УДК 579.222

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШТАММОВ УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ ИЗ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

Богатыренко Е.А.[1]*, Ким А.В.[1], Тегай В.В.[1], Дункай Т.И. [1], Перевалова П.О.[1]

[1] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

bogatyrenko.ea@dvfu.ru, kim_avyache@dvfu.ru, tegai.vv@dvfu.ru, dunkai.ti@dvfu.ru, perevalova.po@dvfu.ru

ORCID: 0000-0002-4250-5715, 0000-0001-8560-5452, 0009-0003-1174-999X, 0000-0002-2306-1311, 0009-0005-4974-1904

Аннотация

Изучена способность трех штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных из нефтезагрязненных почв юга Приморского края, к росту при различных температурах (5 ˚C, 22 ˚C, 37 ˚C) и концентрациях NaCl (10.0, 27.5, 35.0, 40.0 г/л). Штамм *Rhodococcus* sp. 1A сохранял жизнеспособность во всем диапазоне температур при концентрации NaCl 35 г/л, штамм *Rhodococcus* sp. 3B – при 27.5 г/л и штамм *Pseudomonas* sp. 25 – при 40.0 г/л. Все штаммы бактерий продемонстрировали способность к окислению нефти в концентрации 1–5 %. При концентрации 1 % степень деструкции варьировала в пределах 55.33–71.23 %, при максимальной концентрации нефти (5 %) окислительная способность уменьшалась до 26.11–38.23 %. Проверка биологической безопасности показала, что все исследуемые бактериальные штаммы обладают слабой адгезивностью, у них отсутствуют плазмокоагулазная, фибринолитическая, лецитиназная активности. Гемолитическая активность была обнаружена только у штамма *Rhodococcus* sp. 1A. Штамм *Rhodococcus* sp. 1A резистентен к 7 из 14 антибиотиков, *Rhodococcus* sp. 3B и *Pseudomonas* sp. 25 – к 3 антибиотикам.

Ключевые слова: нефть; биоремедиация; температура; соленость; факторы патогенности; антибиотикочувствительность

Введение

Нефть – одно из важнейших для человека природных ископаемых, также является и стратегически значимым товаром в мировой экономической системе.

Ежегодное увеличение добычи этого ресурса ведет не только к постепенному истощению запасов нефти, но и к увеличивающимся по масштабам и частоте возникновения экологическим катастрофам. По данным Ростехнадзора, в период с 2014 по 2024 гг. произошли 532 аварийные ситуации, влияющие как на здоровье населения, так и на состояние окружающей среды. Одним из природных компонентов, испытывающим влияние нефти и нефтяных углеводородов, является почва. Сложный состав нефти, в которую входит органическая и неорганическая компоненты, определяет ее негативное воздействие на окружающую среду (Дорожукова, Янин, 2004). Вследствие попадания нефтепродуктов в почву изменяется ее гранулометрический и фракционный состав, морфологическое строение и окраска, соотношение макро- и микроэлементов, ухудшаются водно-физические свойства и естественная аэрация, увеличивается гидрофобность, резко повышается токсичность (Степанова, 2020).

На основании перечисленного возникает закономерная необходимость в уменьшении влияния нефти и нефтяных углеводородов на почвенную среду. Существующие методы очистки почв, включающие механические, термические, физико-химические и биологические, часто применяются на практике и показывают свою эффективность (Копорулин, 2024). Среди последних особенно выделяются микробиологические способы деструкции нефти, в основе которых лежит естественный процесс разложения за счет способности микроорганизмов окислять углеводороды. Углеводородокисляющие микроорганизмы, благодаря своей метаболической пластичности, толерантности к условиям окружающей среды и высоких темпов роста, успешно используются в целях биоремедиации, что доказано в многочисленных научных источниках (Zhang et al., 2016; Ali et al., 2021).

Есть мнение о том, что наиболее эффективными биопрепаратами являются те, которые созданы на основе аборигенных нефтеокисляющих микроорганизмов из конкретного региона и которые приспособлены к определенным абиотическим факторам среды обитания (Иванова и др. 2021)

Несмотря на хроническое загрязнение антропогенно-преобразованных почв Приморского края нефтью и нефтепродуктами (Жарикова, 2022), углеводородокисляющий потенциал аборигенной почвенной микробиоты этого региона совершенно не исследован. В связи с этим, цель работы – изучить метаболические и физиологические особенности углеводородокисляющих штаммов бактерий, выделенных из нефтезагрязненных почв юга Приморского края.

Материалы и методы

Объекты исследования. Для работы были использованы 3 штамма бактерий (*Rhodococcus* sp. 1A, *Rhodococcus* sp. 3B, *Pseudomonas* sp. 25) из коллекции Научно-исследовательской лаборатории морской микробиологии Института Мирового океана (Школы) ДВФУ. Микроорганизмы были выделены в 2025 году из образцов почв с территорий Приморского края, подверженных хроническому антропогенному загрязнению нефтепродуктами. Все они продемонстрировали активный рост на голодной минеральной среде, содержащей 1 % сырой нефти в качестве единственного источника углерода.

Оценка способности исследуемых бактерий к росту при различных значениях солености и температуры. Для оценки выживаемости штаммов бактерий при различных концентрациях солености и температуры культуры бактерий вносили в стеклянные колбы, содержащие 50 мл жидкой универсальной питательной среды СММ с различной концентрацией NaCl (10.0; 27.5; 30.0 и 40.0 г/л) (Бузолева, 2011). Инкубацию проводили при температурах 5 °C, 22 °C и 37 °C в течение 7 суток. По окончании эксперимента делали высев на аналогичную плотную питательную среду для подтверждения жизнеспособности клеток.

Определение способности бактерий к утилизации различных концентраций нефти. Для оценки углеводородокисляющей активности культуры микробных клеток вносили в стеклянные колбы, содержащие 100 мл минеральной среды Ворошиловой-Диановой с добавлением NaCl в оптимальной для каждого штамма концентрации (Ворошилова, Дианова, 1952). В качестве единственного источника углерода в колбы добавляли сырую нефть в концентрациях 1.0, 1.5, 3.0, и 5.0 %. Конечную концентрацию микробных клеток в среде доводили до 10^6 кл/мл. Инкубацию проводили на качалке при оптимальной для каждого штамма температуре в течение 1 месяца. В качестве контроля использовали стерильную минеральную среду с нефтью. Опыт повторяли трижды. Остаточное содержание нефтепродуктов определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.116-97. Степень утилизации бактериями нефти выражали в процентах и оценивали по изменению исходных значений с учетом контроля.

Изучение биологической безопасности исследуемых штаммов бактерий. Способность бактерий к адгезии определяли на основе расчета индекса адгезивности микроорганизмов (ИАМ) к эритроцитам человека I группы Rh (+) по известной методике (Бриллис и др., 1986). Микроорганизмы считали

Богатыренко Е. А., Ким А. В., Тегай В. В., Дункай Т. И., Перевалова П. О., Метаболические и физиологические особенности штаммов углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязнённых почв // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 56; URL: https://jbks.ru/archive/issue-56/article-10; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

неадгезивными при ИАМ ≤ 1.75, низкоадгезивными - при ИАМ от 1.76 до 2.5, среднеадгезивными – при ИАМ от 2.51 до 4.0 и высокоадгезивными при ИАМ> 4.0.

Для выявления гемолитической активности суточные культуры бактерий высевали на кровяной агар и инкубировали при температуре 37 °С в течение 48 часов, после чего фиксировали наличие или отсутствие зеленовато-коричневой окраски вокруг колоний вследствие образования метгемоглобина или прозрачных зон гемолиза различного размера (Государственная фармакопея РФ XIII издания).

Для выявления плазмокоагулазной активности в стерильные пробирки типа Эппендорф вносили суточные культуры бактерий и 0.3 мл цитратной плазмы, разведенной раствором NaCl 0.9 % в соотношении 1:5. После инкубации при температуре 37 °С отмечали появление или отсутствие хлопьев (Государственная фармакопея РФ XIII издания).

Для выявления фибринолитических свойств в стерильные пробирки вносили 0,1 мл цитратной плазмы, 0.4 мл раствора NaCl 0.9 %, 0.25 мл суточной культуры бактериальных клеток, 0.25 мл раствора $CaCl_2$ 0.25 %. Пробирки встряхивали и помещали в термостат при температуре 37°С в течение 20 мин. Если в пробирках после инкубации образуется сгусток и через 2 ч не отмечается его разжижение, то считают, что испытуемая культура не обладает фибринолитическими свойствами (Государственная фармакопея РФ XIII издания).

Лецитиназную активность выявляли с использованием желточно-солевого агара Чистовича (ЖСА). О наличии активности судили по зонам помутнения среды вокруг колоний (Государственная фармакопея РФ XIII издания).

Для определения антибиотикочувствительности исследуемых штаммов бактерий применяли диско-диффузионный метод (ДДМ) в соответствии с МУК 4.2.1890-04. В работе использовали 14 видов антибиотиков различных классов: амикацин, гентамицин, имипенем, ципрофлоксацин, норфлоксацин, ванкомицин, эритромицин, амоксициллин, ампициллин, рифампицин, сульфаметоксазол, тетрациклин, канамицин, левомицетин.

Статистическая обработка данных. Все эксперименты проводили в трех повторностях. Результаты по оценке степени утилизации нефти бактериями представляли в виде средних значений со стандартными отклонениями, которые рассчитывали с использованием программы Microsoft

Богатыренко Е. А., Ким А. В., Тегай В. В., Дункай Т. И., Перевалова П. О., Метаболические и физиологические особенности штаммов углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязнённых почв // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 56; URL: https://jbks.ru/archive/issue-56/article-10; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

Excel 2019. Для исследования адгезивных свойств каждого штамма бактерий проводили расчет ИАМ с учетом не менее 50 эритроцитов.

Результаты и обсуждение

Оценка способности исследуемых бактериальных штаммов к росту при разных значениях температур и солености

Для целей биоремедиации важны бактерии, способные адаптироваться к широкому диапазону внешних факторов, таких как pH среды, соленость или температура. Температурный режим почв зависит от климата, широты и глубины. В среднем по миру на глубине 20 см среднегодовые значения варьируют от -12 °C в арктических широтах до +28 °C на экваторе, при этом, например, в пустынях верхний слой почвы может прогреваться до +50 °C и выше. Температура окружающей среды напрямую влияет на жизнедеятельность микроорганизмов, их популяционную динамику и способность к окислению нефтяных углеводородов. Так, согласно исследованиям, термотолерантные бактерии, выделенные из проб грунта и воды России, Казахстана и Антарктиды, способны утилизировать нефть и дизельное топливо как при 24 °C, так и при 45 °C (Делеган и др., 2016). Помимо этого, авторы отмечают устойчивость некоторых выделенных бактерий к повышению содержания хлорида натрия в среде до 7 % (Делеган и др., 2016).

Зачастую помимо самой нефти, в почву попадают и высокоминерализованные нефтепромысловые воды, а также токсичные солесодержащие реагенты, используемые при добыче. В связи с этим концентрация соли может возрастать, достигая содержания от 1.5 до 2.4 % в лугово-каштановых почвах, от 6,8 до 9.0 % в соровых солончаках (Ибатуллина, 2012). Поэтому также важна проверка способности бактерий, применяемых для очистки нефтезагрязненных почв, выдерживать различные концентрации соли.

Результаты наших собственных исследований по изучению способности роста углеводородокисляющих бактерий в широком диапазоне температур и солености представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рост исследуемых штаммов бактерий при различных значениях температур и солености

Название штамма бактерий	Концентрация NaCl											
	10 г/л			27.5 г/л			35 г/л			40 г/л		
	5 °C	22	37	5 °C	22	37	5 °C	22	37	5 °C	22	37

Богатыренко Е. А., Ким А. В., Тегай В. В., Дункай Т. И., Перевалова П. О., Метаболические и физиологические особенности штаммов углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязнённых почв // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 56; URL: https://jbks.ru/archive/issue-56/article-10; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

		°C	°C		°C	°C		°C	°C		°C	°C
Rhodococcus sp. 1A	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-
Rhodococcus sp. 3B	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-
Pseudomonas sp. 25	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+

Как видно из представленных данных, только при концентрации хлорида натрия 10 г/л все исследуемые штаммы продемонстрировали рост во всем диапазоне температур. Наиболее интенсивный рост всех штаммов бактерий отмечался при температуре 22 °C. Повышение содержания соли до 27.5 г/л приводило к остановке роста штаммов *Rhodococcus* sp. 1A и *Pseudomonas* sp. 25 при температуре 37 °C. Однако рост микроорганизмов возобновлялся при более высоких концентрациях хлорида натрия – у штамма *Rhodococcus* sp. 1A при 35 г/л, а у *Pseudomonas* sp. 25 – при 40.0 г/л. Подобные неоднозначные результаты указывают на сложные адаптационные механизмы бактерий, которые реализуются при сочетанном воздействии абиотических факторов окружающей среды.

Штамм *Rhodococcus* sp. 1A сохранял жизнеспособность во всем диапазоне температур при концентрации NaCl 35.0 г/л, штамм *Rhodococcus* sp. 3B – при 27.5 г/л и штамм *Pseudomonas* sp. 25 – при 40.0 г/л. Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для создания микробного консорциума, способного осуществлять биодеструкцию в широком диапазоне температур и солености за счет активности его отдельных штаммов бактерий.

Оценка способности исследуемых штаммов бактерий к росту при различных концентрациях нефти

Помимо перечисленных свойств, важной характеристикой для углеводородокисляющих бактерий, используемых в биоремедиации, является их способность выживать и расти при различном содержании нефти в среде. Установлено, что высокое содержание нефти и нефтепродуктов влияет на большинство микроорганизмов, ингибируя их жизнедеятельность за счет подавления ферментативной активности (Wahla et al., 2020). В связи с этим, наиболее предпочтительными являются бактериальные штаммы, способные усваивать широкий спектр углеводородов и обладающие высокой токсикорезистентностью.

Способность к окислению углеводородов нефти и других органических веществ – важный критерий выбора бактерий для эффективной очистки

Богатыренко Е. А., Ким А. В., Тегай В. В., Дункай Т. И., Перевалова П. О., Метаболические и физиологические особенности штаммов углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязнённых почв // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 56; URL: https://jbks.ru/archive/issue-56/article-10; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

нефтезагрязненных почв. Поэтому для создания качественного биопрепарата на основе углеводородокисляющих бактерий необходимо проведение исследований по оценке их метаболического потенциала. Для этого инкубацию бактерий проводили в присутствии 1–5 % сырой нефти при оптимальных условиях, которые были определены в ходе предыдущего этапа работы (температура 22°С и концентрация NaCl 10 г/л). В результате проведенной нами работы установлено, что все штаммы бактерий способны к утилизации нефти с разной эффективностью (табл. 2).

Таблица 2 – Степень утилизации нефти исследуемыми штаммами бактерий, %

Название штамма бактерий	Концентрация нефти			
	1 %	1.5 %	3 %	5 %
Rhodococcus sp. 1A	56.12 ± 0.02	43.02 ± 0.01	41.49 ± 0.04	38.23 ± 0.18
Rhodococcus sp. 3B	71.23 ± 0.02	53.76 ± 0.03	36.01 ± 0.01	26.11 ± 0.02
Pseudomonas sp. 25	55.33 ± 0.05	52.25 ± 0.02	45.77 ± 0.01	37.48 ± 0.09

При содержании нефти в среде 1–1.5 % наиболее высокую степень окисления поллютанта демонстрирует штамм *Rhodococcus* sp. 3B. При повышении концентрации нефти до 3–5 % большую эффективность проявляют штаммы *Rhodococcus* sp. 1A. и *Pseudomonas* sp. 25.

Основные параметры, которые учитываются при создании консорциумов это наличие у микроорганизмов разных ферментных систем, которые будут направлены на конверсию различных по структуре углеводородов нефти, таким образом снижается конкуренция за субстрат. В связи с чем, эффективнее использовать микроорганизмы, относящиеся к разным таксономическим группам с определенными метаболическими путями деградации углеводородов (Ким и др. 2025).

Представители рода *Rhodococcus* способны разрушать алифатические углеводороды всеми известными на сегодняшний день способами за счет продукции различных алкангидрокислаз. Помимо этого, родококки могут трансформировать и деградировать широкий спектр углеводородов, включая ароматические, нитроароматические, поли- и гетероциклические углеводороды, полихлорированные бифенилы, фенолы и т.д. (Ивишина и др., 2021).

Pseudomonas spp. окисляют разнообразные по химической структуре углеводороды, в частности у них найдены нафталин диоксигеназы катализирующие конверсию более 50 ароматических углеводородов (Abubakar et al., 2024).

Выявление факторов патогенности и антибиотикорезистентности исследуемых бактериальных штаммов

Помимо очевидной способности к окислению углеводородов нефти, одним из основных фильтров по отбору полезных микроорганизмов является их биологическая безопасность для человека, животных и окружающей среды. Поэтому особенное внимание заслуживает проверка факторов вирулентности. Присутствие патогенных микроорганизмов и/или продуктов их метаболизма может привести к нарушению естественного микробного сообщества или вторичному загрязнению территории, что нанесет экологический и экономический ущерб. Внесение в среду недостаточно изученных микроорганизмов, например, в составе органического удобрения, может увеличить локальное содержание мобильных генетических элементов и частоту горизонтального переноса генов в микробном сообществе (Economou, Gousia, 2015).

Кроме того, важной характеристикой микроорганизмов, используемых для очистки среды от поллютантов, является их антибиотикорезистентность. С одной стороны, микроорганизмы, обладающие генами, связанными с устойчивостью к антибиотикам, указывают на адаптивные преимущества и выживаемость в загрязненных конкурентных средах (Zaman et al., 2025). С другой стороны, почвенные бактерии с мультирезистентностью являются глобальным резервуаром генов устойчивости. Главный риск заключается в способности этих бактерий передавать защитные механизмы патогенным микроорганизмам через горизонтальный перенос генов. В связи с этим, чувствительность к антибиотикам стоит рассматривать с точки зрения будущего контроля распространения бактерий с генами устойчивости в природной среде (Дегтярева и др., 2021).

Вследствие вышеперечисленного, возникает необходимость оценки различных свойств микроорганизмов перед их внесением в почвенную среду.

В результате оценки адгезивных свойств исследуемых нами бактерий установлено, что штаммы *Rhodococcus* sp. 1A и *Pseudomonas* sp. 25 относятся к неадгезивным, их ИАМ равны 1.21 и 1.18 соответственно. Штамм *Rhodococcus* sp. 3B является низкоадгезивным, ИАМ = 2.09.

Также вследствие определения других факторов патогенности было обнаружено, что исследуемые бактериальные штаммы не обладают плазмокоагулазной, фибринолитической и лецитиназной активностью.

Что касается гемолитической активности, то положительная реакция, а именно образование прозрачной зоны гемолиза вокруг колоний, была отмечена только у штамма *Rhodococcus* sp. 1A. Известно, что гемолизины – вещества, разрушающие эритроциты, продукция которого является фактором патогенности микроорганизмов. В то же время имеются сведения о том, что бактерии рода *Rhodococcus* являются продуцентами трегалолипидов – биосурфактантов, проявляющих гемолитическую активность (Zaragoza et al., 2010). В связи с этим, оценка биологической безопасности *Rhodococcus* sp. 1A требует проведения дополнительных исследований.

Результаты эксперимента по определению чувствительности микроорганизмов к антибиотикам, проведенный диско-диффузионным методом, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Антибиотикочувствительность исследуемых штаммов бактерий

№	Антибиотик	Название штамма бактерий		
		Rhodococcus sp. 1A	*Rhodococcus* sp. 3B	*Pseudomonas* sp. 25
1	Амикацин	–	–	–
2	Гентамицин	–	–	–
3	Имипенем	–	–	–
4	Ципрофлоксацин	–	–	–
5	Норфлоксацин	–	–	–
6	Ванкомицин	+	–	–
7	Эритромицин	+	–	+
8	Амоксициллин	+	–	–
9	Ампициллин	+	+	+
10	Рифампицин	+	±	+
11	Сульфаметоксазол	+	+	–
12	Тетрациклин	–	±	–
13	Канамицин	–	+	±
14	Левомицетин	+	–	–

Примечание: + устойчивый, – чувствительный, ± умеренно устойчивый

Обнаружено, что штамм *Rhodococcus* sp. 1A оказался устойчив к 7 из 14 взятых в работу антибиотиков. Штаммы *Rhodococcus* sp. 3B и *Pseudomonas* sp. 25 проявляли резистентность к 3 из 14 антибиотиков, а также были умеренно устойчивы к действию канамицина (*Pseudomonas* sp. 25), рифампицина и тетрациклина (*Rhodococcus* sp. 3B).

Заключение

Богатыренко Е. А., Ким А. В., Тегай В. В., Дункай Т. И., Перевалова П. О., Метаболические и физиологические особенности штаммов углеводородокисляющих бактерий из нефтезагрязнённых почв // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 56; URL: https://jbks.ru/archive/issue-56/article-10; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-10

Результаты работы показали, что все исследуемые штаммы бактерий обладают высокой углеводородокисляющей активностью и способны расти в широком диапазоне температур и солености, что делает их перспективными для биоремедиации нефтезагрязненных территорий. Оценка биологической безопасности на основе выявления факторов вирулентности и антибиотикочувствительности показала, что штаммы *Rhodococcus* sp. 3B и *Pseudomonas* sp. 25 обладают низким патогенным потенциалом. Исследование биологической безопасности *Rhodococcus* sp. 1A требует проведения дополнительных исследований.

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-14-20066) и софинансировании субсидией из краевого бюджета Приморского края (Субсидия №26-810-62470-2-0063-000010, Соглашение № 30-2026-002414) в рамках научного проекта «Биоматрица для рекультивации почв подверженных загрязнению нефтепродуктами».

Список литературы

1. Бриллис В.И., Брилене Т.А., Ленцнер Х.П., Ленцнер А.А. Методика изучения адгезивного процесса микроорганизмов // Лабораторное дело. 1986. № 4. С. 210-212.
2. Бузолева, Л.С. Микробиологическая оценка качества природных вод, летняя учебно-полевая практика: учебное пособие по летней полевой практике студентов // Владивосток. 2011. 88 с.
3. Ворошилова А.А., Дианова Е.В. Окисляющие нефть бактерии – показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // Микробиология. 1952. Т. 21, № 4. С. 408-415.
4. Государственная фармакопея Российской Федерации XIII издания. ОФС.1.7.2.0012.15 «Производственные пробиотические штаммы и штаммы для контроля пробиотиков» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-13/
5. Дегтярева И.А., Бабынин Э.В., Мотина Т.Ю., Салаватуллина А.А. Изоляция, идентификация и полногеномный анализ углеводородокисляющего штамма *Staphylococcus warneri* // Вестн. Пермского нац. исследовательского политехнического ун-та. 2021. № 1. С. 5-13.
6. Делеган Я.А., Ветрова В.Н., Акимов В.Н., Титок М.А., Филонов А.Е., Боронин А.М. Термотолерантные бактерии-нефтедеструкторы, выделенные из проб грунта и воды географически удаленных регионов //

Прикладная биохимия и микробиология. 2016. Т. 52, № 4. С. 383-391. https://doi.org/10.7868/S0555109916040024

7. Дорожукова С.Л., Янин Е.П. Экологические проблемы нефтегазодобывающих территорий Тюменской области. М.: ИМГРЭ, 2004. 56 с.

8. Жарикова Е.А. Содержание нефтепродуктов в естественных и антропогенных почвах Приморского края // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: География. Геоэкология. 2022, №1. С. 83–92.

9. Ибатуллина И.З. Биологическая активность и восстановление засоленных почв при нефтяном загрязнении: дис. ... канд. биол. наук. М., 2012. – 150 с.

10. Иванова А.Е., Борзенков И.А., Соколова Д.Ш. Катаболический потенциал и сурфактантная активность галотолерантных углеводородокисляющих бактерий// Микробиология. 2021. Т.90, №4. С. 387–399. https://doi.org/10.31857/S0026365621040054

11. Ившина И.Б., Куюкина М.С., Каменских Т.Н., Криворучко А.В., Тюмина Е.А., Елькин А.А. Углеводородокисляющие родококки: особенности биологической организации под воздействием экополлютантов. Атлас-монография. УрО РАН, 2021. 140 с.

12. Ким А.В., Богатыренко Е.А., Дункай Т.И. Оценка эффективности окисления нефтяных углеводородов консорциумами бактерий, выделенных из Японского и Охотского морей // Прикладная биохимия и микробиология. 2025. Т. 61, № 6. С. 600–610.

13. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных и сточных вод методом колоночной хроматографии с гравиметрическим окончанием: ПНД Ф 14.1:2.116-97. – М.: Минприроды РФ, 2004. – 16 с.

14. Копорулин, А. А. Основные методы ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на нефтеперерабатывающих предприятиях // Вестн. науки. 2024. Т. 4, № 11 (80). С. 1300-1304.

15. МУК 4.2.1890-04. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам: Методические указания. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004, 91 с.

16. Степанова Н.Е. Контроль и основные характеристики состава нефти как загрязнителя геологической среды // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 151-156.

17. Abubakar A., Abioye O.P., Aransiola S.A., Maddela N.R., Prasad R. // Environmental Chemistry and Ecotoxicology. 2024. V. 6. P. 26–32. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001

18. Ali M.H., Khan M.I., Bashir S., Azam M., Naveed M., Qadri R., Bashir S., Mehmood F., Shoukat M.A., Li Y., Alkahtani J., Elshikh M. S., Dwiningsih Y. Biochar and Bacillus sp. MN54 Assisted Phytoremediation of Diesel and Plant Growth Promotion of Maize in Hydrocarbons Contaminated Soil // Agronomy. 2021. V. 11(9), art. 1795. https://doi.org/10.3390/agronomy11091795.

19. Economou V., Gousia P. Agriculture and food animals as a source of antimicrobial-resistant bacteria // Infection and Drug Resistance. 2015. V. 8. P. 49-61. https://doi.org/10.2147/IDR.S55778

20. Wahla A.Q., Anwar S., Mueller J.A., Arslan M., Iqbal S. Immobilization of metribuzin degrading bacterial consortium MB3R on biochar enhances bioremediation of potato vegetated soil and restores bacterial community structure // J Hazard Mater. 2020. V.390. art. 121493. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121493.

21. Zaragoza A., Aranda F.J., Espuny M.J., Teruel J.A. Hemolytic activity of a bacterial trehalose lipid biosurfactant produced by *Rhodococcus* sp.: evidence for a colloid-osmotic mechanism // Langmuir. 2010. V. 26, № 11. P. 8567-8572. https://doi.org/10.1021/la904637k

22. Zhang H., Tang J., Wang L., Liu J., Gurav R.G., Sun K. A novel bioremediation strategy for petroleum hydrocarbon pollutants using salt tolerant *Corynebacterium variabile* HRJ4 and biochar // Journal of Environmental Sciences. 2016. V. 47. P. 7–13. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.023

References

1. Brillis V.I., Brilene T.A., Lenzner H.P., Lenzner A.A. Methodology for studying the adhesive process of microorganisms // Laboratory work. 1986. № 4. P. 210-212. (in Rus).

2. Buzoleva, L.S. Microbiological assessment of the quality of natural waters, summer educational field practice: a tutorial on summer field practice for students // Vladivostok. 2011. 88 p. (in Rus).

3. Voroshilova A.A., Dianova E.V. Oil-oxidizing bacteria – indicators of the intensity of biological oxidation of oil under natural conditions // Microbiology. 1952. V. 21, No. 4. P. 408-415. (in Rus).

4. State Pharmacopoeia of the Russian Federation, XIII edition. OFS.1.7.2.0012.15 «Industrial Probiotic Strains and Strains for Probiotic Control»

[Electronic resource]. – Access mode: https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-13/ (in Rus).

5. Degtyareva I.A., Babynin E.V., Motina T.Yu., Salavatullina A.A. Isolation, identification, and whole-genome analysis of the hydrocarbon-oxidizing strain Staphylococcus warneri // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. 2021. №. 1. P. 5-13. (in Rus).

6. Delegan Y.A., Vetrova A.A., Akimov V.N, Titok M.A., Filonov A.E., Boronin A.M. Thermotolerant oil-degrading bacteria isolated from soil and water of geographically distant regions // Appl Biochem Microbiol. 2016. V. 52. P. 389–396. https://doi.org/10.1134/S0003683816040025

7. Dorozhukova S.L., Yanin E.P. Environmental problems of oil and gas producing territories of Tyumen region. Moscow: IMGRE, 2004. 56 p. (in Rus).

8. Zharikova E.A. Content of oil products in natural and anthropogenic soils of Primorsky Krai // Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2022, №. 1. P. 83–92. (in Rus).

9. Ibatullina I.Z. Biological activity and restoration of saline soils after oil pollution: diss. ... Cand. of Biological Sciences. Moscow, 2012. – 150 p. (in Rus).

10. Ivanova, A.E., Borzenkov, I.A. & Sokolova, D.S. Catabolic Potential and Surfactant Activity of Halotolerant Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria // Microbiology. 2021. V. 90. P. 405–415. https://doi.org/10.1134/S0026261721040056

11. Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Kamenskikh T.N., Krivoruchko A.V., Tyumina E.A., Elkin A.A. Hydrocarbon-oxidizing rhodococci: features of biological organization under the influence of ecopollutants. Atlas-monograph. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021. 140 p. (in Rus).

12. Kim A.V., Bogatyrenko E.A., Dunkai T.I. Evaluation of the efficiency of oil hydrocarbon oxidation by bacterial consortia isolated from the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk // Applied Biochemistry and Microbiology. 2025. V. 61. № 6. P. 600–610. (in Rus).

13. Quantitative chemical analysis of water. Methodology for measuring the mass concentration of petroleum products in natural and waste water samples by column chromatography with gravimetric termination: PND F 14.1:2.116-97. – Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2004. – 16 p. (in Rus).

14. Koporulin, A.A. Basic methods for eliminating oil and oil product spills at oil refineries // Vestn. science. 2024. V. 4, № 11 (80). P. 1300-1304. (in Rus).

15. MUK 4.2.1890-04. Determination of the sensitivity of microorganisms to antibacterial drugs: Methodological guidelines. Moscow: Federal Center for State

Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2004, 91 p. (in Rus).

16. Stepanova N.E. Control and main characteristics of the composition of oil as a pollutant of the geological environment // Advances in Modern Natural Science. 2020. № 7. P. 151-156.

17. Abubakar A., Abioye O.P., Aransiola S.A., Maddela N.R., Prasad R. // Environmental Chemistry and Ecotoxicology. 2024. V. 6. P. 26–32. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001

18. Ali M.H., Khan M.I., Bashir S., Azam M., Naveed M., Qadri R., Bashir S., Mehmood F., Shoukat M.A., Li Y., Alkahtani J., Elshikh M. S., Dwiningsih Y. Biochar and Bacillus sp. MN54 Assisted Phytoremediation of Diesel and Plant Growth Promotion of Maize in Hydrocarbons Contaminated Soil // Agronomy. 2021. V. 11(9), art. 1795. https://doi.org/10.3390/agronomy11091795.

19. Economou V., Gousia P. Agriculture and food animals as a source of antimicrobial-resistant bacteria // Infection and Drug Resistance. 2015. V. 8. P. 49-61. https://doi.org/10.2147/IDR.S55778

20. Wahla A.Q., Anwar S., Mueller J.A., Arslan M., Iqbal S. Immobilization of metribuzin degrading bacterial consortium MB3R on biochar enhances bioremediation of potato vegetated soil and restores bacterial community structure // J Hazard Mater. 2020. V.390. art. 121493. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121493.

21. Zaragoza A., Aranda F.J., Espuny M.J., Teruel J.A. Hemolytic activity of a bacterial trehalose lipid biosurfactant produced by *Rhodococcus* sp.: evidence for a colloid-osmotic mechanism // Langmuir. 2010. V. 26, № 11. P. 8567-8572. https://doi.org/10.1021/la904637k

22. Zhang H., Tang J., Wang L., Liu J., Gurav R.G., Sun K. A novel bioremediation strategy for petroleum hydrocarbon pollutants using salt tolerant *Corynebacterium variabile* HRJ4 and biochar // Journal of Environmental Sciences. 2016. V. 47. P. 7–13. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.023

METABOLIC AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HYDROCARBON-OXIDIZING BACTERIA STRAINS FROM OIL-CONTAMINATED SOILS

Bogatyrenko E.A.[1]*, Kim A.V.[1], Tegai V.V.[1], Dunkai T.I. [1], Perevalova P.O.[1]

[1] Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

bogatyrenko.ea@dvfu.ru, kim_avyache@dvfu.ru, tegai.vv@dvfu.ru, dunkai.ti@dvfu.ru, perevalova.po@dvfu.ru

ORCID: 0000-0002-4250-5715, 0000-0001-8560-5452, 0009-0003-1174-999X, 0000-0002-2306-1311, 0009-0005-4974-1904

Abstract

The growth capacity of three hydrocarbon-oxidizing bacterial strains isolated from oil-contaminated soils in the southern Primorsky Krai was studied at various temperatures (5, 22, and 37˚C) and NaCl concentrations (10, 27.5, 35, and 40 g/L). Rhodococcus sp. 1A remained viable across the entire temperature range at a NaCl concentration of 35 g/L, Rhodococcus sp. 3B at 27.5 g/L, and Pseudomonas sp. 25 at 40 g/L. All bacterial strains demonstrated the ability to oxidize oil at concentrations of 1–5 %. At a concentration of 1 %, the degree of degradation ranged from 55.33–71.23 %, while at the maximum oil concentration (5 %), the oxidizing capacity decreased to 26.11–38.23 %. Biosafety testing revealed that all bacterial strains tested exhibited weak adhesion and lacked plasmacoagulase, fibrinolytic, and lecithinase activity. Hemolytic activity was detected only in Rhodococcus sp. 1A. Rhodococcus sp. 1A was resistant to 7 of 14 antibiotics, while Rhodococcus sp. 3B and Pseudomonas sp. 25 were resistant to 3 antibiotics.

Keywords: oil; bioremediation; temperature; salinity; pathogenicity factors; antibiotic susceptibility

Статья поступила в редакцию 10 июня 2026 г.
Поступила после доработки 24 июня 2026 г.
Принята к печати 28 июня 2026 г.
Received 10, June, 2026
Revised 24, June, 2026
Accepted 28, June, 2026