Недропользование. 2025. Т. 25, № 4. С.403-409. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.16

ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №4 2025
Домашняя страница журнала: https://ered.pstu.ru/index.php/geo

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Поиск биологических поверхностно-активных продуцирующих микроорганизмов в нефтезагрязненных грунтах с целью применения в технологии повышения нефтеотдачи пласта

А.Х. Сафаров, Г.Г. Курбанова, А.А. Гарипова, Д.А. Курбанова

Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186а)

Search for Biosurfactant-Producing Microorganisms in Oil-Contaminated Soils for Use in Enhanced Oil Recovery Technology

Albert Kh. Safarov, Gulnara G. Kurbanova, Aigul A. Garipova, Daniya A. Kurbanova

TatNIPIneft R&D Institute of the PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (186a Sovetskaya st., Almetyevsk, 423462, Russian Federation)

Получена / Received: 02.06.2025. Принята / Accepted: 31.10.2025. Опубликована / Published: 21.11.2025

Ключевые слова:
повышение нефтеотдачи пластов (ПНП), биологические поверхностно-активные вещества (биоПАВ, биосурфактанты), микробиологические методы увеличения нефтеотдачи, межфазное натяжение (МФН), нефтезагрязненные грунты, биоремедиация, углеводородокисляющие микроорганизмы, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*.

Настоящее исследование посвящено поиску и выделению микроорганизмов-продуцентов биологических поверхностно-активных веществ (биоПАВ) из нефтезагрязненных грунтов для последующего применения в экологически безопасных технологиях повышения нефтеотдачи пластов (ПНП). Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки эффективных и экологичных методов извлечения трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), минимизирующих риски для окружающей среды в сравнении с традиционными физико-химическими методами ПНП.

Из нефтезагрязненных почвенных проб, в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017, было выделено и идентифицировано 20 штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов. Микробиологический анализ (МУК 4.2.3695-21) подтвердил отсутствие патогенной микрофлоры. Шесть выделенных штаммов (*Bacillus* spp. 10RE, *Citrobacter* spp. 14RE, *Bacillus* spp. 17RE, *Pseudomonas* spp. 18RE, *Bacillus* spp. 21RE, *Rhodococcus* spp. 24RE) показали выраженную способность к биосинтезу ПАВ. Ключевым доказательством послужило значительное снижение межфазного натяжения (МФН) культуральной жидкости при ее развитии на нефти, использующейся в качестве единственного источника углерода. Значения МФН на среде с нефтью варьировались от 2,5 до 4,5 мН/м, что существенно ниже показателей на среде с сахарозой 3,5–13,5 мН/м, и свидетельствует о высокой эффективности продуцируемых биоПАВ.

Важным для применения в реальных нефтяных пластах является адаптивность микроорганизмов к пластовым условиям. Исследование физиологических характеристик показало, что отобранные штаммы обладают широкими диапазонами толерантности: к температуре (от 5°С до ≥ 50 °С) и солености (от 0 до 80–240 г NaCl/л). Например, *Bacillus* spp. 21RE рос при солености до 240 г/л, а *Pseudomonas* spp. 18RE и *Citrobacter* spp.14RE проявляли термотолерантность.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал выделенных штаммов для разработки инновационных биотехнологий. Их способность эффективно продуцировать биоПАВ непосредственно на нефтяном субстрате и выживать в экстремальных условиях пласта (высокая минерализация, широкий температурный диапазон) делает их перспективными агентами для микробиологических методов увеличения нефтеотдачи (ММУН). Применение таких микроорганизмов и их метаболитов позволит снизить МФН на границе «нефть – вода», мобилизовать капиллярно-удержанную нефть и повысить коэффициент извлечения нефти (КИН), одновременно способствуя биоремедиации загрязненных объектов.

Keywords:
enhanced oil recovery, biological surfactants, microbiological methods of enhanced oil recovery, interfacial tension, oil-contaminated soils, bioremediation, hydrocarbon-oxidizing microorganisms, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*.

This study focuses on the identification and isolation of microorganisms producing biological surfactants (biosurfactants) from oil-contaminated soils for subsequent use in environmentally friendly enhanced oil recovery (EOR) technologies. The relevance of this work stems from the need to develop effective and environmentally friendly methods for extracting hard-to-recover reserves (HRR) that minimize environmental risks compared to traditional physical and chemical EOR methods.

Twenty strains of hydrocarbon-oxidizing microorganisms were isolated and identified from oil-contaminated soil samples in accordance with GOST 17.4.4.02-2017. Microbiological analysis (MUK 4.2.3695-21) confirmed the absence of pathogenic microflora. Six isolated strains (*Bacillus* spp. 10RE, *Citrobacter* spp. 14RE, *Bacillus* spp. 17RE, *Pseudomonas* spp. 18RE, *Bacillus* spp. 21RE, *Rhodococcus* spp. 24RE) demonstrated a pronounced capacity for surfactant biosynthesis. Key evidence was a significant decrease in the interfacial tension (IFT) of the culture fluid during its development on oil used as the sole carbon source. The values of the IFT in the medium with oil varied from 2.5 to 4.5 mN/m, which is significantly lower than the values in the medium with sucrose 3.5–13.5 mN/m, and indicates the high efficiency of the produced biosurfactants.

The adaptability of microorganisms to reservoir conditions is important for application in real oil reservoirs. A study of their physiological characteristics revealed that the selected strains showed wide tolerance ranges: temperature (from 5°C to ≥ 50°C) and salinity (from 0 to 80–240 g NaCl/L). For example, *Bacillus* spp. 21RE grew at salinities up to 240 g/L, while *Pseudomonas* spp. 18RE and *Citrobacter* spp. 14RE exhibited thermotolerance.

The obtained results demonstrate the high potential of the isolated strains for the development of innovative biotechnologies. Their ability to efficiently produce biosurfactants directly on the oil substrate and survive in extreme reservoir conditions (high salinity, wide temperature range) makes them promising agents for microbiologically enhanced oil recovery (MEOR). The use of these microorganisms and their metabolites will reduce the IFT at the oil-water interface, mobilize capillary-trapped oil, and increase the oil recovery factor, while simultaneously facilitating the bioremediation of contaminated sites.

Сафаров Альберт Хамитович – доктор технических наук, доцент, лаборатория разработки биотехнологий, ведущий научный сотрудник (e-mail: SafarovAH@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00 (доб. 53406).
Курбанова Гульнара Гайнельхаковна – заведующий лабораторией, лаборатория разработки биотехнологий (e-mail: Kurbanova-GG@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53056).
Гарипова Айгуль Айратовна – научный сотрудник, лаборатория разработки биотехнологий (e-mail: GaripovaAygulA@tatnipi.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00, доб. 53091).
Курбанова Дания Ахмадалиевна – техник (e-mail: kurbanovadania09@gmail.com, тел.: +007 (987) 212 94 45).

Albert Kh. Safarov (Author ID in Scopus: 7004636709, ORCID: 0000-0002-6275-3046, Doctor in Engineering, Associate Professor, Leading Researcher at the Biotechnology Development Laboratory of the Inflow Stimulation Department (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: SafarovAH@tatnipi.ru). The contact person for correspondence.
Gulnara G. Kurbanova (ORCID: 0009-0002-9568-0557) – Head of the Biotechnology Development Laboratory (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: Kurbanova-GG@tatnipi.ru).
Aigul A. Garipova (ORCID: 0009-0007-1830-7915) – Researcher at the Biotechnology Development Laboratory (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: GaripovaAygulA@tatnipi.ru).
Daniya A. Kurbanova – Technician (tel.: +7 (987) 212 94 45, e-mail: kurbanovadania09@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Поиск биологических поверхностно-активных продуцирующих микроорганизмов в нефтезагрязненных грунтах с целью применения в технологии повышения нефтеотдачи пласта / А.Х. Сафаров, Г.Г. Курбанова, А.А. Гарипова, Д.А. Курбанова // Недропользование. – 2025. – Т.25, №4. – С. 403–409. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.16

Please cite this article in English as:
Safarov A.Kh., Kurbanova G.G., Garipova A.A., Kurbanova Da.A. Search for Biosurfactant-Producing Microorganisms in Oil-Contaminated Soils for Use in Enhanced Oil Recovery Technology. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.4, pp. 403-409. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.16

Введение

Нефть продолжает оставаться ключевым ресурсом в структуре современной мировой энергетики. Однако процесс ее добычи характеризуется увеличением технологических и экологических вызовов.

По мере истощения запасов нефти, которую возможно извлечь благодаря небольшим затратам с помощью существующих технологий, возрастает значимость разработки трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) и применения методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП) на зрелых месторождениях.

Традиционные методы добычи позволяют извлечь лишь 30–50 % геологических запасов нефти, а это значит, что значительные объемы углеводородов остаются в недрах [1].

Актуальность проблемы вовлечения трудноизвлекаемых запасов в разработку определяется следующими факторами.

1. Экономическая необходимость: огромные объемы остаточной нефти в пластах представляют собой значительный нереализованный экономический потенциал. Разработка эффективных методов ПНП позволяет продлить основной период разработки месторождений, увеличить добычу и обеспечить энергетическую безопасность.

2. Ограниченность и недостатки традиционных методов ПНП: часто существующие методы повышения нефтеотдачи (термические, газовые, химические – полимерное и щелочное заводнение, синтетические ПАВ) характеризуются технологическими сложностями, обладают высокой стоимостью, ограниченной применимостью к конкретным геолого-физическим условиям и, что особенно важно, могут сами по себе нести экологические риски из-за токсичности используемых реагентов.

С учетом приведенных факторов разработка новых, эффективных и экологически безопасных технологий для повышения нефтеотдачи становится важной задачей. Особый интерес представляют методы, основанные на использовании биотехнологий, в частности, применение биологических поверхностно-активных веществ (биоПАВ) [2].

Биологические поверхностно-активные вещества (биоПАВ) представляют собой природные или синтезируемые микроорганизмами амфифильные соединения. Как и их синтетические аналоги, они способны адсорбироваться на границах раздела фаз (например, «нефть – вода», «нефть – порода»), значительно снижая поверхностное (межфазное) натяжение. Их основная роль в технологиях повышения нефтеотдачи заключается в следующем [3]:

1. Снижение межфазного натяжения (МФН): биоПАВ уменьшают силу сцепления между нефтью и пластовой водой. Это ослабляет капиллярные силы, удерживающие нефть в мелких порах породы, и позволяет вытеснить ее водой или другим вытесняющим агентом.

2. Эмульгирование нефти: биоПАВ способствуют образованию устойчивых эмульсий типа «нефть в воде», что облегчает транспортировку капель нефти через поры коллектора и их вынос потоком жидкости.

3. Изменение смачиваемости породы: некоторые биоПАВ могут адсорбироваться на поверхности породы, изменяя ее смачиваемость с гидрофобной на гидрофильную. Это также способствует отрыву нефтяной пленки от породы и ее вытеснению.

4. Экологическая безопасность: ключевое преимущество биоПАВ – их высокая биодеградируемость и низкая токсичность по сравнению со многими синтетическими ПАВ. Это минимизирует риски дополнительного загрязнения пласта и окружающей среды при их применении, а также упрощает утилизацию попутных вод.

Применение биоПАВ представляет собой перспективное направление для разработки инновационных, высокоэффективных и экологически устойчивых технологий повышения нефтеотдачи пластов. Такое решение не только способствует увеличению объемов добываемой нефти, но и снижает риски загрязнения грунтов и водных ресурсов на объектах нефтедобычи, что является критически важным для обеспечения экологической безопасности и рационального использования природных ресурсов.

Методы увеличения нефтеотдачи пласта: анализ и перспективы

Извлечение нефти – сложный процесс, который проходит в несколько этапов по мере истощения пластового давления и изменения свойств флюидов. Методы классифицируются на три основные группы (стадии), которые применяются последовательно:

I группа. Первичные методы – добыча производится за счет естественной энергии пласта. Используется природная энергия резервуара (давление, растворенный газ, напор краевых вод, гравитация). Коэффициент извлечения нефти (КИН) обычно составляет 5–15 %, редко до 20–30 % от первоначальных запасов нефти.

II группа. Вторичные методы – поддержание пластового давления (ППД). Проводится искусственное восполнение истощающейся природной энергии пласта путем закачки рабочего агента. Основная цель метода – вытеснение нефти к добывающим скважинам и поддержание давления. КИН составляет дополнительно 10–25 % от первоначальных запасов нефти.

III группа. Третичные методы или методы увеличения нефтеотдачи. Применяются после первичной и вторичной добычи для извлечения нефти, оставшейся в недрах (часто высоковязкой, капиллярно удержанной). Методы физически или химически изменяют свойства нефти, вытесняющего агента или пласта для повышения охвата и эффективности вытеснения. МУН делятся на следующие методы: термические, газовые, химические и микробиологические. КИН составляет дополнительно 5–20 % от первоначальных запасов нефти.

Применение микробиологических методов имеет следующе обоснование: согласно литературным источникам, отмечено большое разнообразие микроорганизмов в нефтяных пластах. Информация о видовом составе получена с использованием культуральных, радиоизотопных и метагеномных методов [4–8]. Микроорганизмы нефтяного пласта обладают большим биотехнологическим потенциалом. Помимо газов они образуют ряд других нефтевытесняющих метаболитов – поверхностно активные вещества (ПАВ), экзополисахариды, растворители, кислоты – появление которых в пластовой системе, связано с аэробно-анаэробной деградацией нефти [9, 10]. Микробные процессы биодеградации нефти протекают в пластах с температурой не выше 80 °С [11].

Все микробиологические методы воздействия на нефтяные пласты можно разделить на две основные группы. К первой относят технологии, в которых используются продукты жизнедеятельности микроорганизмов – метаболиты, полученные на поверхности земли в промышленных установках-ферментерах. Эти методы близки к химическим.

Таблица 1

Содержание нефтепродуктов в отобранных образцах

Образец	Глубина отбора, м	Содержание нефтепродуктов		Погрешность, мг/кг
		мг/кг	% масс	
Почвенная проба № 1	0-0,1	8500,0	0,85	2125,0
Почвенная проба № 2	0,5	154000,0	15,4	38500,0

Улучшение нефтевытесняющих свойств закачиваемой воды происходит в данном случае за счет таких соединений как биоПАВ (биосурфактанты, биоэмульгаторы), биополимеров. Биогенные поверхностно-активные вещества или биосурфактанты синтезируются бактериями, археями, дрожжами, микроводорослями и некоторыми мицелиальными грибами. Следует отметить, что для биологического повышения нефтеотдачи не подходят дрожжи, водоросли и простейшие из-за размеров и физиологических особенностей роста [12], следовательно, самым эффективным является применение бактерий.

Вторая группа предусматривает развитие микробиологических процессов с целью получения метаболитов непосредственно в пласте. В этом случае образование нефтевытесняющих агентов в результате микробиологической деятельности происходит непосредственно в пласте за счет дополнительного внесения в пласт микроорганизмов и/или питательных веществ.

Согласно литературным данным, углеводородокисляющие микроорганизмы способны активно размножать не только в нефтяных пластах, но и в экосистемах с поверхностным загрязнением нефтью [13–19]. На основе использования данных микроорганизмов эффективно внедряются биотехнологические методы рекультивации нефтезагрязненных грунтов [20, 21]. Микробиологическая ремедиация – метод, основанный на способности микроорганизмов к деградации органических загрязнителей посредством включения таких веществ в свой метаболический цикл – один из наиболее эффективных методов ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на этапе доочистки загрязненных участков [22, 23]. К достоинствам метода также можно отнести относительную экономичность, простоту применения, доступность материалов и экологичность [24].

Существуют два основных метода биоремедиации: *in situ* и *ex situ*. Биоремедиация *in situ* и основные методы, относящиеся к этой группе, являются наиболее оптимальным, поскольку восстановление происходит без изъятия и транспортировки загрязняющих веществ. Однако восстановление *in situ* больше подходит для ликвидации поверхностных загрязнений и не всегда эффективно при проникновении загрязнителя в глубокие слои почвы [25, 26]. Метод биоремедиации *ex situ* заключается в удалении или извлечении и восстановлении загрязненной почвы [27].

Микроорганизмы, участвующие в биоразложении нефти в почве, в основном принадлежат к родам *Pseudomonas, Flavobacterium, Acinetobacter, Aeromonas, Arthrobacter* и *Rhodococcus* [28, 29]. Способностью разлагать углеводороды нефти также обладают грибы родов *Alternaria, Aspergillus, Candida, Cephalosporium, Cladosporium, Fusarium, Geotrichum, Gliocladium, Mucor, Paecilomyces, Penicillium, Rhizopus, Rhodotolura, Saccharomyces, Talaromyces, Torulopsis* и другие [30, 31], а также водоросли *Chlorella vulgaris* [32, 33]. Бактерии признаются самыми эффективными микроорганизмами для биоремедиации благодаря их способности разлагать практически все углеводороды, включая самые тяжелые парафины (асфальтовые остатки) [34]. Более 70 видов бактерий описаны в патентах как способные метаболизировать разнообразные загрязнения. Особенно распространены и универсальны *Pseudomonas* spp., *Rhodococcus* spp. и *Acinetobacter* spp. [35].

Целью данного исследования являлся поиск, выделение углеводородокисляющих микроорганизмов – продуцентов биоПАВ из нефтезагрязненных грунтов и изучения возможности их использования в качестве нефтевытесняющих агентов для увеличения нефтеотдачи пласта.

Экспериментальная часть

На первом этапе исследования было отобрано 10 проб почвы с участка загрязненной нефтью и нефтепродуктами. Отбор проб осуществлялся согласно общим требованиям к отбору проб почвы ГОСТ 17.4.4.02-2017 [36]. Состав микрофлоры почвы меняется в зависимости от ее глубины, с учетом этого пробы отбирались с разных точек методом «конверта» на глубинах 0,1 и 0,5 м от поверхности.

Содержание нефтепродуктов в отобранных образцах определяли по ПНД Ф 16.1:2.21-98. Измерение проводили на анализаторе жидкости «Флюорат-02-5М». Результаты измерения массовой концентрации нефтепродуктов представлены в табл. 1.

Микробиологические исследования почвы проводились в соответствии с МУК 4.2.3695-21 [37]. Согласно правилам асептики, отобранные пробы почвы с одного участка предварительно очищались и перемешивались в стерильной ступке. Для проведения микробиологических исследований отбирались навески образцов массой 1,0 г.

Микробиологический анализ почвы проводили по следующим показателям: определение общих (обобщенных) колиформных бактерий (ОКБ), в том числе, бактерий группы кишечных палочек (БГКП); определение энтерококков; исключение патогенных микроорганизмов; показатели биологической активности почвы; определение сульфитредуцирующих клостридий; определение количества актиномицетов и грибов. Результаты микробиологического анализа почвы приведены в табл. 2.

По результатам микробиологического анализа почва соответствует показателю допустимой степени микробиологического загрязнения, патогенные микроорганизмы не обнаружены [38].

При идентификации микроорганизмов учитывались следующие свойства бактерий:

– морфологические (особенности и индивидуальные свойства строения клеток);

– культуральные (питание, дыхание, условия роста бактериальной культуры);

– ферментативные (биохимические свойства, связанные со способностью бактериальной культуры расщеплять сахара, белки и т.д.).

Морфология и физиология клеток бактерий была изучена с использованием микроскопа Levenhuk MED D10T LCD. Культуральные свойства выделенных чистых культур исследовались с помощью различных плотных питательных сред, ферментативные свойства – с применением тест-систем ДС-ДИФ; дифференциация

Таблица 2

Результаты микробиологического анализа почвы

№ п/п	Определяемые показатели	Единица измерения	Результаты исследования
	Почвенная проба № 1, глубина 0,1 м		
1	Общее микробное число	КОЕ/г	$1{,}7{\cdot}10^5$
2	Обобщенные колиформные бактерии	КОЕ/г	Не обнаружено
3	Сульфитредуцирующие клостридии	КОЕ/г	Не обнаружено
4	Энтерококки	КОЕ/г	Не обнаружено
5	Патогенные микроорганизмы	КОЕ/г	Не обнаружено
6	Актиномицеты и грибы	КОЕ/г	Не обнаружено
	Почвенная проба № 2, глубина 0,5 м		
1	Общее микробное число	КОЕ/г	$7{\cdot}10^3$
2	Обобщенные колиформные бактерии	КОЕ/г	Не обнаружено
3	Сульфитредуцирующие клостридии	КОЕ/г	Не обнаружено
4	Энтерококки	КОЕ/г	Не обнаружено
5	Патогенные микроорганизмы	КОЕ/г	Не обнаружено
6	Актиномицеты и грибы	КОЕ/г	$1{,}7{\cdot}10^2$

Таблица 3

Штаммы микроорганизмов, выделенные из нефтезагрязненной почвы

Количество штаммов в пробе	Штамм	Вид микроорганизма
	Почвенная проба № 1, глубина 0,1 м	
1	9RE	*Aeromonas* spp.
2	6RE	*Bacillus* spp.
3	7RE	*Serratia* spp.
4	14RE	*Citrobacter* spp.
5	35RE	*Enterobacter* spp.
6	5RE	*Bacillus* spp.
7	10RE	*Bacillus* spp.
8	11RE	*Bacillus* spp.
9	13RE	*Bacillus* spp.
	Почвенная проба № 2, глубина 0,5 м	
1	18RE	*Pseudomonas* spp.
2	17RE	*Bacillus* spp.
3	15RE	*Serratia* spp.
4	20RE	*Serratia* spp.
5	24RE	*Rhodococcus* spp.
6	34RE	*Burkholderia* spp.
7	21RE	*Bacillus* spp.
8	22RE	*Bacillus* spp.
9	16RE	*Pseudomonas* spp.
10	19RE	*Burkholderia* spp.

групп оксидазоположительных и оксидазоотрицательных бактерий проводилась с помощью тест системы «ДС-ОКСИДАЗА»; для определения бактериальной каталазной активности «Микро-КАТАЛАЗА-НИЦФ»; 16API® и API®ZYM тест-наборов «Биомерье» (bioMérieux SA, Marcy l'Étoile, Франция).

На основе полученных данных о метаболизме микроорганизмов определялась видовая принадлежность в специализированной программе APIWEB™. Идентификации подвергались аэробные и факультативно анаэробные микроорганизмы, представляющие интерес в данном направлении.

Результаты идентификации микроорганизмов, в зависимости от глубины извлечения представлены в табл. 3.

Бактерии родов *Pseudomonas, Rhodococcus* и *Citrobacter* часто встречаются в нефтезагрязненных почвах, также как и в нефтяных пластах [39, 40, 41]. Бактерии этих родов известны способностью образовывать биосурфактанты и деградировать нефть и нефтепродукты.

Для оценки образования поверхностно-активных веществ микроорганизмами часто используется прямое определение поверхностного и межфазного натяжения культуральной среды с бактериями или без микробной биомассы и показатель эмульгирующей активности, который основывается на свойстве ПАВ образовывать эмульсию при встряхивании культуральной среды или клеток микроорганизмов с углеводородами или нефтью.

Способность бактерий продуцировать ПАВ из органических веществ разных классов представляется значимой в условиях нефтяного пласта, где источником углерода служит нефть, являющаяся многокомпонентным веществом. Микроорганизмы, снижающие поверхностное натяжение культуральных сред более чем на 10 мН/м, считаются перспективными в качестве продуцентов ПАВ [42]. По другим оценкам, перспективными с точки зрения образования биоПАВ считаются бактерии, снижающие поверхностное натяжение культуральной среды до 45 мН/м [43].

Согласно литературным данным, из 20 выделенных штаммов 6 (10RE 14RE, 17RE 18RE, 21RE 24RE) относятся к продуцентам биоПАВ. По отобранным штаммам были определены реологические характеристики культуральной среды с бактериями – межфазное натяжение методом вращающейся капли с помощью тензиометра вращающейся капли SVT-25 (DataPhysics, Германия). Показатель преломления определялся на автоматическом цифровом рефрактометре Abbemat 550 (Anton Paar, Германия) Результаты приведены в табл. 4 [44].

Как видно из результатов, практически все штаммы показали меньшее значение межфазного натяжения культуральной жидкости на среде с нефтью, по сравнению с межфазным натяжением среды с сахарозой.

Учитывая сложные физико-химические условия в нефтяном пласте, проведены исследования для определения интервалов и оптимумов температуры и солености среды для роста отобранных штаммов [45]. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 4

Реологические характеристики культуральных сред выделенных бактерий, выросших в средах с нефтью и сахарозой

№ п/п	Штамм	Вид	Сахароза		Нефть	
			плотность, кг/м^3	МН, мН/м	плотность, кг/м^3	МН, мН/м
1	10RE	*Bacillus* spp.	1025	4,4	1016	4,5
2	14RE	*Citrobacter* spp.	1031	12,6	1013	2,9
3	17RE	*Bacillus* spp.	1050	13,5	1041	3,87
4	18RE	*Pseudomonas* spp.	1013	13,4	1010	3,0
5	21RE	*Bacillus* spp.	1050	13,1	1039	3,6
6	24RE	*Rhodococcus* spp.	1049	3,5	1028	2,5

Таблица 5

Физиологические характеристики аэробных органотрофных бактерий, выделенных из нефтезагрязненной почвы

№ п/п	Штамм	Вид	Температурный интервал роста (оптимум), ˚С	Интервал солености (оптимум), г /л NaCl
1	10RE	*Bacillus* spp.	15–≥42 (25)	0–160 (0)
2	14RE	*Citrobacter* spp.	10–48 (20)	0–100 (10)
3	17RE	*Bacillus* spp.	10–48 (≤15)	0–100 (10)
4	18RE	*Pseudomonas* spp.	10–37 (15)	0–200 (80)
5	21RE	*Bacillus* spp.	5–37 (15)	0–240 (30)
6	24RE	*Rhodococcus* spp.	≤5–37 (15)	0–80 (0)

Представленные результаты свидетельствуют о психрофильных свойствах некоторых штаммов, например, *Bacillus* spp. и *Rhodococcus* spp. Данные штаммы продемонстрировали рост при температуре 5–10 ˚С и температурный оптимум при 15 ˚С. Два штамма, *Citrobacter* spp. и *Bacillus* spp., были термотолерантными и росли при температуре около 50˚С. Отобранные бактерии проявили устойчивость к солености среды и развивались в присутствии 200–240 г /л NaCl, например, *Pseudomonas* spp. *и Bacillus* spp.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокий потенциал использования углеводородокисляющих микроорганизмов-продуцентов биоПАВ для разработки экологически безопасных технологий повышения нефтеотдачи пластов.

Из нефтезагрязненных почв с глубины 0,1 м (концентрация нефтепродуктов 8500 мг/кг) и 0,5 м (154 000 мг/кг) выделено 20 штаммов микроорганизмов. Шесть из них продемонстрировали высокую способность к синтезу биоПАВ: *Bacillus* spp. 10RE, *Citrobacter* spp. 14RE, *Bacillus* spp.17RE, *Pseudomonas* spp. 18RE, *Bacillus* spp. 21RE и *Rhodococcus* spp. 24RE. При культивировании на нефтяном субстрате, данные штаммы снижают межфазное натяжение культуральной жидкости до 2,5–4,5 мН/м, что значительно ниже значений, наблюдаемых на средах с сахарозой (3,5–13,5 мН/м), и проявляют толерантность к широкому диапазону температур (5–50 ˚С) и солености (0–240 г/л NaCl). Полученные результаты подтверждают способность выделенных штаммов продуцировать биоПАВ, что обусловливает их потенциал для извлечения остаточной нефти в пластовых условиях.

Использование биоПАВ на основе выделенных штаммов минимизирует риски загрязнения пласта и окружающей среды благодаря их высокой биодеградируемости и низкой токсичности по сравнению с синтетическими ПАВ.

Для подтверждения эффективности выделенных штаммов необходимо проведение опытно-промышленных испытаний штаммов на зрелых месторождениях с оценкой влияния на коэффициент извлечения нефти, изучении синергии между штаммами для усиления нефтевытесняющих свойств и разработка регламентов масштабирования синтеза биоПАВ в промышленных условиях.

Библиографический список

1. Banat, I.M. Biosurfactant production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: a review / I.M. Banat // Bioresource Technol. – 1995. – Vol. 51. – P. 1–12.
2. Биометоды увеличения нефтеотдачи / Н.А. Еремин, Р.Р. Ибатулин, Т.Н. Назина, А.А. Ситников // РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2003. – 125 с.
3. Филогенетическое разнообразие аэробных сапротрофных бактерий из нефтяного месторождения Дацин / Т.Н. Назина, А.А. Григорьян, Сюэ Ян-Фен, Д.Ш. Соколова, Е.В. Новикова, Т.П. Турова, А.Б. Полтараус, С.С. Беляев, М.В. Иванов // Микробиология. – 2002. – Т. 71, № 1. – С. 103–110.
4. Magot, M. Indigenous microbial communities in oil fields / M. Magot // Petroleum Microbiology. American Society of Microbiology. – Washington, DC, USA. – 2005. – P. 21–33.
5. Roles of thermophilic thiosulfate-reducing bacteria and methanogenic archaea in the biocorrosion of oil pipelines / R. Liang, R.S. Grizzle, K.E. Duncan, M.J. Mcinerney, J.M. Suflita // Front. Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – № 89. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00089
6. Radiotracer assay of microbial processes in petroleum reservoirs / T.N. Nazina, N.M. Shestakova, V.S. Ivoilov, N.K. Kostrukova, S.S. Belyaev, M.V. Ivanov // Adv. Biotech. & Micro. – 2017. – Vol. 2, no. 4. – Article. 555591. DOI: 10.19080/AIBM.2017.02.555591.
7. Genome-resolved metaanalysis of the microbiome in oil reservoirs worldwide / K.J. Hidalgo, I.N. Sierra-Garcia, G. Zafra, V.M. de Oliveira // Microorganisms. – 2021. – Vol. 9. – Article 1812. DOI: 10.3390/microorganisms9091812
8. Metagenomic investigation of a low diversity, high salinity offshore oil reservoir / G. Scheffer, C.R.J. Hubert, D.R. Enning, S. Lahme, J. Mand, J.R. de Rezende // Microorganisms. – 2021. – Vol. 9. – Article 2266. DOI: 10.3390/microorganisms9112266
9. Gieg, L.M. Biological souring and mitigation in oil reservoirs / L.M. Gieg, T.R. Jack, J.M. Foght // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2011. – Vol. 92. – P. 263–282. DOI: 10.1007/s00253-011-3542-6
10. Head, I.M. Life in the slow lane: biogeochemistry of biodegraded petroleum containing reservoirs and implications for energy recovery and carbon management / I.M. Head, N.D. Gray, S.R. Larter // Front. Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – Article 566. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00566
11. Biodegradation of oil in uplifted basins prevented by deep-burial sterilization / A. Wilhelms, S.R. Larter, I. Head, P. Farrlmond, R. di-Primio, C. Zwach // Letter to Nature. – 2001. – Vol. 411. – P. 1034–1036. DOI: 10.1038/35082535
12. Vasilyeva, G. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil / G. Vasilyeva, V. Kondrashina, J.-J. Ortega-Calvo // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 706, № 135739.
13. Булатов, В.И. Отходы нефтегазового комплекса как технологический индикатор геоэкологического состояния регионов России / В.И. Булатов, Н.О. Игенбаева, О.А. Нанишвили // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7, № 8. – С. 46–55.
14. Классификация методов локализации и ликвидации загрязнений почвы нефтью и нефтепродуктами / Р.Ф. Сагитов, С.В. Шабанова, С.П. Василевская [и др.] // Наука и современность. – 2016. – № 1. – С. 202–207.
15. Шамак, Д.Н. Методы ликвидации нефтяных загрязнений / Д.Н. Шамак // Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Экология и защита окружающей среды», 16–17 мая 2018. – Минск: Белорусский государственный университет. – 2018. – С. 226–228.

16. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals / N. Gaur, G. Flora, M. Yadav, A. Tiwari // Environmental Science: Processes & Impacts. – 2014. – Vol. 16, iss. 2. – P. 180–193.
17. Петрова, Т.А. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности / Т.А. Петрова, Э. Рудзиш // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 100–112.
18. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge / T.A. Petrova, E. Rudzisha, A.V. Alekseenko [et al.] // Minerals. – 2022. – Vol. 12, iss. 3. – № 376.
19. Коган, В.Е. Стеклообразные пеноматериалы неорганической и органической природы и перспективы очистки окружающей среды от загрязнений нефтью и нефтепродуктами / В.Е. Коган // Записки Горного института. – 2016. – Т. 218. – С. 331–338.
20. Farag, S. Statistical optimization of crude oil biodegradation by a local marine bacterium isolate Pseudomonas sp. sp48 / S. Farag, N.A. Soliman, Y.R. Abdel-Fattah // Journal of Genetic Engineering and Biotechnology. – 2018. – Vol. 16, iss. 2. – P. 409–420.
21. Мязин, В.А. Влияние гранулированного активированного угля на скорость биоремедиации почв Мурманской области, исторически загрязненных нефтепродуктами / В.А. Мязин, Е.А. Исакова, Г.К. Васильева // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 2. – С. 20–26.
22. Finley, S.D. In silico feasibility of novel biodegradation pathways for 1, 2, 4-trichlorobenzene / S.D. Finley, L.J. Broadbelt, V. Hatzimanikatis // BMC Systems Biology. – 2010. – Vol. 4, № 7.
23. Kumar, R. Oil spill removal by mycoremediation / R. Kumar, A. Kaur // Microbial Action on Hydrocarbons. – 2018. – P. 505–526.
24. Optimization of operating parameters to remove and recover crude oil from contaminated soil using subcritical water extraction process / Taki G., Islam M.N., Park Seong-Jae, Park Jeong-Hun // Environmental Engineering Research. – 2018. – Vol. 23, iss. 2. – P. 175–180.
25. Dhiraj Kumar Chaudhary. New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments / Dhiraj Kumar Chaudhary, Jaisoo Kim // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2019. – Vol. 142. – P. 58–72.
26. Ajona, M. Bioremediation of petroleum contaminated soils – A review / M. Ajona, P. Vasanthi // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45, part 7. – P. 7117–7122.
27. Isolation of hydrocarbonoclastic bacteria from bilge oil contaminated water / C. Sivaraman, A. Ganguly, M. Nikolausz, S. Mutnuri // International Journal of Environmental Science & Technology. – 2011. – Vol. 8. – P. 461–470.
28. Kuyukina, M.S. Bioremediation of contaminated environments using Rhodococcus / M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina // Biology of Rhodococcus. – Cham: Springer, 2019. – P. 231-270.
29. Al-Nasrawi, H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico / H. Al-Nasrawi // Journal of Bioremediation and Biodegradation. – 2012. – Vol. 3, iss. 4. – № 1000147.
30. Исакова, Е.А. Деструкционная активность углеводородокисляющих микромицетов, выделенных из субстратов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей / Е.А. Исакова, М.В. Корнейкова // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 178–189.
31. Пат. № 2764305 РФ. Способ очистки почв от нефтяных загрязнений методом гидропосева биосмеси с применением микроводорослей Chlorella vulgaris globosa IPPAS C-2024 / Корчагина Ю.С., Щемелинина Т.Н. Опубл.17.01.2022. Бюл. № 2.
32. Пат. № 2703500 РФ. Нефтеокисляющий биопрепарат, биосорбент на его основе и способ его приготовления / Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М. Опубл.17.10.2019. Бюл. № 29.
33. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote- contaminated soil by Peniophora incarnata KUC8836 / Hwanhwi Lee, Seo Yeong Yun, Seokyoon Jang [et al.] // Bioremediation Journal. – 2015. – Vol. 19. 41, iss. 1. – P. 1–8.
34. Hesnawi, R.M. Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil / R.M. Hesnawi, M.M. Adbeib // APCBEE Procedia. – 2013. – Vol. 5. – P. 557–561.
35. Bioremediation of mangroves impacted by petroleum / Santos H.F., Carmo F.L., Paes J.E.S. [et al.] // Water Air Soil Pollut. – 2011. – Vol. 216. – P. 329–350.
36. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М., 2017.
37. МУК 4.2.3695-21. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. Методические указания. – М., 2021.
38. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М., 2021.
39. Czinkóczky, R. Techno-economic assessment of Bacillus fermentation to produce surfactin and lichenysin / R. Czinkóczky, A. Németh // Biochem. Eng. J. – 2020. – Vol. 163. – Article 107719. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107719
40. Microbial biosurfactants: a broad analysis of properties, applications, biosynthesis and technoeconomical assessment of rhamnolipid production / L.F. Moutinho, F.R. Moura, R.C. Silvestre, A.S. Romão-Dumaresq // Biotechnol. Prog. – 2021. – Vol. 37. – № 2. – Article e3093. DOI: 10.1002/btpr.3093
41. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes / J. Chun, A. Oren, A. Ventosa, H. Christensen, D.R. Arahal, M.S. da Costa, A.P. Rooney, H. Yi, X.W. Xu, S. De Meyer, M.E. Trujillo // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. – 2018. – Vol. 68. – P. 461–466. DOI: 10.1099/ijsem.0.002516
42. Mnif, S. Isolation and characterization of Halomonas sp. strain C2SS100, a hydrocarbon-degrading bacterium under hypersaline conditions / S. Mnif, M. Chamkha, S. Sayadi // J. Appl. Microbiol. – 2009. – Vol. 107. – P. 785–794. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04251
43. Fathepure, B.Z. Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments / B.Z. Fathepure // Front. Microbiol. – 2014. – Vol. 5. – Article 173. – P. 1–16. DOI: 10.3389/fmicb.2014.0017
44. Youssef, N. Microbiol processes in oil fields: culprits, problems and opportunities / N. Youssef, M.S. Elshahed, M.J. McInerney // Adv. Appl. Microbiol. – 2009. – Vol. 66. – P. 141–252. DOI: 10.1016/S0065-2164(08)00806-X
45. Functional and phylogenetic microbial diversity in formation waters of a low-temperature carbonate petroleum reservoir / T.N. Nazina, N.M. Shestakova, N.K. Pavlova, Y.V. Tatarkin, V.S. Ivoilov, M.R. Khisametdinov, D.Sh. Sokolova, T.L. Babich, T.P. Tourova, A.B. Poltaraus, S.S. Belyaev, M.V. Ivanov // Int. Biodeterior. Biodegradation. – 2013. – Vol. 81. – P. 71–81. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.07.008

References

1. Banat I.M. Biosurfactant production and possible uses in microbial enhanced oil recovery and oil pollution remediation: a review. *Bioresource Technol.*, 1995, vol. 51, pp. 1-12. DOI: 10.1016/0960-8524(94)00101-6
2. Eremin N.A., Ibatulin R.R., Nazina T.N., Sitnikov A.A. Biometody uvelicheniia nefteotdachi [Biomethods for enhanced oil recovery]. Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefti i gaza. Moscow, 2003, 125 p.
3. Nazina T.N., Grigor'ian A.A., Ian-Fen Siue, Sokolova D.Sh., Novikova E.V., Turova T.P., Poltaraus A.B., Beliaev S.S., Ivanov M.V. Filogeneticheskoe raznoobrazie aerobnykh saprotrofnykh bakterii iz neftianogo mestorozhdeniia Datsin [Phylogenetic diversity of aerobic saprotrophic bacteria from the Daqing Oilfield]. *Mikrobiologiia*, 2002, vol. 71, no. 1, pp. 103-110.
4. Magot M. Indigenous microbial communities in oil fields. *Petroleum Microbiology. American Society of Microbiology*. Washington, DC, USA, 2005, pp. 21-33. DOI: 10.1128/9781555817589.ch2
5. Liang R., Grizzle R.S., Duncan K.E., Mcinerney M.J., Suflita J.M. Roles of thermophilic thiosulfate-reducing bacteria and methanogenic archaea in the biocorrosion of oil pipelines. *Front. Microbiol.*, 2014, vol. 5, no. 89. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00089
6. Nazina T.N., Shestakova N.M., Ivoilov V.S., Kostrukova N.K., Belyaev S.S., Ivanov M.V. Radiotracer assay of microbial processes in petroleum reservoirs. *Adv. Biotech. & Micro*, 2017, vol. 2, no. 4, Article. 555591. DOI: 10.19080/AIBM.2017.02.555591
7. Hidalgo K.J., Sierra-Garcia I.N., Zafra G., de Oliveira V.M. Genome-resolved metaanalysis of the microbiome in oil reservoirs worldwide. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, Article 1812. DOI: 10.3390/microorganisms9091812
8. Scheffer G., Hubert C.R.J., Enning D.R., Lahme S., Mand J., de Rezende J.R. Metagenomic investigation of a low diversity, high salinity offshore oil reservoir. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, Article 2266. DOI: 10.3390/microorganisms9112266
9. Gieg L.M., Jack T.R., Foght J.M. Biological souring and mitigation in oil reservoirs. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2011, vol. 92, pp. 263-282. DOI: 10.1007/s00253-011-3542-6
10. Head I.M., Gray N.D., Larter S.R. Life in the slow lane: biogeochemistry of biodegraded petroleum containing reservoirs and implications for energy recovery and carbon management. *Front. Microbiol.*, 2014, vol. 5, Article 566. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00566
11. Wilhelms A., Larter S.R., Head I., Farrlmond P., di-Primio R., Zwach C. Biodegradation of oil in uplifted basins prevented by deep-burial sterilization. *Letter to Nature*, 2001, vol. 411, pp. 1034-1036. DOI: 10.1038/35082535
12. Vasilyeva G., Kondrashina V., Ortega-Calvo J.-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 706, no. 135739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135739
13. Bulatov V.I., Igenbaeva N.O., Nanishvili O.A. Otkhody neftegazovogo kompleksa kak tekhnologicheskii indikator geoekologicheskogo sostoianiia regionov Rossii [Oil and gas complex waste products as technological indicator of geoecological condition of Russia regions]. *Biulleten' nauki i praktiki*, 2021, vol. 7, no. 8, pp. 46-55. DOI: 10.33619/2414-2948/69
14. Sagitov R.F., Shabanova S.V., Vasilevskaia S.P. et al. Klassifikatsiia metodov lokalizatsii i likvidatsii zagriaznenii pochvy neft'iu i nefteproduktami [Classification of methods localization and liquidation of oil-contaminated soil and oil products]. *Nauka i sovremennost'*, 2016, no. 1, pp. 202-207. DOI: 10.17117/ns.2016.01.202
15. Shamak D.N. Metody likvidatsii neftianykh zagriaznenii [Methods for eliminating oil spills]. *Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Ekologiia i zashchita okruzhaiushchei sredy", 16-17 May 2018*. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 2018, pp. 226-228.
16. Gaur N., Flora G., Yadav M., Tiwari A. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, vol. 16, iss. 2, pp. 180-193. DOI: 10.1039/c3em00491k
17. Petrova T.A., Rudzish E. Vidy meliorantov dlia rekul'tivatsii tekhnogenno narushennykh territorii gornoi promyshlennosti [Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands]. *Gornyi informatsionno analiticheskii biulleten'*, 2021, no. 4, pp. 100-112. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_100
18 Petrova. T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. et al. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge. *Minerals*, 2022, vol. 12, iss. 3, no. 376. DOI: 10.3390/min12030376
19. Kogan V.E. Stekloobraznye penomaterialy neorganicheskoi i organicheskoi prirody i perspektivy ochistki okruzhaiushchei sredy ot zagriaznenii neft'iu i nefteproduktami [Inorganic and organic vitreous foam materials and prospect of environmental cleaning from oil and oil products pollutions]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 218, pp. 331-338.

20. Farag S., Soliman N.A., Abdel-Fattah Y.R. Statistical optimization of crude oil biodegradation by a local marine bacterium isolate Pseudomonas sp. sp48. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2018, vol. 16, iss. 2, pp. 409-420. DOI: 10.1016/j.jgeb.2018.01.001
21. Miazin V.A., Isakova E.A., Vasil'eva G.K. Vliianie granulirovannogo aktivirovannogo uglia na skorost' bioremediatsii pochv Murmanskoi oblasti, istoricheski zagriaznennykh nefteproduktami [The effect of activated carbon on the bioremediation rate of the soils historically contaminated with oil products in the Murmansk region]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2020, no. 2, pp. 20-26. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12020
22. Finley S.D., Broadbelt L.J., Hatzimanikatis V. Finley S.D. In silico feasibility of novel biodegradation pathways for 1, 2, 4-trichlorobenzene. *BMC Systems Biology*, 2010, vol. 4, no. 7. DOI: 10.1186/1752-0509-4-7
23. Kumar R., Kaur A. Oil spill removal by mycoremediation. *Microbial Action on Hydrocarbons*, 2018, pp. 505-526. DOI: 10.1007/978-981-13-1840-5_20
24. Taki G., Islam M.N., Park Seong-Jae, Jeong-Hun Park. Optimization of operating parameters to remove and recover crude oil from contaminated soil using subcritical water extraction process. *Environmental Engineering Research*, 2018, vol. 23, iss. 2, pp. 175-180. DOI: 10.4491/eer.2017.145
25. Dhiraj Kumar Chaudhary, Kim Jaisoo New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, vol. 142, pp. 58-72. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.05.001
26. Ajona M., Vasanthi P. Bioremediation of petroleum contaminated soils - A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, part 7, pp. 7117-7122. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.949
27. Sivaraman C., Ganguly A., Nikolausz M., Mutnuri S. Isolation of hydrocarbonoclastic bacteria from bilge oil contaminated water. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 8, pp. 461-470. DOI: 10.1007/BF03326232
28. Kuyukina M.S., Ivshina I.B. Bioremediation of contaminated environments using Rhodococcus. *Biology of Rhodococcus. Cham: Springer*, 2019, pp. 231-270. DOI: 10.1007/978-3-030-11461-9_9
29. Al-Nasrawi H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 2012, vol. 3, iss. 4, no. 1000147. DOI: 10.4172/2155-6199.1000147
30. Isakova E.A., Korneikova M.V. Destruktsionnaia aktivnost' uglevodorodokisliaiushchikh mikromitsetov, vydelennykh iz substratov pribrezhnykh territorii Barentseva i Belogo morei [Destructive activity of hydrocarbon-oxidizing micromycetes extracted from the substrates of the coastal areas, the Barents and White Seas]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 178-189. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-178-189
31. Korchagina Iu.S., Shchemelinina T.N. Sposob ochistki pochv ot neftianykh zagriaznenii metodom gidroposeva biosmesi s primeneniem mikrovodoroslei Chlorella vulgaris globosa IPPAS C-2024 [A method for cleaning soils from oil pollution by hydroseeding a bio-mixture using microalgae Chlorella vulgaris globosa IPPAS C-2024]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2764305 (2022).
32. Shchemelinina T.N., Anchugova E.M. Nefteokisliaiushchii biopreparat, biosorbent na ego osnove i sposob ego prigotovleniia [Oil-oxidizing biopreparation, biosorbent based on it and method of its preparation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2703500 (2019).
33. Hwanhwi Lee, Seo Yeong Yun, Seokyoon Jang et al. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote- contaminated soil by Peniophora incarnata KUC8836. *Bioremediation Journal*, 2015, vol. 19. 41, iss. 1, pp. 1-8. DOI: 10.1080/10889868.2014.939136
34. Hesnawi R.M., Adbeib M.M. Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil. *APCBEE Procedia*, 2013, vol. 5, pp. 557-561. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.093
35. Santos H.F., Carmo F.L., Paes J.E.S. et al. Bioremediation of mangroves impacted by petroleum. *Water Air Soil Pollut*, 2011, vol. 216, pp. 329-350. DOI: 10.1007/s11270-010-0536-4
36. GOST 17.4.4.02-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlia khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [GOST 17.4.4.02-2017. Environmental Protection. Soils. Methods of Sampling and Preparing Samples for Chemical, Bacteriological, and Helminthological Analysis]. Moscow, 2017.
37. MUK 4.2.3695-21. Metody kontrolia. Biologicheskie i mikrobiologicheskie faktory. Metody mikrobiologicheskogo kontrolia pochvy. Metodicheskie ukazaniia [MUK 4.2.3695-21. Control Methods. Biological and Microbiological Factors. Methods of Microbiological Soil Monitoring. Guidelines]. Moscow, 2021.
38. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniia k obespecheniiu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlia cheloveka faktorov sredy obitaniia [SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Moscow, 2021.
39. Czinkóczky R., Németh A. Techno-economic assessment of Bacillus fermentation to produce surfactin and lichenysin. *Biochem. Eng. J.*, 2020, vol. 163, Article 107719. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107719
40. Moutinho L.F., Moura F.R., Silvestre R.C., Romão-Dumaresq A.S. Microbial biosurfactants: a broad analysis of properties, applications, biosynthesis and technoeconomical assessment of rhamnolipid production. *Biotechnol. Prog.*, 2021, vol. 37, no. 2, Article e3093. DOI: 10.1002/btpr.3093
41. Chun J., Oren A., Ventosa A., Christensen H., Arahal D.R., da Costa M.S., Rooney A.P., Yi H., Xu X.W., De Meyer S., Trujillo M.E. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 2018, vol. 68, pp. 461-466. DOI: 10.1099/ijsem.0.002516
42. Mnif S., Chamkha M., Sayadi S. Isolation and characterization of Halomonas sp. strain C2SS100, a hydrocarbon-degrading bacterium under hypersaline conditions. *J. Appl. Microbiol.*, 2009, vol. 107, pp. 785-794. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04251
43. Fathepure B.Z. Recent studies in microbial degradation of petroleum hydrocarbons in hypersaline environments. *Front. Microbiol.*, 2014, vol. 5, Article 173, pp. 1-16. DOI: 10.3389/fmicb.2014.0017
44. Youssef N., Elshahed M.S., McInerney M.J. Microbiol processes in oil fields: culprits, problems and opportunities. *Adv. Appl. Microbiol.*, 2009, vol. 66, pp. 141-252. DOI: 10.1016/S0065-2164(08)00806-X
45. Nazina T.N., Shestakova N.M., Pavlova N.K., Tatarkin Y.V., Ivoilov V.S., Khisametdinov M.R., Sokolova D.Sh., Babich T.L., Tourova T.P., Poltaraus A.B., Belyaev S.S., Ivanov M.V. Functional and phylogenetic microbial diversity in formation waters of a low-temperature carbonate petroleum reservoir. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 2013, vol. 81, pp. 71-81. DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.07.008

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.