нефтью инокуляция ячменя не оказывала значимого достоверного эффекта на его морфометрические характеристики, только штамм *P. schmalbachii* НЗ.1 способствовал увеличению надземной и подземной части проростков (на 12.3 и 13.7% соответственно). В почве, загрязненной гербицидом Тапир, при использовании микроорганизмов длина побегов возросла на 7.7-14.9%, а корней – на 9.1-22.0%.

Таблица 5. Влияние бактериализации на всхожесть и морфометрические показатели растений ячменя в почве с нефтью или гербицидом Тапир

Вариант	Всхожесть, %		Длина побега				Суммарная длина корней			
			мм		% к контролю		мм		% к контролю	
	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир
Контроль	100	100	25.91±1.78	25.56±1.38	-	-	190.09±11.5	167.08±10.54	-	-
ИБ 23	96	96	23.57±1.34	29.18±1.68	-	14.2	174.91±9.97	188.27±11.48	-	12.7
ИВ 1.1	96	96	24.44±1.42	27.54±1.73	-	7.7	195.31±11.73	182.29±12.39	2.7	9.1
НЗ.1	92	96	29.09±1.71	29.38±1.70	12.3	14.9	216.04±12.08	203.92±10.99	13.7	22.0

У инокулированных семян клевера всхожесть в почве с нефтью уменьшилась не более чем на 4%, в почве с гербицидом – возросла в пределах 4-12% по сравнению с необработанными растениями (табл. 6). Бактерии способствовали усилению роста побегов на 20.8-56.9%, а удлинению корней – на 30.9-36.4%. В почве с гербицидом возрастание длины побегов и корней клевера (на 17.4 и 18.0% соответственно) происходило только под влиянием штамма *P. schmalbachii* НЗ.1.

Таблица 6. Влияние бактериализации на всхожесть и морфометрические показатели растений клевера в почве с нефтью или гербицидом Тапир

Вариант	Всхожесть, %		Длина побега				Длина корней			
			мм		% к контролю		мм		% к контролю	
	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир	Нефть	Тапир
Контроль	68	48	9.56±0.67	15.92±0.73			10.81±0.64	16.75±0.99		
ИБ 23	68	52	13.46±0.88	15.54±0.91	40.8	–	14.15±0.89	17.77±0.68	30.9	6.1
ИБ 1.1	64	60	15.00±0.91	15.50±0.72	56.9	–	14.75±0.99	16.43±0.97	36.4	–
НЗ.1	70	56	11.55±0.71	18.69±1.09	20.8	17.4	9.64±0.68	19.77±1.34	–	18.0

Таким образом, установлено, что изученные микроорганизмы рода *Pseudomonas* обладают ценными для экологической биотехнологии характеристиками, такими как способность к разложению д.в. гербицидов, биодеструкции нефти в присутствии дополнительных поллютантов (в ряде случаев частичное), фитогормональная, фосфатмобилизующая, антагонистическая активности. Они также сохраняют свои ростстимулирующие свойства в стрессовых условиях (в присутствии токсичных веществ). Бактериализация положительно влияла на морфометрические показатели растений ячменя и клевера в загрязненной почве. В дальнейшем предполагается использование полученных результатов для разработки новых способов биологической ликвидации последствий комбинированного загрязнения почвы нефтью и гербицидами, основанных на совместном применении растений-фитомелиорантов и полифункциональных бактерий-деструкторов, стимулирующих их рост и развитие.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00130, <https://rscf.ru/project/23-24-00130/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенков И.А., Милехина Е.И., Готоева М.Т. и др. Свойства углекислородоокисляющих бактерий, изолированных из нефтяных месторождений Татарстана. Западной Сибири и Вьетнама // Микробиология. 2006. Т. 75 (1). С. 82–89.
2. Бубнов А.А., Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М. Экологическая оценка гербицидов, используемых при лесовыращивании // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2022. № 4. С. 58–75. DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.58
3. Дзержинская И.С. Питательные среды для выделения и культивирования микроорганизмов. Астрахань: Изд-во АГТУ. 2008. 348 с.
4. Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Искужина М.Г. и др. Влияние бактерий-нефтедеструкторов на рост и развитие фиторемедиантов // Защита окружающей среды от экотоксикантов: международный опыт и российская практика. Материалы VI международной научно-технической конференции. Уфа. 9 апреля 2024 года. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ». 2024. С. 106–108.
5. Пиковская Р.И. Мобилизация фосфатов в почве в связи с жизнедеятельностью некоторых видов микробов // Микробиология. 1948. Т. 17 (5). С. 362–370.
6. Рафикова Г.Ф., Кузина Е.В., Столярова Е.А. и др. Комплексы микромицетов выщелоченного чернозема при загрязнении нефтью и внесении микроорганизмов-

- нефтедеструкторов // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54 (2). С. 107–115. DOI: [10.31857/S0026364820020099](https://doi.org/10.31857/S0026364820020099)
7. Стариков С.Н., Четвериков С.П. Штамм *Enterobacter sp.* УОМ-3 способен к синхронной деструкции галогенсодержащих гербицидов и синтезу индол-3-уксусной кислоты // Экобиотех. 2020. Т. 3 (4). С. 716–721. DOI: [10.31163/2618-964X-2020-3-4-716-721](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-4-716-721)
 8. Филиппова О.И., Куликова Н.А. Оценка фитотоксичности гербицида имазамокса в почвах с использованием различных методов биотестирования // Агрехимический вестник. 2018. № 2. С. 37–41. DOI: [10.24411/0235-2516-2018-00025](https://doi.org/10.24411/0235-2516-2018-00025)
 9. Четвериков С.П., Логинов О.Н. Новые метаболиты *Azotobacter vinelandii*, обладающие антигрибной активностью // Микробиология. 2009. Т. 78 (4). С. 479–483.
 10. Ambaye T.G., Chebbi A., Formicola F. et al. Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives // Chemosphere. 2022. V. 293. P. 133572. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.133572](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572)
 11. Bakaeva M., Kuzina E., Vysotskaya L. et al. Capacity of *Pseudomonas* strains to degrade hydrocarbons, produce auxins and maintain plant growth under normal conditions and in the presence of petroleum contaminants // Plants. 2020. V. 9 (3). P. 379. DOI: [10.3390/plants9030379](https://doi.org/10.3390/plants9030379)
 12. Chen M., Xu P., Zeng G. et al. Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs // Biotechnol. Adv. 2015. V. 33 (6). P. 745–755. DOI: [10.1016/j.biotechadv.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003)
 13. Chernykh N.A., Baeva Y.I. Microbiocenoses of oil-polluted soils. Russian Journal of General Chemistry. 2018. V. 88 (13). P. 2903–2907. DOI: [10.1134/S1070363218130121](https://doi.org/10.1134/S1070363218130121)
 14. Korshunova T.Y., Bakaeva M.D., Kuzina E.V. et al. Role of bacteria of the genus *Pseudomonas* in the sustainable development of agricultural systems and environmental protection (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2021. V. 57. P. 281–296. DOI: [10.1134/S000368382103008X](https://doi.org/10.1134/S000368382103008X)
 15. Korshunova T., Kuzina E., Mukhamatdyarova S. et al. Promising strains of hydrocarbon-oxidizing pseudomonads with herbicide resistance and plant growth-stimulating properties for bioremediation of oil-contaminated agricultural soils // Agriculture. 2023. V. 13 (6). P. 1111. DOI: [10.3390/agriculture13061111](https://doi.org/10.3390/agriculture13061111)
 16. Lisboa P.H.G., de Andrad, P.H.M., Machado P.C. et al. Isolation and in vitro screening of plant growth-promoting rhizobacteria from *Solanum lycocarpum* St. Hil., an endemic plant of the Brazilian tropical savannah // Afr. J. Microbiol. Res. 2021. V. 5. P. 253–261. DOI: [10.5897/AJMR2021.9524](https://doi.org/10.5897/AJMR2021.9524)
 17. Raffa C.M., Chiampo F. Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review // Bioengineering. 2021. V. 8 (7). P. 92. DOI: [10.3390/bioengineering8070092](https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092)
 18. Raymond R.L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Develop. Industr. Microbiol. 1961. V. 2 (1). P. 23–32.
 19. Ye S., Zeng G., Wu H. et al. Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation – A review // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2017. V. 47 (16). P. 1528–1553. DOI: [10.1080/10643389.2017.1386951](https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1386951)

Цитировать как

Кузина Е.В., Искужина М.Г., Мухаматдырова С.Р., Рамеев Т.В., Коршунова Т.Ю. Углекислородокисляющие бактерии, устойчивые к гербицидам, перспективные для фиторемедиации // Экобиотех, 2024, Т. 7 № 3. С. 156–163. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163)
EDN: MUCUVF

Cited as

Kuzina E.V., Iskuzina M.G., Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V., Korshunova T.Yu. Hydrocarbon-oxidizing bacteria resistant to herbicides, promising for phytoremediation. *Ekobiotek*. 2024, V. 7 (3). P. 156–163. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163)
EDN: MUCUVF (In Rus.)