

УДК 579.68

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОКИСЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ КОНСОРЦИУМАМИ БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ЯПОНСКОГО И ОХОТСКОГО МОРЕЙ

© 2025 г. А. В. Ким¹, Е. А. Богатыренко^{1,*}, Т. И. Дункай¹

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690992 Россия

*e-mail: bogatyrenko.ea@dvfu.ru

Поступила в редакцию 30.07.2025 г.

После доработки 15.09.2025 г.

Принята к публикации 29.09.2025 г.

Созданы микробные консорциумы из аборигенных углеводородокисляющих бактерий, выделенных из Японского и Охотского морей, которые обладают не только углеводородокисляющей активностью, но и ускоряют деструкцию нефти за счет гидрофобности к углеводородам нефти, эмульгирующей и липолитической активности. В состав консорциумов помимо типичных нефтеокислителей были включены бактерии родов *Niallia*, *Rossellomorea* и *Patulibacter*, углеводородокисляющая активность которых изучена впервые. Созданные микробные консорциумы продемонстрировали высокую эффективность окисления нефти в модельных экспериментах при разных уровнях солености (30, 35, 40‰) и температурах (5, 22°C). Степень окисления нефти на 28 сутки эксперимента составила 78–94%.

Ключевые слова: микробные консорциумы, углеводороды нефти, биосурфактанты, эмульгирующая активность, гидрофобность

DOI: 10.7868/S3034574X25060079

По данным Национального исследовательского совета США, количество углеводородов (УВ) антропогенного происхождения, поступающих в воды Мирового океана, составляет от 0.47 до 8.4 млн т в год [1]. Нефтяное загрязнение оказывает значительное влияние на изменение физико-химических параметров среды, климата, содержания кислорода в атмосфере, массовую гибель представителей флоры и фауны, что в совокупности негативно отражается на социально-экономическом развитии регионов [2].

Японское и Охотское моря подвержены нефтяному загрязнению за счет естественного выхода нефти со дна моря, но большая часть попадает в процессе ее транспортировки танкерами, слива за борт промысловых и балластных вод, от стоков промышленных предприятий и хозяйственно-бытовых отходов, а также в аварийных ситуациях [3, 4]. При этом проблема усугубляется действием низких температур и высокой солености в водах данных регионов, что замедляет естественные процессы окисления УВ. Низкие температуры не-

гативно влияют на скорость окисления нефти из-за уменьшения растворимости входящих в ее состав соединений [5], а соленость снижает активность ряда ключевых микробных ферментов, участвующих в разложении УВ [6].

Основными методами очистки и восстановления морских акваторий от нефтяного загрязнения являются: механический (сбор УВ нефти с помощью техники), физико-химический (контролируемое сжигание, применение сорбентов, диспергирование и эмульгирование), биоремедиационный методы (с помощью микроорганизмов). Каждый из данных способов борьбы с загрязнением имеют свои преимущества и недостатки. Биологический метод, с использованием микроорганизмов наиболее привлекателен, поскольку основан на природных процессах в системе морская вода—микроорганизмы—загрязнители, что позволяет не только эффективно очистить водоемы от нефтяных загрязнений, но и стимулировать восстановление естественных процессов самоочищения экосистем. Вследствие этого биоремедиация считается одной

из экологически чистых и экономически эффективных технологий, которая подходит для морской среды [7, 8].

На основе микроорганизмов деструкторов нефти и нефтепродуктов созданы биопрепараты, но в основном для наземных экосистем и есть только единичные сведения о биопрепаратах для применения в морских водах [9–12].

Микроорганизмы способны к многоступенчатому окислению УВ нефти до конечных продуктов – углекислого газа, воды и других экологически нейтральных соединений благодаря своей полифункциональности, разнообразию ферментных систем и высокой скорости размножения. Степень и скорость деструкции УВ зависит от их химической структуры, условий среды обитания и возможностей самих микроорганизмов-деструкторов [13].

Наиболее эффективными биопрепаратами по мнению ученых, являются те, что созданы на основе аборигенных нефтеокисляющих микроорганизмов, приспособленных к определенным абиотическим факторам среды обитания [14].

Несмотря на хроническое загрязнение Японского и Охотского морей нефтью и нефтепродуктами, их углеводородокисляющая микробиота мало изучена. В литературе встречаются единичные работы, посвященные таксономическому разнообразию и метаболическому потенциалу микроорганизмов-деструкторов УВ нефти в данных регионах [15–18]. Кроме того, отсутствует информация о создании биопрепаратов на основе аборигенных штаммов нефтеокисляющих микроорганизмов и их апробации при ликвидации нефтяного загрязнения в дальневосточных морях.

Цель работы – создание микробных консорциумов на основе штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных из Японского и Охотского морей, и оценка их нефтеокисляющей способности при разных температурах и уровнях солености.

МЕТОДИКА

В работе были исследованы 150 штаммов углеводородокисляющих бактерий (УОБ) из коллекции Научно-исследовательской лаборатории морской микробиологии, Института Мирового океана ДВФУ. 80 штаммов были выделены из образцов поверхностных вод и верхнего окисленного слоя донных осадков Японского моря (б. Золотой Рог, зал. Находка, зал. Посыета, б. Рудная, Россия) и 70 штаммов – из Охотского моря (зал. Марии, зал. Камбальный, зал. Шелихова, прибрежные акватории в районе п. Озерновский, Россия).

По результатам предыдущих исследований все эти штаммы продемонстрировали способность к росту на среде с 1% сырой нефти в качестве единственного источника углерода и были иден-

тифицированы на основе анализа фрагмента гена 16S рРНК с использованием пары праймеров 27F (5'-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3') и 1350R (5'-GACGGGCGGTGTGTACAAG-3') [16, 17].

Оценка способности бактерий к росту в присутствии разных концентраций сырой нефти при температурах 5°C и 22°C. Коллекцию бактерий высевали на плотную модифицированную минеральную среду Ворошиловой-Диановой (ВД) (г/л): NaCl – 10; K₂HPO₄ – 1.32; KH₂PO₄ – 1; NH₄NO₃ – 1; MgSO₄ – 0.2; CaCl₂ – 0.02; бактериологический агар – 15; дистиллированная вода – 1000 мл; pH 7.0–7.2, содержащую от 1.5 до 2.5% сырой нефти марки “Vityaz” (Сахалин, Россия) в качестве единственного источника углерода. Инкубацию проводили в течение 10 сут, после чего фиксировали рост бактерий.

Эмульгирующая активность штаммов бактерий. Эмульгирующую активность определяли методом Купера и Голденберга [19, 20]. Бактериальные культуры выращивали в течение 3 сут на качалке в жидкой среде ВД с добавлением 1% сырой нефти при температуре 22°C. Для оценки экзогенной эмульгирующей активности бактериальные клетки отделяли от культуральной среды с помощью центрифугирования (при 8000 g в течение 15 мин) и исследовали супернатант. При измерении эндогенной эмульгирующей активности культуральную среду не отделяли от бактериальных клеток. Далее полученный супернатант и культуральную среду с микробными клетками смешивали с нефтью в отношении 3 : 2, интенсивно перемешивали на лабораторном встряхивателе при 1000 об./мин в течение 20 мин для получения стабильной эмульсии. После этого пробирки оставляли в вертикальном положении при комнатной температуре, а эмульгирующую активность выражали в процентах, считывая ее как отношение объема эмульсии через 24 (E24) и 48 (E48) ч к общему объему жидкости, умноженное на 100% (1).

$$E(\%) = \frac{h_{c.э}}{h_{ж}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где E – индекс эмульгирующей активности, %; h_{с.э} – высота слоя эмульсии, мм; h_ж – общая высота жидкости, мм.

Оценка показателя гидрофобности (ПГ) бактериальных клеток. Для оценки этого показателя использовали метод Серебряковой с соавт. [20]. Штаммы бактерий культивировали в жидкой среде ВД с добавлением 1% сырой нефти, инкубировали 10 сут при температуре 22°C, после чего готовили водные бактериальные суспензии, оптическая плотность которых составляла 0.2 ед. при длине волны λ = 670 нм. Далее в пробирках смешивали бактериальные суспензии и хлороформ в соотношении 4 : 1, содержимое встряхивали в течение 15 мин на вортексе. После этого выдерживали

пробирки в вертикальном положении в течение 60 мин для разделения фаз. Измерив оптическую плотность бактериальной суспензии после встряхивания, рассчитывали ПГ по формуле (2):

$$\text{ПГ}(\%) = 100 - \frac{\text{ОП}_1 \cdot 100}{\text{ОП}_0}, \quad (2)$$

где ПГ – показатель гидрофобности, %; ОП₀ – оптическая плотность суспензии до встряхивания, ед., ОП₁ – оптическая плотность суспензии после встряхивания, ед.

Липолитическая активность штаммов бактерий. Липолитическую активность изучали с помощью модифицированного метода Ота-Ямада титрованием щелочью NaOH с образованием при гидролизе оливкового масла жирных кислот [21].

Липолитическую активность (ЛА) рассчитывали по формуле (3):

$$\text{ЛА (ед. акт.)} = \frac{(A - A_0) \cdot T \cdot 50}{V}, \quad (3)$$

где ЛА – липолитическая активность, ед.; A₀ и A – количество щелочи, необходимое для титрования контрольного и опытного образцов соответственно, мл; T – титр щелочи, мг/мл (2 мг/мл); V – объем супернатанта, мл; 50 – коэффициент пересчета в мкмоль жирных кислот.

Медиану значений липолитической активности и показателя гидрофобности к УВ нефти у микроорганизмов высчитывали в программе Microsoft Excel.

Создание консорциумов на основе УОБ и оценка их эффективности. На основе полученных результатов были созданы два микробных консорциума: один из штаммов УОБ Японского моря и второй – из Охотского моря. В состав консорциумов вошли микроорганизмы, способные к росту на модифицированной плотной среде ВД с 2.5% сырой нефти и продемонстрировавшие высокие показатели в отношении одного или нескольких свойств: эмульгирующая активность, гидрофобность к УВ и липолитическая активность.

Биомассу бактерий для экспериментов наращивали на плотной питательной среде для морских микроорганизмов, следующего состава (г/л): CaCO₃ – 1; MgSO₄ – 1; K₂HPO₄ – 0.2; глюкоза – 0.2; пептон ферментативный, сухой для бактериологических целей – 5; агар бактериологический – 15; дрожжевой экстракт – 5; искусственная морская вода (г/л: NaCl – 27.5; MgCl₂ – 5; MgSO₄·7H₂O – 2; CaCl₂ – 0,5; KCl – 1; FeSO₄ – 0,001) – 500 мл; дистиллированная вода – 500 мл, рН 7.8–8.1 [23].

Для определения способности созданных консорциумов утилизировать УВ нефти в колбы с жидкой средой ВД (50 мл) и сырой нефтью (2.5%)

добавляли разные концентрации NaCl (30, 35, 40‰), затем вносили клетки каждого штамма в концентрации 10⁵ кл./мл. Инкубировали на качалке 28 сут при температурах 5 и 22°C. Остаточное содержание УВ нефти в исследуемых пробах определяли гравиметрическим методом согласно общепринятой методике в динамике на 7, 14 и 28 сут [22]. В качестве контроля использовали стерильную среду ВД с нефтью. Степень утилизации УВ микробными консорциумами выражали в процентах и оценивали по изменению концентрации нефти в процессе инкубации по отношению к контрольным значениям на соответствующие сутки.

Одновременно с этим оценивали численность жизнеспособных микробных клеток. Для этого на 7, 14 и 28 сут культивирования делали серии разведений и высевали на плотную питательную среду для морских микроорганизмов. Инкубацию проводили при температурах 5 и 22°C в течение 3 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка способности бактерий к росту в присутствии разных концентраций сырой нефти. Для оценки углеводородокисляющего потенциала исследуемых штаммов бактерий культуры высевали на минеральную среду ВД с 1.5, 2.0 и 2.5% сырой нефти и инкубировали при температурах 5 и 22°C.

Доля штаммов бактерий, выделенных из Японского и Охотского морей, способных к росту на среде в присутствии 1.5% сырой нефти при температуре культивирования 22°C составила 100%, а при 5°C – 80–84% (рис. 1). С увеличением концентрации УВ нефти до 2.5% доля активных бактериальных штаммов снизилась в 2 раза как при 5°C, так и при 22°C инкубирования.

Микробные культуры лучше росли в присутствии нефтяных УВ при температуре 22°C. По литературным данным известно, что большинство морских микроорганизмов способны к окислению УВ нефти в температурном диапазоне от 15 до 20°C [7]. Низкие положительные температуры влияют на физико-химические характеристики нефтяных УВ (вязкость, плотность, поверхностное натяжение и т.д.), и с понижением температуры процесс окисления УВ микроорганизмами замедляется [5].

Отмечено, что скорость роста на субстрате у всех бактерий была разная. Например, у *Okibacterium* sp. AP_21104-1, *Paenibacillus ehimensis* AP_211823-3, *Rhodococcus erythropolis* 2110.1, *Sphingomonas paucimobilis* 2118, *Pseudomonas oleovorans* VL_2, *Rhodococcus erythropolis* AP_291, *Alcanivorax* sp. AP_54, *Rosellomorea* sp. N21G4_2b, *Paenibacillus lautus* AE_4, *Niallia* sp. N21G3_1d, выделенных из Японского моря и у *Rhodococcus* sp. PU24-V45, *Alcanivorax* sp. PU24-V43, *Paenibacillus* sp. PU24-V65, *Bacillus* sp. PU24-G43, *Achromobacter* sp. PU24-V56, *Pseudochrobactrum* sp. PU24-V50, *Thalassospira* sp. PU24-V71, *Sphingomo-*

nas sp. PU24-G60, *Patulibacter* sp. PU24-V55 и *Pseudomonas* sp. PU24-V66 – из Охотского моря уже на вторые сутки культивирования при температурах 5°C и 22°C фиксировали образование колоний в присутствии 2.5% сырой нефти в среде. Для остальных исследованных штаммов бактерий рост колоний наблюдался только на 6–8 сут инкубирования.

Известно, что способность к деградации УВ у разных бактерий не одинакова и зависит от особенностей строения клеточной стенки, синтеза ферментов, участвующих в деградации УВ и биосурфактантов, способствующих повышению биодоступности гидрофобных субстратов микробным клеткам [24].

Эмульгирующая активность исследуемых штаммов бактерий. Определена способность бактерий к синтезу биосурфактантов экзотипа (внеклеточные) и эндотипа (связанные с клеткой), которые влияют на связывание клеток с водонерастворимыми соединениями, что приводит к эмульгированию УВ [14, 20, 24, 25].

При анализе экзогенной и эндогенной эмульгирующей активности было выявлено, что большинство УОБ характеризовались высокими показателями индекса эмульгирования (E , %)

и были способны формировать стабильные водно-углеводородные эмульсии из смеси УВ после 24 и 48 ч инкубирования (рис. 2).

Согласно литературным данным, штаммы микроорганизмов, обладающие $E \geq 50\%$ считаются перспективными продуцентами биосурфактантов [20, 26].

Доля штаммов бактерий с $E \geq 50\%$, выделенных из Японского и Охотского морей составила 70 и 64% для экзогенной, 74 и 69% для эндогенной эмульгирующей активности соответственно. Штаммы УОБ с максимальными показателями экзогенной и эндогенной эмульгирующей активностью после 48 часов инкубирования представлены в табл. 1.

Эндогенная эмульгирующая активность во многом зависит от строения самой клеточной стенки бактерий и синтеза биоэмульгаторов эндотипа, связанных с клеточной оболочкой микробной клетки [14]. Например, в структуру клеточной стенки нокардиоформных актиномицетов входят различные простые жирные кислоты, глико- и фосфолипиды, нейтральные липиды [27], за счет чего у данных микроорганизмов наблюдается высокое сродство к УВ нефти. Липиды обеспечивают прямой контакт с гидрофобными соединениями,

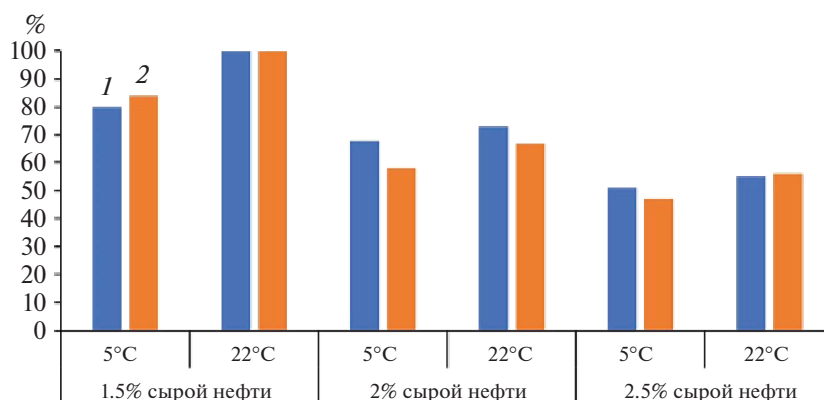


Рис. 1. Доля штаммов бактерий (%), способных к росту в присутствии разных концентраций сырой нефти при температурах 5°C и 22°C УОБ, выделенных из Японского (1) и Охотского (2) морей.

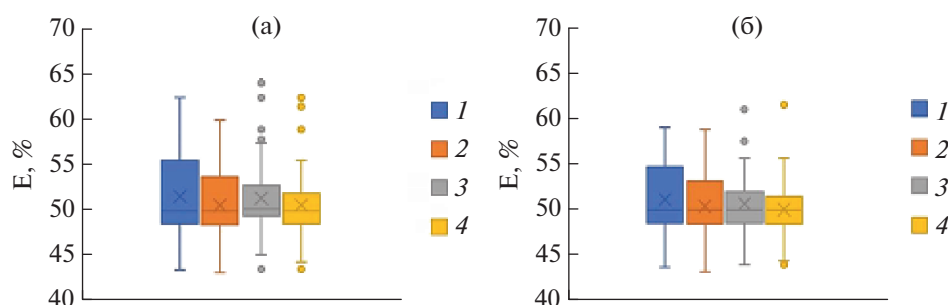


Рис. 2. Индексы экзогенной (1, 2) и эндогенной (3, 4) эмульгирующей активности УОБ, выделенных из Японского (а) и Охотского (б) морей на 24 и 48 ч культивирования.

Таблица 1. Штаммы УОБ с максимальными показателями экзогенной и эндогенной эмульгирующей активностью после 48 ч инкубирования

Место выделения	Штамм	Экзогенная эмульгирующая активность, %	Эндогенная эмульгирующая активность, %
Японское море	<i>Rhodococcus erythropolis</i> 2110.1	60 ± 0.3	58.3 ± 0.1
	<i>Janibacter</i> sp. N21F7_1	58.8 ± 0.2	57.2 ± 0.2
	<i>Paenibacillus lautus</i> AE_4	60.2 ± 0.1	59.8 ± 0.2
	<i>Sphingomonas paucimobilis</i> 2118	62.5 ± 0.3	56.8 ± 0.2
	<i>Rosellomorea</i> sp. N21G4_2b	58.3 ± 0.1	57.2 ± 0.1
Охотское море	<i>Rhodococcus</i> sp. PU24-V45	60 ± 0.3	58.8 ± 0.1
	<i>Patulibacter</i> sp. PU24-V55	57.2 ± 0.2	56.1 ± 0.2
	<i>Thalassospira</i> sp. PU24-V71	55.3 ± 0.2	55.1 ± 0.2
	<i>Paenibacillus</i> sp. PU24-V65	61.5 ± 0.1	57.8 ± 0.2

чем больше их содержится в микробной клетке, тем выше сродство с субстратом [28]. Немаловажную роль на первых этапах окисления УВ нефти играют миколовые кислоты, которые содержатся в клеточной стенке бактерий родов *Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Pseudonocardia* и обеспечивают транспорт молекул УВ внутрь клетки [29].

В то время как экзогенная эмульгирующая активность определяется способностью микроорганизмов к продуцированию биосурфактантов экзо-типа, то есть секретировать во внешнюю среду [14, 20, 30].

Способность к образованию биосурфактантов обнаружена у многих микроорганизмов, например у представителей рода *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Candida*, *Nocardia*, *Bacillus*, *Torulopsis*, *Ochrobactrum*, *Gordonia*, *Burkholderia* и др. [31].

Бактерии рода *Rhodococcus* sp. способны к синтезу как экзо- так и эндотипов биосурфактантов, которые представлены в большинстве случаев анионными и неионогенными липидами трегалозы [30–32].

Также в литературе есть сведения, что продуцируемый штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* биосурфактант An6 обладает ярко выраженным эмульгирующим действием и способствует солюбилизации дизельного топлива [33].

Некоторые виды рода *Pseudomonas* способны синтезировать гликолипидные биоэмульгаторы – рамнолипиды, состоящие из β-гидроксизирных кислот, связанных с остатками рамнозы, а у *Alcanivorax borkumensis* описан новый класс гликолипидов, содержащий анионный липид глюкозы с тетрамерной оксиацильной боковой цепью, которые повышают биодоступность к гидрофобным соединениям [34].

Гидрофобность микроорганизмов по отношению к углеводородам нефти. Поскольку окисление УВ нефти во многом зависит от прямого контакта микробных клеток с УВ, важной особенностью является определение гидрофобности микроорганизмов к субстрату.

По результатам наших исследований доля штаммов бактерий со значением ПГ ≥ 36.2% (значение медианы) составила 67%, выделенных из Японского моря и 52% – из Охотского моря. Максимальными показателями гидрофобности обладали штаммы *Rhodococcus erythropolis* 2122 – 83.3 ± 0.2%, *Rhodococcus erythropolis* 2110.1 – 82.3 ± 0.2%, *Sphingomonas paucimobilis* 2118 – 81.6 ± 0.2%, *Paenibacillus lautus* AE_4 – 77.2 ± 0.2%, выделенные из Японского моря, *Sphingomonas* sp. PU24-G60 – 80.5 ± 0.2%, *Rhodococcus* sp. PU24-V45 – 67.8 ± 0.2%, *Rhodococcus* sp. PU24-G48 – 60.2 ± 0.3%, изолированные из Охотского моря. Минимальными значениями ПГ обладали представители рода *Pseudomonas*.

Полученные результаты могут быть объяснены тем, что гидрофобность во многом зависит от механизма поступления УВ в микробную клетку и, как правило, те микроорганизмы, которые способны поглощать УВ путем прямого контакта, демонстрируют высокую гидрофобность клеточной поверхности. У некоторых микроорганизмов в присутствии УВ нефти в среде изменяется состав и содержание липидных комплексов в клеточной стенке, за счет чего происходит увеличение гидрофобности и сродства к субстрату [35].

У бактерий рода *Rhodococcus* клеточная стенка характеризуется липофильностью и высокой аффинностью к УВ нефти за счет содержания большого количества липидов и миколовых кислот [34]. Помимо этого, родококки способны синтезировать биосурфактанты – трегалолипиды, которые

увеличивают сродство к гидрофобному субстрату и ускоряют процесс его окисления [19].

У бактерий рода *Pseudomonas* клеточная стенка гидрофильна и содержит малое количество липидов, что препятствует свободному связыванию гидрофобного субстрата с клеткой и поглощению УВ [36]. Для них характерно поступление УВ в клетки не за счет прямого контакта с гидрофобным субстратом, а за счет псевдосолюбилизации УВ с помощью внеклеточных биосурфактантов рамнолипидной природы. При таком механизме микробные клетки контактируют непосредственно с мицеллами биосурфактанта, внутри которого содержатся УВ, тем самым происходит окисление субстрата [37]. Рамнолипиды, выделенные из *Pseudomonas* spp. могут способствовать увеличению доступности гидрофобных УВ и ускорению процесса биodeградации фенантрена [38], гексадекана, бензола, толуола, крезола, нафталина, алифатических и ароматических углеводородов [39]. Таким образом, бактерии рода *Pseudomonas* продуцируют в основном биосурфактанты экзотипа, т.е. внеклеточные [40].

Активность ферментов липаз исследуемых штаммов бактерий. Микроорганизмы окисляют разнообразные по химической структуре УВ нефти за счет синтеза различных ферментов, среди которых выделяются липазы с их широкой субстратной специфичностью. Липазы – гидролитические ферменты, расщепляющие жиросодержащие соединения, в частности, промежуточные продукты разложения УВ нефти (сложные эфиры жирных кислот, сложные эфиры спиртов и т.д.).

В некоторых исследованиях [41] было показано, что микроорганизмы при увеличении содержания УВ в среде способны активнее синтезировать ферменты липазы, т.е. существует прямая корреляция между этими показателями. В связи с этим в данной работе у штаммов УОБ была изучена также и активность липаз.

При количественной оценке липолитической активности было выявлено, что доля штаммов бактерий с активностью липаз выше значения медианы (546 ед.), выделенных из Японского моря, составила 55.5%, а из Охотского моря – 50.9%.

Максимальные значения липазной активности были отмечены у бактерий *Rhodococcus erythropolis* 2110.1 – 680 ± 2 ед., *Paenibacillus lautus* AE_4 – 668 ± 1 ед., *Rosellomorea* sp. N21G4_2b – 646 ± 1 ед., *Pseudomonas oleovorans* VL_2 – 654 ± 2 ед., *Niallia* sp. N21G3_1d – 646 ± 1 ед., выделенных из Японского моря и *Paenibacillus* sp. PU24-V65 – 650 ± 2 ед., *Pseudomonas* sp. PU24-V66 – 650 ± 3 ед., *Thalassospira* sp. PU24-V71 – 642 ± 2 ед., *Rhodococcus* sp. PU24-V45 – 642 ± 3 ед., изолированных из Охотского моря.

К синтезу липаз способны разнообразные микроорганизмы, в том числе и представители родов

Pseudomonas, *Bacillus* [42], *Halomonas*, *Citricoccus*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus* [43], *Geobacillus*, *Parageobacillus*, *Anoxybacillus* [44].

В работах некоторых ученых продемонстрировано увеличение степени деградации сырой нефти в среде при добавлении липолитических ферментов, выделенных из *P. aeruginosa* и *B. subtilis* [42].

В исследованиях других авторов отмечена корреляция между содержанием УВ нефти в среде с активностью микробных гидролитических ферментов. По мере увеличения содержания УВ возрастает активность микробных липаз [41, 45].

Кадри Т. с соавторами [46] предложили использовать детекцию липаз и эстераз в качестве одного из параметров при мониторинге нефтяного загрязнения биотопов, поскольку разложение УВ нефти является непрерывным процессом и промежуточные продукты превращения углеводородов, по сути, являются субстратами для данных ферментов.

Создание микробных консорциумов из штаммов УОБ, выделенных их Японского и Охотского морей. На сегодняшний день не существует стандартизированного подхода к составлению микробных консорциумов в качестве основы для изготовления биопрепаратов. При этом известно, что лимитирующими факторами для применения микробных консорциумов в полевых условиях являются температура, соленость, рН среды и др. факторы, вследствие чего для их эффективной работы необходимо использование аборигенных штаммов бактерий, которые уже приспособлены к определенным условиям окружающей среды, не являются чужеродными агентами и не нарушают микробный баланс [40, 47].

Основные параметры, учитываемые при создании консорциумов это наличие у микроорганизмов разных ферментных систем, которые будут направлены на конверсию различных по структуре УВ нефти, таким образом, снижается конкуренция за субстрат. В связи с чем эффективнее использовать углеводородоокисляющие микроорганизмы (УОМ), относящиеся к разным таксономическим группам с определенными метаболическими путями деградации УВ. Например, *Rhodococcus* spp. чаще всего окисляют алифатические соединения [48], в то время как *Sphingomonas* spp., в основном, деградируют различные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [49], при этом очень редко используют в качестве субстрата *n*-алканы [50]. Важно, чтобы в составе ассоциаций присутствовали микроорганизмы, способные синтезировать биосурфактанты, повышающие доступность микробных клеток к гидрофобному субстрату для ускорения процессов биodeградации УВ. В консорциум могут быть включены микроорганизмы, которые обладают низкой углеводородоокисляющей активностью, но способные ассимилировать промежуточные продукты окисления УВ, такие как

спирты, альдегиды, кетоны, жирные и карбоновые кислоты и т.д. [51].

Преимущества использования микробных консорциумов для ликвидации нефтяного загрязнения были показаны в ряде современных научных исследований. Так, в одной из работ продемонстрировано, что консорциум из пяти штаммов УОБ, выделенных из загрязненной почвы, деградировал сырую нефть до 78%, что на 12–19% превышало показатели наиболее активных монокультур. Аналогичные результаты получены в другом исследовании, где консорциум из четырех штаммов УОБ, изолированных из нефтяных шламов, показал эффективность окисления нефтяных УВ до 78%, превосходя показатели отдельных культур. Также в литературе встречается информация о преимуществе использования микробного консорциума для деградации ПАУ, включая нафталин, флуорен, фенантрен и бензо(б)флуорантен в составе сырой нефти [52, 53].

В работе китайских авторов экспериментально установлено, что консорциум, включающий представителей родов *Pseudoxanthomonas*, *Bacillus*, *Dietzia* и *Acinetobacter*, обладает способностью к окислению широкого спектра УВ (*n*-алканы, циклоалканы, разветвленные алканы и ароматические УВ). Степень деградации указанных соединений достигала 98% от общего содержания УВ в среде, что существенно превышает эффективность индивидуальных бактериальных культур [19].

На основании полученных в работе результатов было смоделировано 2 микробных консорциума. В консорциум на основе бактерий, выделенных из Японского моря, входили следующие штаммы: *Paenibacillus lautus* AE_4, *Pseudomonas oleovorans* VL_2, *Sphingomonas paucimobilis* 2118, *Rhodococcus erythropolis* 2110.1, *Niallia* sp. N21G3_1d и *Rossellomorea* sp. N21G4_2b. В консорциум на основе бактерий, выделенных из Охотского моря, входили: *Rhodococcus* sp. PU24-V45, *Paenibacillus* sp. PU24-V65, *Thalassospira* sp. PU24-V71, *Sphingomonas* sp. PU24-G60, *Patulibacter* sp. PU24-V55 и *Pseudomonas* sp. PU24-V66.

Все штаммы, входящие в состав созданных консорциумов, были способны к росту на минеральной среде, содержащей 2.5% сырой нефти при температурах 5°C и 22°C, обладали высокими значениями эмульгирующей и липолитической активности, а также гидрофобности к УВ.

Представители родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Sphingomonas* были включены в оба консорциума и в литературе чаще всего описываются в качестве типичных представителей нефтеокисляющей микробиоты [3, 16, 17, 48]. Согласно литературным данным, бактерии рода *Sphingomonas* участвуют в окислении ПАУ, в частности, нафталина, фенантрена, антрацена, флуорена, пирена, бенз(а)-пирена и др. [49]. *Rhodococcus* spp. способны

разрушать алифатические УВ за счет продукции различных алкангидроксилаз. Помимо этого родококки могут трансформировать и деградировать широкий спектр УВ, включая ароматические, нитроароматические, поли- и гетероциклические УВ, полихлорированные бифенилы, фенолы и т.д. [48]. *Pseudomonas* spp. окисляют разнообразные по химической структуре УВ, в частности, у них найдены нафталин диоксигеназы, катализирующие конверсию более 50 ароматических УВ [37, 42, 49].

Среди типичных УОМ также присутствовали представители рода *Paenibacillus*, которые способны окислять широкий спектр УВ (нафталин, фенантрен, антрацен, декан, гексадекан и т.д.) [43].

Ранее в работе [3] уже были описаны бактерии рода *Thalassospira*, выделенные из Охотского моря в качестве окислителей ПАУ и алифатических УВ [3].

В состав консорциумов были также включены представители родов *Niallia*, *Rossellomorea*, *Patulibacter*, для которых способность к окислению УВ нефти впервые описана в настоящей работе. По литературным данным, *Niallia* spp. чаще выделяют из средних и нижних отделов пищеварительного тракта животных, а также из почв. Существуют работы, свидетельствующие об их способности к деструкции поллютантов, таких, как фенол и красящие химические вещества [54]. *Rossellomorea* spp. чаще всего описываются как ассоцианты растений [55]. Однако в некоторых работах упоминалась их способность к нейтрализации токсичного действия тяжелых металлов [56]. Представители рода *Patulibacter* чаще всего встречаются в почвах и ризосфере некоторых растений, также были найдены в почвах Антарктиды [16].

Оценка эффективности утилизации нефтяных углеводородов микробными консорциумами. Поскольку основными лимитирующими факторами, влияющими на способность микроорганизмов к утилизации УВ в морской среде, являются температура и соленость, был проведен эксперимент по определению эффективности работы созданных микробных консорциумов при разных температурах (22°C и 5°C) и уровнях солености (30, 35 и 40‰) (табл. 2).

По результатам работы установлено, что эффективность деградации УВ нефти обоими консорциумами была одинаково высока при проверенных значениях солености и температуры.

Было показано, что на 7 сут эксперимента оба консорциума продемонстрировали способность утилизировать 40–49% нефтяных УВ при 22°C и 30–40% – при 5°C, а на 14 сут эффективность деградации возросла в 1.5 раза.

На 28 сут эксперимента микробный консорциум на основе УОБ из Японского моря был способен к окислению УВ нефти до 90% при 22°C и до 83%

Таблица 2. Степень утилизации нефтяных углеводородов микробными консорциумами, %

Инкубация	Микробные консорциумы	Температура культивирования					
		22°C			5°C		
		содержание NaCl			содержание NaCl		
		30‰	35‰	40 ‰	30‰	35‰	40 ‰
7 сут	№1 (Японское море)	46 ± 1.8	48 ± 2.1	40 ± 2.8	31 ± 1.9	35 ± 2.9	33 ± 1.8
	№2 (Охотское море)	49 ± 4.3	49 ± 2.4	45 ± 2.6	40 ± 3.2	36 ± 3.1	30 ± 1.1
14 сут	№1 (Японское море)	77 ± 3.1	79 ± 2.2	70 ± 1.6	61 ± 2.7	68 ± 1.1	53 ± 1.2
	№2 (Охотское море)	72 ± 3.0	77 ± 2.1	70 ± 1.5	68 ± 2.9	70 ± 2.4	65 ± 2.2
28 сут	№1 (Японское море)	85 ± 1.4	90 ± 1.5	84 ± 1.6	83 ± 1.7	80 ± 1.1	80 ± 1.8
	№2 (Охотское море)	83 ± 1.6	94 ± 1.9	79 ± 2.3	81 ± 4.1	84 ± 1.7	78 ± 4.1

при 5°C. Динамика численности бактериальных клеток уже на 7 сут при 22°C показала рост с 10^5 до 10^6 КОЕ/мл, тогда как при 5°C их количество оставалось 10^5 КОЕ/мл, что указывает на более длительную адаптацию микроорганизмов к низким температурам. Однако к концу опыта при обеих температурах и всех концентрациях солености численность бактерий увеличивалась до 10^7 КОЕ/мл (рис. 3).

Микробный консорциум на основе УОБ, выделенных из Охотского моря к финальной стадии эксперимента, показал эффективность утилизации УВ нефти до 94% при 22°C и до 84% при 5°C. Если в первые 14 сут инкубирования динамика численности бактериальных клеток была схожа с первым консорциумом, то на 28 сут эксперимента их количество резко возросло до 10^8 КОЕ/мл во всех вариантах культивирования (рис. 3).

Чаще всего в литературе встречаются работы, связанные с созданием микробных консорциумов для ликвидации нефтяного загрязнения морской среды при температуре выше 15°C. Например, консорциум из штаммов бактерий, выделенных из донных отложений гидротермальных источников Северо-Атлантического хребта, демонстрировал способность деградировать до 50% нефтяных УВ при 25°C [11]. Другой консорциум из штаммов бактерий, изолированных из вод Малаккского пролива, при культивировании в минеральной среде с сырой нефтью в качестве единственного углеродного источника показал эффективность окисления УВ до 70% при 30°C [12].

Есть единичные работы, посвященные изучению способности микробных консорциумов к окислению нефти в условиях низких температур и высокой солености. Так, например, было разра-

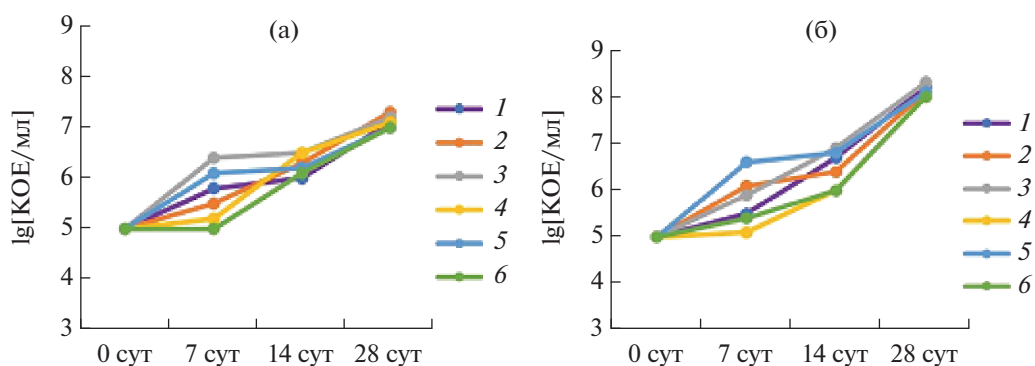


Рис. 3. Общая численность жизнеспособных клеток (КОЕ/мл): а – Микробный консорциум из УОБ Японского моря; б – Микробный консорциум из УОБ Охотского моря. Температура и уровень солености при культивировании УОБ: 1 – 22°C и 30‰; 2 – 5°C и 30‰; 3 – 22°C и 35‰; 4 – 5°C и 35‰; 5 – 22°C и 40‰; 6 – 5°C и 40‰.

ботано несколько отечественных биопрепаратов: “МикроБак” в состав которого входят представители родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, “ВиО” — *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter* и “Биоойл” — *Bacillus*, *Saccharomyces*, *Acinetobacter*, *Enterobacter*, способные в лабораторных условиях к деградации УВ нефти при температуре 4°C и солености 30‰ от 18 до 33% от исходного содержания сырой нефти в пробе [57, 58].

Учитывая, что информации о биоремедиационном потенциале микроорганизмов из дальневосточных морей в литературе практически отсутствует, созданные микробные консорциумы, состоящие из УОБ Японского и Охотского морей, способные к деградации УВ нефти при температурах 5 и 22°C и уровнях солености от 30 до 40‰, могут представлять определенную практическую значимость для данного региона.

Полученные микробные консорциумы способны в лабораторных условиях при температуре 5°C и разных концентрациях солености за 28 дней утилизировать от 78 до 84% УВ нефти, а при 22°C — от 79 до 94%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2024-0037 “Комплексный экологический мониторинг прибрежных морских и наземных экосистем Камчатки”.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- National Research Council (US) Committee on Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. Washington (DC): National Academies Press (US), 2003. <https://doi.org/10.17226/10388>
- Samsuria N.N.C., Ismail W.Z.W., Nazli M.N.W.M., Aziz N.A.A., Ghazali A.K. // *Water*. 2025. V. 17. № 9. P. 1252. <https://doi.org/10.3390/w17091252>
- Buzoleva L.S., Bogatyrenko E.A., Repina M.A., Belkova N.L. // *Microbiology*. 2017. V. 86. № 3. P. 338–345. <https://doi.org/10.1134/S0026261717030043>
- Марченко М.О., Бессонов Р.С., Дубина В.А., Круглик И.А. // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 65. № 3. С. 82–90.
- Somu P., Narayanasamy S., Gomez L.A., Rajendran S., Lee Y.R., Balakrishnan D. // *Environ. Res.* 2022. P. 113411. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113411>
- Ebadi A., Khoshkholgh Sima N.A., Olamaee M., Hashemi M., Ghorbani N.R. // *J. Adv. Res.* 2017. V. 8. № 6. P. 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.06.008>
- Das N., Chandran P. // *Biotechnol. Res. Int.* 2011. P. e941810. <https://doi.org/10.4061/2011/941810>
- Xue J., Yu Y., Bai Y., Wang L., Wu Y. // *Curr. Microbiol.* 2015. V. 71. № 2. P. 220–228. <https://doi.org/10.1007/s00284-015-0825-7>
- Патент РФ. 2017. № 2634397
- Korshunova T.Y., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2019. V. 55. № 4. P. 344–354. <https://doi.org/10.1134/S0003683819040094>
- Ma M., Zheng L., Yin X., Gao W., Han B., Li Q. et al. // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 1456. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-80991-5>
- Chuah L.F., Chew K.W., Bokhari A., Mubashir M., Show P.L. // *Environ. Res.* 2022. V. 213. P. 113721. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113721>
- Ivanova A.E., Sokolova D.S., Kanat'eva A.Y. // *Microbiology*. 2016. V. 85. № 3. P. 317–324. <https://doi.org/10.1134/S002626171603005X>
- Ivanova A.E., Borzenkov I.A., Sokolova D.S. // *Microbiology*. 2021. V. 90. № 4. P. 405–415. <https://doi.org/10.1134/S0026261721040056>
- Tanaka D., Tanaka S., Yamashiro Y., Nakamura S. // *Environ. Toxicol.* 2008. V. 23. P. 563–569. <https://doi.org/10.1002/tox.20409>
- Bogatyrenko E.A., Kim A.V., Dunkai T.I., Es'kova A.I., Sidorenko M.L., Ponomareva A.L., Okulov A.K. // *Russ. J. Mar. Biol.* 2021. V. 47. № 3. P. 232–239. <https://doi.org/10.1134/S1063074021030032>
- Bogatyrenko E.A., Kim A.V., Polonik N.S., Dunkai T.I., Ponomareva A.L., Dashkov D.V. // *Oceanology*. 2022. V. 62. № 3. P. 379–389. <https://doi.org/10.1134/S000143702203002X>
- Abe M., Sakai M., Kanaly R.A., Mori J.F. // *Microbiol. Spectr.* 2025. V. 13. № 1. P. e0107424. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01074-24>
- Chen W., Sun J., Ji R., Min J., Wang L., Zhang J. et al. // *J. Mar. Sci. Eng.* 2024. V. 12. № 11. P. 2033. <https://doi.org/10.3390/jmse12112033>
- Беляков А.Ю., Плешакова Е.В., Амангалиева В.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1. С. 294–298.
- Dueramae S., Bovornreungroj P., Enomoto T., Kantachote D. // *Chem. Pap.* 2017. V. 71. P. 1975–1984. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0191-y>
- РД РФ. 2003. № 52.18.647–2003.
- Бузолева Л.С. Микробиологическая оценка прибрежных вод. Учебно-полевая практика: учебное пособие. Владивосток: изд. Тинро-центр, 2012. 72 с.

24. Souza E.C., Vessoni-Penna T.C., de Souza Oliveira R.P. // *Int. Biodet. Biodeg.* 2014. V. 89. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.007>
25. Бектурова А.Ж., Масалимов Ж.К., Мархаметова Ж.Ж., Еркасов Р.Ш., Оразбаева Р.С., Дарубай А.О. // *Вестник КазНУ. Серия биологическая.* 2013. №3/1 (59). С.56–58.
26. Janek T., Gudiña E.J., Połomska X., Biniarz P., Jama D., Rodrigues L.R. et al. // *Molecules.* 2021. V. 26. № 12. P. 3488. <https://doi.org/10.3390/molecules26123488>
27. Воробьев А.В., Быков А.С., Паков Е.П., Несвижский Ю.В., Бойченко М.Н., Зверев В.В. и др. *Основы микробиологии и вирусологии.* М.: Изд. Центр “Академия”, 2013. 288 с.
28. Сопрунова О.Б., Ключанова М.А. // *Вестник АГТУ.* 2007. № 1. С. 180–183.
29. Коронелли Т.В., Калужная Т.В. // *Микробиология.* 1983. № 2. С. 205–210
30. Ristau E., Wagner F. // *Biotechnol. Lett.* 1983. V. 5. P. 95–100. <https://doi.org/10.1007/BF00132166>
31. Беловежец Л.А., Третьякова М.С., Маркова Ю.А., Ознобихина Л.П. // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2021. №1. С. 21–26.
32. Лыонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., Пунтус И.Ф., Пономарева О.Н. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2016. № 1 (16), 2016. С. 50–60.
33. Ayed H.B., Jemil N., Maalej H., Bayoudh A., Hmidet N., Nasri M. // *Int. Biodet. Biodeg.* 2015. V. 99. P. 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.12.009>
34. Эсоно Онгене Ф.Х., Чекушина Т.В. // *Теория и практика современной науки.* 2022. № 4 (82). P. 171–176.
35. Karaseva E.V., Volchenko N.N., Khudokormov A.A., Samkov A.A., Karasev S.G., Batina E.V. et al. // *KubNAU research journal.* 2012. V. 83. № 9. P. 464–477.
36. Гоголева О.А., Немцева Н.В. // *БОНЦ УрО РАН.* 2012. № 2. 6 с.
37. Bouchez-Naitali M., Vandecasteele J.P. // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2008. V. 24. № 9. P. 1901–1907. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9691-9>
38. Zhang Y., Maier W.J., Miller R.M. // *Environ. Sci. Technol.* 1997. № 31. P. 2211–2217. <https://doi.org/10.1021/es960687g>
39. Churchill P.F., Dudley R.J., Churchill S.A. // *Waste Manage.* 1995. № 15. P. 371–377. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0956-053X(95)00038-2)
40. Abdel-Mawgoud A.M., Lépine F., Déziel E. // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010. V. 86. № 5. P. 1323–1336. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2498-2>
41. Margesin R., Hämmerle M., Tschierko D. // *Microb. Ecol.* 2007. № 53. P. 259–269. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9136-7>
42. Abubakar A., Abioye O.P., Aransiola S.A., Maddela N.R., Prasad R. // *J. Environ. Chem. Ecotoxicol.* 2024. V. 6. P. 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001>
43. Daane L.L., Harjono I., Barns S.M., Launen L.A., Paleroni N.J., Haggblom M.M. // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2002. V. 52. P. 131–139. <https://doi.org/10.1099/00207713-52-1-131>
44. Adlan N.A., Sabri S., Masomian M., Ali M.S.M., Rahman R.N.Z.R.A. // *Front. Microbiol.* 2020. № 11. P. e565608. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.565608>
45. Ogbolosingha A.J., Essien E.B., Ohiri R.C. // *J. Environ. Earth Sci.* 2015. №5. P. 128–141.
46. Kadri T., Rouissi T., Magdouli S., Brar S.K., Hegde K., Khiari Z. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2018. № 112. P. 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2018.01.177>
47. Boto M.L., Magalhaes C., Perdigao R., Alexandrino D.A.M., Fernandes J.P., Bernabeu A.M. et al. // *Front. Microbiol.* 2021. V. 12. P. 633659. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633659>
48. Ившина И.Б., Кююкина М.С., Каменских Т.Н., Криворучко А.В., Тюмина Е.А., Елькин А.А. *Углеводородоокисляющие родококки: особенности биологической организации под воздействием экополлютантов.* Атлас-монография. УрО РАН, 2021. 140 с.
49. Pinyakong O., Habe H., Kouzuma A., Nojiri H., Yamane H., Omori T. // *FEMS Microbiol. Lett.* 2004. V. 238. P. 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2004.07.048>
50. Semenova E.M., Tourova T.P., Babich T.L., Logvinova E.Y., Sokolova D.S., Loiko N.G. et al. // *Microorganisms.* 2023. V. 12. № 1. P. 79. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12010079>
51. Шаниро Т.Н., Дольникова Г.А., Немцева Н.В., Санджиева Д.А., Лобакова Е.С. // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.* 2018. №4. С. 107–113.
52. Xia M., Fu D., Chakraborty R., Singh R.P., Terry N. // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 282. P. 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>
53. Kumari S., Regar R.K., Manickam N. // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 254. P. 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.075>
54. Patel D., Patil K.S., Madamwar D., Desai C. // *J. Water Process Eng.* 2022. V. 47. P. e102690. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102690>
55. Yousef N.M.H., Amal W.D., Mawad A.M.M. // *Waste and Biomass Valorization.* 2024. V. 15. № 6. P. 3256–3268. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02373-4>
56. Lee W.S., Aziz H.A., Tajarudin H.A. // *Water Environ. Res.* 2023. V. 95. № 8. P. e10913. <https://doi.org/10.1002/wer.10913>
57. Sozina I.D., Danilov A.S. // *Journal of Mining Institute.* 2023. V. 260. P. 297–312. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8>
58. Ветрова А.А., Иванова А.А., Филонов А.Е., Забели В.А., Нечаева И.А., Ле Т.Б.Н., Боронин А.М. // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки.* 2013. № 2–1. С. 258–272.

Estimation the Oxidation Efficiency of Petroleum Hydrocarbons by Bacterial Consortia Isolated from the Seas of Japan and Okhotsk

A. V. Kim^a, E. A. Bogatyrenko^{a,*}, T. I. Dunkai^a

^aFar Eastern Federal University, Vladivostok, 690992 Russia

*e-mail: bogatyrenko.ea@dvfu.ru

We have created microbial consortia from native hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from the Seas of Japan and Okhotsk, which not only have hydrocarbon-oxidizing activity, but also accelerate oil degradation due to additional properties (hydrophobicity to petroleum hydrocarbons, emulsifying and lipolytic activity). In addition to typical oil oxidizers, the consortia included bacteria of the genera *Niallia*, *Rosellomorea* and *Patulibacter*, whose hydrocarbon-oxidizing activity was studied for the first time. The established microbial consortia demonstrated high efficiency of oil oxidation in model experiments at salinity 30–40‰ and temperatures of 5 and 22°C. The degree of oxidation of oil on the 28th day of the experiment was 78–94%.

Keywords: Microbial consortia, petroleum hydrocarbons, biosurfactants, emulsifying activity, hydrophobicity