

Биохимия, генетика и молекулярная биология / Biochemistry, Genetics and Molecular Biology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447)

EDN: FSISXS

УДК 579.6+579.66+622.276



Липопептидные биосурфактанты для повышения нефтеотдачи: характеристика и эффективность

А.С. Гордеев, А.А. Кириченко, Л.Р. Бикташева,
Х. Абдалджалил, П.А. Курынцева

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Нефть сохраняет статус ключевого ресурса мировой энергетики, обеспечивая приблизительно 30% глобального энергопотребления. Однако традиционные методы первичной и вторичной добычи извлекают лишь 20-40% запасов нефти, что стимулирует развитие методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Среди них биологические (микробные) методы увеличения нефтеотдачи (БМУН), основанные на применении биосурфактантов, синтезируемых микроорганизмами, – «зеленых» аналогов синтетических поверхностно-активных веществ – демонстрируют высокий потенциал для зрелых месторождений с высоким содержанием остаточной нефти.

Цель – оценить эффективность применения биосурфактантов, продуцируемых штаммами-продуцентами *Bacillus sp. 2a* и *Peribacillus sp. 2b* для увеличения нефтеотдачи при добыче трудноизвлекаемой нефти.

Материалы и методы. Исследования проводили в условиях лабораторного эксперимента. Использовали липопептидные биосурфактанты, экстрагированные из культур штаммов *Bacillus sp. 2a* и *Peribacillus sp. 2b*. Их липопептидную природу подтверждали методом ИК-спектроскопии, а поверхностную активность (величину поверхностного натяжения) оценивали методом кольца Дю Нюи. Эффективность применения для МУН определяли в модельных экспериментах по вытеснению нефти Ромашкинского месторождения из песчаных колонок.

Результаты. Данные ИК-спектроскопии выявили липопептидную природу биосурфактантов. Биосурфактант штамма *Bacillus sp. 2a* снижал поверхностное натяжение до 29,6 мН/м (пик активности на 24–48 ч), обеспечивая прирост нефтеотдачи 31.2% в модельном эксперименте. Для штамма *Peribacillus sp. 2b* ми-

нимальное поверхностное натяжение составило 52,8 мН/м (достигнуто к 48 ч), с увеличением нефтеотдачи 23,2%. Эффективность дополнительной нефтеотдачи, обеспеченной биосурфактантами, продуцированным штаммом *Bacillus sp. 2a* сопоставима с результатами синтетического ПАВ (31,2% и 29,3%, соответственно).

Ключевые слова: биосурфактанты; биологические (микробные) методы увеличения нефтеотдачи; липопептиды; поверхностное натяжение; песчаные колонки

Для цитирования. Гордеев, А. С., Кириченко, А. А., Бикташева, Л. Р., Абдалджалил, Х., & Курынцева, П. А. (2026). Липопептидные биосурфактанты для повышения нефтеотдачи: характеристика и эффективность. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 252–266. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447>

Lipopeptide biosurfactants for enhanced oil recovery: characterization and efficiency

A.S. Gordeev, A.A. Kirichenko, L.R. Biktasheva,
H. Abdaljalil, P.A. Kuryntseva

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

Abstract

Background. Oil remains a critical resource in the global energy sector, accounting for approximately 30% of worldwide energy consumption. However, conventional primary and secondary recovery methods extract only 20-40% of oil reserves, which stimulates the development of Enhanced Oil Recovery (EOR) techniques. Among them, biological (microbial) EOR methods (MEOR), based on the application of biosurfactants synthesized by microorganisms as “green” analogs of synthetic surfactants, show high potential for mature fields with high residual oil content.

Purpose. To evaluate the effectiveness of biosurfactants produced by *Bacillus sp. 2a* and *Peribacillus sp. 2b* strains for enhancing production of hard-to-recover oil reserves.

Materials and methods. The study was conducted under laboratory conditions. Lipopeptide biosurfactants extracted from cultures of *Bacillus sp. 2a* and *Peribacillus sp. 2b* strains were used. The lipopeptide nature of these biosurfactants was confirmed by infrared (IR) spectroscopy. Surface activity was evaluated by measuring surface tension using the Du Noüy ring method. The efficiency for MEOR was determined in model experiments on oil displacement from sand-packed columns using crude oil from the Romashkino field.

Results. IR spectroscopy confirmed the lipopeptide composition of the biosurfactants. The biosurfactant from the *Bacillus sp. 2a* strain reduced the surface tension to 29.6 - mN m⁻¹ (peak activity at 24–48 hours), providing an additional oil recovery factor of 31.2% in a model experiment. For the *Peribacillus sp. 2b* strain, the minimum sur-

face tension was 52.8 mN m^{-1} (achieved by 48 hours), with an increase in oil recovery of 23.2%. The efficiency of additional oil recovery provided by the biosurfactant from the *Bacillus* sp. 2a strain is comparable to the results obtained with a synthetic surfactant (31.2% and 29.3%, respectively).

Keywords: biosurfactants; microbial enhanced oil recovery; lipopeptides; surface tension; sand pack model

For citation. Gordeev, A. S., Kirichenko, A. A., Biktasheva, L. R., Abdaljalil, H., & Kuryntseva, P. A. (2026). Lipopeptide biosurfactants for enhanced oil recovery: characterization and efficiency. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 252–266. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1447>

Введение

В мировой практике доминирующими продуцентами биосурфактантов для БМУН выступают грамположительные бактерии родов *Bacillus* и *Peribacillus*, синтезирующие липопептиды (сурфактин, итурин, фенгигин), а также грамотрицательные *Pseudomonas* spp. продуцирующие преимущественно гликолипиды (рамнолипиды), которые обладают ограниченной устойчивостью к условиям нефтяных пластов (повышенная температура и солёность) [2; 7].

Критерии эффективности штаммов в отношении продукции биосурфактантов включают снижение поверхностного натяжения культуральной жидкости ниже 40 мН/м , эмульгирующую активность (индекс $E_{24} > 50\%$), а также испытание полученного продукта для повышения нефтеизвлечения в модельных системах – песчаных колонках и представительных ядрах, характеризующих породу-коллектор углеводородов, где доля дополнительно извлеченной нефти варьирует в диапазоне 5–40% и зависит от штамма-продуцента, наличия примесных метаболитов в продукте и физическим параметрам модельной колонки или ядра и самой нефти [26; 32].

Важным технологическим аспектом получения биосурфактантов является не только их биосинтез при культивировании штаммов-продуцентов, но и экстракция: для липопептидов наиболее эффективно кислотное осаждение (при pH 2.0) с последующей экстракцией органическими растворителями (хлороформ и метанол), тогда как для гликолипидов также применяют ультрафильтрацию и пенное фракционирование [5; 11].

Учитывая ограниченный пул промышленных штаммов-продуцентов, вариабельность структуры биосурфактантов и однозначную зависимость их свойств от химического строения, поиск новых высокоэффективных продуцентов остаётся актуальной задачей.

Материалы и методы

1.1. Штаммы микроорганизмов и условия культивирования. В исследовании использовались два штамма *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b из коллекции кафедры биотехнологии Института экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, ранее выделенные из образцов пластовых вод Ромашкинского месторождения (Республика Татарстан).

Культивирование штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b проводили в жидкой минеральной среде (г/л): глюкоза - 10, пептон - 5, дрожжевой экстракт - 3, NaCl - 5, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ - 0.2, K_2HPO_4 - 1. Инокуляцию - 5% (об/об) культурой в экспоненциальной фазе. Инкубация - $28 \pm 0,5$, 120 об/мин, 168 ч. Биосурфактанты экстрагировали из бесклеточного супернатанта: подкисление до pH 2.0 HCl (4°C, 12 ч), осаждённый продукт перерастворяли в хлороформ-метанольной смеси (2:1 об/об), органическую фазу выпаривали при 40. Выход биосурфактантов по сухой массе определяли гравиметрически после лиофилизации.

1.2. Методы аналитического контроля. Рост штаммов оценивали на основании изменения оптической плотности культуральной среды. Оптическую плотность (OD600) измеряли на спектрофотометре LOIP (Россия) против стерильной среды в качестве контроля.

Поверхностное натяжение (ST) бесклеточного супернатанта определяли методом кольца Дю Нуи на тензиометре Krüss K6 (Германия) при 25°C.

ИК-спектры экстрагированных биосурфактантов регистрировали на Фурье-спектрометре Bruker Lumos (Германия) с приставкой НПВО в диапазоне 4000-400 см⁻¹ с накоплением 256 сканов при спектральном разрешении 4 см⁻¹ при влажности 50% и T=298K.

1.3. Эксперименты по моделированию БМУН. Модельные песчаные колонки из ПВХ (30×5 см) заполняли прокалённым (550°C, 4 ч) речным песком (фракции 0.2-1.0 мм). После дегазации аргоном колонки насыщали модельным рассолом (50 г/л NaCl + 5 г/л CaCl₂) для определения объёма пор (ОП). Затем осуществляли вытеснение рассола нефтью Ромашкинского месторождения (плотность 0,95 г/см³, содержание серы 1,5%, парафинов 3,7%, смол и асфальтенов до 21%) до достижения прекращения выхода прозрачной жидкости и появления капель нефти. Объём первоначальных запасов нефти (ОПЗН) определяли как объём рассола, вытесненного нефтью при насыщении колонки. Далее проводили вторичное заводнение рассолом (0,5 PV/ч) до прекращения выхода нефти с фиксацией объёмов извлекаемой нефти. Для моделирования третичного метода добычи нефти вводили растворы: а) биосурфактантов *Bacillus sp.* 2a и

Peribacillus sp. 2b (0,1%, 0,2%, 0,5%), б) синтетического ПАВ (0,1%, 0,2%, 0,5%), а также был заложен контрольный вариант, не подвергавшийся обработке растворами ПАВ. Водно-нефтяные эмульсии, полученные после обработки, центрифугировали (10 000 g, 15 мин), нефтяную фазу отделяли и измеряли волнометрически. Эффективность выражали через дополнительное нефтеизвлечение (AOR, %): $AOR = [V_t / (OOIP - V_s)] \times 100\%$, где V_t – объем нефти после третичной обработки, V_s – объем нефти после вторичного заводнения и OOIP – первоначальные запасы нефти.

1.4. Статистическая обработка данных. Все эксперименты выполнены в трёх повторностях. Данные обрабатывали с использованием Python 3.10 (пакеты SciPy, statsmodels). Для сравнения групп применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с тестом Тьюки. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

2.1. Динамика роста культуры и биосинтеза биосурфактантов. Характер роста штаммов *Bacillus* sp. 2a и *Peribacillus* sp. 2b и изменения поверхностного натяжения (ST) представлены на рис. 1. Для штамма *Bacillus* sp. 2a минимальное значение ST ($29,6 \pm 0,5$ мН/м) достигнуто на 24 ч культивирования, Этот период соответствует концу логарифмической фазы роста, когда биосинтез липопептидов наиболее активен. Однако в стационарной фазе (48–120 ч) наблюдали увеличение ST до $39,0 \pm 0,7$ мН/м, что согласуется с данными по *B.subtilis* KLP2015, где показано, что вследствие протеазной активности происходит деградация сурфактина [24].

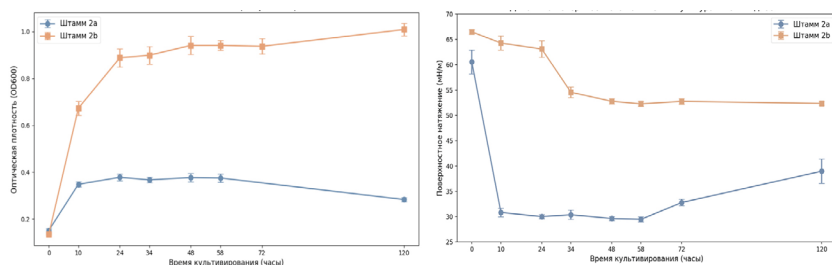


Рис. 1. Динамика роста (OD_{600}) (а) и поверхностного натяжения культуральной жидкости штаммов *Bacillus* sp. 2a и *Peribacillus* sp. 2b (б).

Fig. 1. Growth dynamics (OD_{600}) (a) and surface tension of the culture medium for strains *Bacillus* sp. 2a and *Peribacillus* sp. 2b (b).

В отличие от предыдущего штамма, штамм *Peribacillus sp.* 2b демонстрировал минимальное значение ST ($52,77 \pm 1,2$ мН/м) к 48 ч при росте биомассы ($OD_{600} = 0,968$). Такая задержка характерна для продуцентов высокомолекулярных липопептидов [29]. Стабилизация ST на уровне 52–54 мН/м в течение 120 ч указывает на отсутствие разложения вторичных метаболитов при стабилизации культуры, аналогично штаммам *B. licheniformis* [15].

Различия в динамике объясняются структурными особенностями, так, для штамма *Bacillus sp.* 2a может происходить синтез низкомолекулярных фенгигцинов с быстрым снижением ST, но низкой стабильностью [10; 25], тогда как для штамма *Peribacillus sp.* 2b происходит продукция липопептидов преимущественно в виде сурфактина – с длинными алифатическими цепями [20].

Полученная масса биосурфактантов после экстракции составила $1,0 \pm 0,1$ г/л (*Bacillus sp.* 2a) и $1,3 \pm 0,15$ г/л (*Peribacillus sp.* 2b), что сопоставимо с известными данными для подобных штаммов-продуцентов [18].

2.2. Структурная характеристика биосурфактантов. На Рис. 2 представлены характерные спектральные профили биосурфактантов штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b.

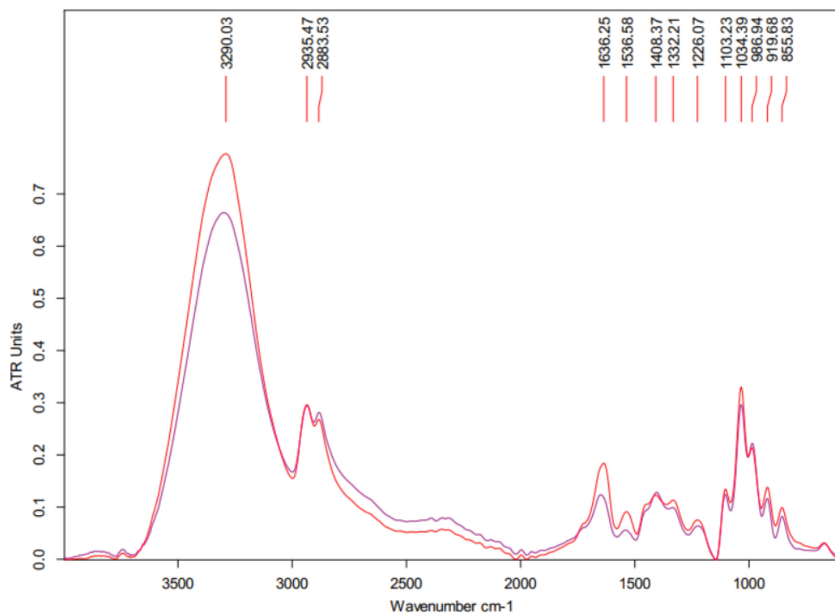


Рис. 2. ИК-спектры биосурфактантов штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b
Fig. 2. IR spectra of biosurfactants from strains *Bacillus sp.* 2a and *Peribacillus sp.* 2b

Спектральный анализ методом ИК-спектроскопии позволил отметить особенности молекулярной структуры продуктов культивирования штаммов *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b. Наблюдаемые характеристические пики подтверждают липопептидную природу экстрагированных из культуральной жидкости соединений: сигнал при 3290 см^{-1} соответствует колебаниям N-H (амид A) и O-H групп [13], пики в области 2935 см^{-1} и 2883 см^{-1} обусловлены валентными колебаниями C-H в метиленовых ($-\text{CH}_2-$) и метильных ($-\text{CH}_3$) группах алкильных цепей [22], тогда как пик при 1636 см^{-1} отражает валентные колебания C=O (амид I) [19]. Дополнительные сигналы при 1536 см^{-1} (деформационные колебания N-H в сочетании с C-N, амид II) и в диапазоне $1226-1103\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания C-O сложноэфирных связей) [13] показывают спектральную картину, типичную для липопептидов класса сурфактина

Совпадение наблюдаемых спектральных паттернов с референсными данными для сурфактина и биосурфактанта *B. licheniformis* W16 [4] подтверждает структурную схожесть. Особенно показательна повышенная интенсивность сигналов в области $2935-2883\text{ см}^{-1}$ у штамма *Peribacillus sp.* 2b, что свидетельствует о более протяжённых алкильных цепях в его липопептидах [8]. Эта структурная особенность объясняет повышенную стабильность биосурфактанта *Peribacillus sp.* 2b в стационарной фазе роста, наблюдаемую в динамике поверхностного натяжения

2.3. Эффективность биосурфактантов в БМУН. Результаты экспериментов в песчаных колонках представлены в Табл. 1. Наблюдается проявление дозозависимого эффекта – так, увеличение концентрации биосурфактанта штамма *Bacillus sp.* 2a с 0,1% до 0,5% привело к значительному росту дополнительного нефтеизвлечения (AOR) с 21,9% до 31,2%. Эта тенденция согласуется с данными Pornsunthorntawe et al., наблюдавших рост нефтеизвлечения на 15–20% для *Pseudomonas* spp. при аналогичном увеличении концентрации биосурфактантов [21]. Для штамма *Peribacillus sp.* 2b рост AOR был менее выражен (с 20,7% до 23,2%), что требует дополнительного исследования [12].

Наряду с этим, отмечается значительное превосходство штамма *Bacillus sp.* 2a в показателях нефтеизвлечения, так, при оптимальной концентрации 0,5% биосурфактант этого штамма показал наивысшую эффективность – $31,2 \pm 0,2\%$ AOR. Это значение не только превосходит показатели штамма *Peribacillus sp.* 2b (23,2%) и синтетического ПАВ (29,3%), но и превышает литературные данные для родственных штаммов *B. subtilis* (4–28% AOR) [3]. Например, Bo Wu et al. (2022) сообщали о дополнительном извлечении нефти в 25,6% для *B. subtilis* SL [30]. Мы предполагаем, что такие показатели могут быть обусловлены несколькими факторами. Так, липопептиды

штамма *Bacillus sp.* 2a могут обладать повышенной способностью специфически взаимодействовать с высокомолекулярными компонентами нефти Ромашкинского месторождения (смолы и асфальтены ~22%), эффективно солюбилизируя их. Это согласуется с работой Tavassoli et al. (2012), показавших, что биосурфактанты могут избирательно взаимодействовать с неполярными компонентами нефти [28]. При этом, для биосурфактанта штамма *Bacillus sp.* 2a могут быть характерны меньшие адсорбционные потери на минеральной фазе (поверхности частиц песка) по сравнению с анионными синтетическими ПАВ [6], что позволяет большему количеству активного вещества достигать остаточной нефти. Кроме того, липопептиды, продуцируемые этим штаммом, потенциально способны формировать обратные мицеллы в тяжёлых фракциях нефти, облегчая их мобилизацию, как это описано для некоторых липопептидов [17].

В тоже время, относительно низкая эффективность штамма *Peribacillus sp.* 2b, несмотря на высокий выход биомассы ($OD_{600} = 0.968$) и биосурфактанта (1,3 г/л), может быть связана с несколькими факторами. Вероятно, полученный экстракт мог содержать значительное количество внеклеточных полимерных веществ (EPS) или других метаболитов, не обладающих поверхностной активностью, но влияющих на общие свойства раствора [23, 16].

Также возможно, что оптимум pH для поверхностной активности биосурфактанта штамма находится в щелочном диапазоне (pH 8,5-9,0) [27], тогда как модельный эксперимент проводился при нейтральном pH. Кроме того, известно, что некоторые липопептидные биосурфактанты (итурин, фенгигин) часто проявляют себя как более эффективные эмульгаторы, чем агенты, снижающие межфазное натяжение, что может быть менее оптимально для мобилизации нефти из поровых каналов [23].

Согласно полученным данным, максимальная эффективность в увеличении нефтеотдачи достигнута для биосурфактанта, продуцируемого штаммом *Bacillus sp.* 2a в концентрации 0,5%, что обеспечило дополнительное извлечение нефти в размере 31,2% от остаточного объёма. При той же концентрации (0,5%) продукт штамма *Bacillus sp.* 2a сопоставим по значению с синтетическим ПАВ (разница значений составляет менее 2%), кроме того, превосходит значения для биосурфактанта, продуцируемого штамма *Peribacillus sp.* 2b, для которого дополнительное извлечение нефти составило 23,2% при высоком выходе биомассы. С учётом литературных данных [14; 31], механизм действия биосурфактантов в БМУН может иметь комплексный характер и составлять как снижение межфазного натяжения нефть-вода (до 5×10^{-3} мН/м), так и эмульгирование остаточной нефти наряду с влиянием на смачиваемость пород-коллекторов.

Таблица 1.

Эффективность биосурфактантов в моделях БМУН

Table 1. Efficacy of biosurfactants in BMUN models

Образец	PV (мл)	ООПР (мл)	Нефть после вторичной добычи (мл)	Нефть после третичной добычи (мл)	AOR (%)
Биосурфактант <i>Bacillus sp.</i> 2a (0.1%)	45 ± 2,7	25 ± 1,0	17,0 ± 0,21	1,75 ± 0,15	21,88 ± 0,5
Биосурфактант <i>Bacillus sp.</i> 2a (0.2%)	40 ± 2,4	25 ± 1,5	17,0 ± 0,12	2,25 ± 0,18	28,1 ± 1,0
Биосурфактант <i>Bacillus sp.</i> 2a (0.5%)	50 ± 3,0	25 ± 1,5	17,0 ± 0,135	2,50 ± 0,225	31,2 ± 0,6
Биосурфактант <i>Peribacillus sp.</i> 2b (0.1%)	40 ± 2,4	20 ± 1,6	13,0 ± 0,15	1,45 ± 0,21	20,7 ± 0,3
Биосурфактант <i>Peribacillus sp.</i> 2b (0.2%)	45 ± 2,7	28 ± 1,3	18,0 ± 0,09	2,15 ± 0,27	21,5 ± 0,4
Биосурфактант <i>Peribacillus sp.</i> 2b (0.5%)	43 ± 2,6	30 ± 1,4	19,0 ± 0,015	2,55 ± 0,345	23,2 ± 0,6
Синтетический сурфактант (0.1%)	50 ± 3,0	26 ± 1,3	15,0 ± 0,15	2,50 ± 0,21	22,7 ± 0,8
Синтетический сурфактант (0.2%)	50 ± 3,0	21 ± 1,1	14,0 ± 0,105	1,95 ± 0,255	27,9 ± 0,6
Синтетический сурфактант (0.5%)	45 ± 2,7	23 ± 1,0	16,0 ± 0,045	2,05 ± 0,315	29,3 ± 0,5
Контроль	45 ± 2,7	24 ± 1,1	12,0 ± 0,0	0 ± 0,0	0,0

Заключение

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность биосурфактантов, продуцируемых штаммами *Bacillus sp.* 2a и *Peribacillus sp.* 2b, для технологий повышения нефтеизвлечения (БМУН). Штамм *Bacillus sp.* 2a проявил максимальную поверхностную активность в период 24-48 ч культивирования, снижая поверхностное натяжение культуральной жидкости до 29,6 мН/м при оптической плотности 0,378, тогда как значения для штамм *Peribacillus sp.* 2b достигали высоких значений к 48 ч (52,8 мН/м,

OD600 0.968). В модельных экспериментах с песчаными колонками биосурфактант штамма *Bacillus* sp. 2a в концентрации 0,5% обеспечил дополнительное нефтеизвлечение нефти со значением 31,2%, что сопоставимо с эффективностью синтетического ПАВ (29,3%) и превзошло результат штамма *Peribacillus* sp. 2b, значение которого составило 23,18. Высокая эффективность штамма *Bacillus* sp. 2a может быть связана со способностью его липопептидов взаимодействовать с высокомолекулярными компонентами нефти (смолы, асфальтены, парафины). Полученные данные демонстрируют целесообразность пилотных испытаний штамма *Bacillus* sp. 2a на кернах, характеризующих породы пласта-коллектора с высоким содержанием тяжёлых фракций нефти и приближённых к горным условиям.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность коллективу кафедры биотехнологии Казанского федерального университета за консультации и техническую поддержку. Отдельная благодарность директору Института экологии, биотехнологии и природопользования, профессору С.Ю. Селивановской, за предоставление исследовательской инфраструктуры и научное руководство.

Список литературы / References

1. Al-Sulaimani, H., Joshi, S., Al-Wahaibi, Y., Al-Bahry, S., Elshafie, A., & Al-Bemani, A. (2011). Microbial biotechnology for enhancing oil recovery: current developments and future prospects. *Biotechnol Bioinf Bioeng*, 1(2), 147–158.
2. Al-Wahaibi, Y., Joshi, S., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A., & Shibulal, B. (2014). Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B30 and its application in enhancing oil recovery. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 114, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.09.022>.
3. Alvarez, V. M., Guimarães, C. R., Jurelevicius, D., de Castilho, L. V. A., de Sousa, J. S., da Mota, F. F., & Seldin, L. (2020). Microbial enhanced oil recovery potential of surfactin-producing *Bacillus subtilis* AB2.0. *Fuel*, 272, 117730. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117730>. EDN: <https://elibrary.ru/SSIIQZ>.

4. Caccamo, M. T., Gugliandolo, C., Zammuto, V., & Magazù, S. (2020). Thermal properties of an exopolysaccharide produced by a marine thermotolerant *Bacillus licheniformis* by ATR-FTIR spectroscopy. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.163>. EDN: <https://elibrary.ru/WLTTAZ>.
5. Cooper, D. G., & Goldenberg, B. G. (1987). Surface-active agents from two *Bacillus* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(2), 224–229. <https://doi.org/10.1128/aem.53.2.224-229.1987>.
6. Daoshan, L., Shouliang, L., Yi, L., & Demin, W. (2004). The effect of biosurfactant on the interfacial tension and adsorption loss of surfactant in ASP flooding. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 244(1-3), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.06.017>. EDN: <https://elibrary.ru/KMMQMR>.
7. Das, K., & Mukherjee, A. K. (2007). Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. *Bioresource Technology*, 98(7), 1339–1345. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.032>.
8. Das, P., Mukherjee, S., & Sen, R. (2008). Antimicrobial potential of a lipopeptide biosurfactant derived from a marine *Bacillus circulans*. *Journal of Applied Microbiology*, 104(6), 1675–1684. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03701.x>.
9. Geetha, S. J., Banat, I. M., & Joshi, S. J. (2018). Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14, 23–32.
10. Gimenez, D., et al. (2021). Fengycin A analogues with enhanced chemical stability and antifungal properties. *Organic Letters*, 23(12), 4672–4676. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.1c01387>. EDN: <https://elibrary.ru/DBRJMG>.
11. Heyd, M., Kohnert, A., Tan, T. H., Nusser, M., Kirschhöfer, F., Brenner-Weiss, G., & Berensmeier, S. (2008). Development and trends of biosurfactant analysis and purification using rhamnolipids as an example. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(5), 1579–1590. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1828-4>. EDN: <https://elibrary.ru/MDHNYZ>.
12. Jahanbani Veshareh, M., Ganji Azad, E., Deihimi, T., Niazi, A., & Ayatollahi, S. (2019). Isolation and screening of *Bacillus subtilis* MJ01 for MEOR application: biosurfactant characterization, production optimization and wetting effect on carbonate surfaces. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(1), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0457-0>. EDN: <https://elibrary.ru/DNQPKK>.
13. Jacques, P. (2010). Surfactin and other lipopeptides from *Bacillus* spp. In *Biosurfactants: from genes to applications* (pp. 57–91). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14490-5_3.
14. Kaur, A., Madhu, Sharma, A., Singh, K., & Upadhyay, S. (2024). Investigation of two-pore K⁺ (TPK) channels in *Triticum aestivum* L. suggests their role in stress

- response. *Heliyon*, 10, e27814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27814>. EDN: <https://elibrary.ru/BILSKN>.
15. Lin, S. C., Lin, K. G., Lo, C. C., & Lin, Y. M. (1998). Enhanced biosurfactant production by a *Bacillus licheniformis* mutant. *Enzyme and Microbial Technology*, 23(3-4), 267–273. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(98\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(98)00049-0). EDN: <https://elibrary.ru/ABCHBD>.
 16. Liu, C., Lu, J., Lu, L., Liu, Y., Wang, F., & Xiao, M. (2010). Isolation, structural characterization and immunological activity of an exopolysaccharide produced by *Bacillus licheniformis* 8-37-0-1. *Bioresource Technology*, 101(14), 5528–5533. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.151>.
 17. Mnif, I., & Ghribi, D. (2015). Review lipopeptides biosurfactants: main classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications. *Peptide Science*, 104(3), 129–147. <https://doi.org/10.1002/bip.22630>.
 18. Mnif, I., Segovia, R., Bouallegue, A., Ghribi, D., & Rabanal, F. (2023). Identification of different lipopeptides isoforms produced by *Bacillus mojavensis* BI2 and evaluation of their surface activities for potential environmental application. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(6), 2668–2685. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02752-3>. EDN: <https://elibrary.ru/TZQCHJ>.
 19. Nanjundan, J., Ramasamy, R., Uthandi, S., & Ponnusamy, M. (2019). Antimicrobial activity and spectroscopic characterization of surfactin class of lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* SR1. *Microbial Pathogenesis*, 128, 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.01.037>. EDN: <https://elibrary.ru/RAAZVG>.
 20. Peypoux, F., Bonmatin, J. M., & Wallach, J. (1999). Recent trends in the biochemistry of surfactin. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51(5), 553–563. <https://doi.org/10.1007/s002530051432>. EDN: <https://elibrary.ru/ATUYDY>.
 21. Pornsunthorntawe, O., Artaweeporn, N., Paisanjit, S., Somboonthanate, P., Abe, M., Rujiravanit, R., & Chavadej, S. (2008). Isolation and comparison of biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* PT2 and *Pseudomonas aeruginosa* SP4 for microbial surfactant-enhanced oil recovery. *Biochemical Engineering Journal*, 42(2), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.06.016>.
 22. Prithiviraj, A., & Parthasarathi, R. (2023). Biocontrol potential of lipopeptide bio surfactant produced by *Bacillus* sp. from mangrove ecosystem at Vellar-Coleroon estuarine complex against early blight of tomato. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8037888>.
 23. Rani, R. P., Anandharaj, M., Sabhapathy, P., & Ravindran, A. D. (2017). Physico-chemical and biological characterization of novel exopolysaccharide produced by *Bacillus tequilensis* FR9 isolated from chicken. *International Journal of Biological Macromolecules*, 96, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.122>.
 24. Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R. G., & Prest, B. C. (2024). *Global energy outlook 2024: Peaks or plateaus*. Resources for the Future: Washington, DC, USA.

25. Sang-Cheol, L., Kim, S. H., Park, I. H., Chung, S. Y., Chandra, M. S., & Yong-Lark, C. (2010). Isolation, purification, and characterization of novel fengycin S from *Bacillus amyloliquefaciens* LSC04 degrading crude oil. *Biotechnology and Bio-process Engineering*, 15(2), 246–253. <https://doi.org/10.1007/s12257-009-0037-8>. EDN: <https://elibrary.ru/YBMLZV>.
26. Satpute, S. K., Bhawsar, B. D., Dhakephalkar, P. K., & Chopade, B. A. (2008). Assessment of different screening methods for selecting biosurfactant producing marine bacteria. *Indian Journal of Marine Sciences*, 37(3), 243.
27. Sayem, S. A., Alam, M. J., & Hoq, M. M. (2006). Effect of temperature, pH and metal ions on the activity and stability of alkaline protease from novel *Bacillus licheniformis* MZK03. *Proceedings-Pakistan Academy of Sciences*, 43(4), 257.
28. Tavassoli, T., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., & Salehizadeh, H. (2012). Asphaltene biodegradation using microorganisms isolated from oil samples. *Fuel*, 93, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.021>.
29. Van Hamme, J. D., Singh, A., & Ward, O. P. (2006). Physiological aspects: Part 1 in a series of papers devoted to surfactants in microbiology and biotechnology. *Biotechnology Advances*, 24(6), 604–620. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.08.001>.
30. Xia, W. J., Dong, H. P., Yu, L., & Yu, D. F. (2011). Comparative study of biosurfactant produced by microorganisms isolated from formation water of petroleum reservoir. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 392(1), 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.044>.
31. Youssef, N. H., Duncan, K. E., Nagle, D. P., Savage, K. N., Knapp, R. M., & McInerney, M. J. (2004). Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods*, 56(3), 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2003.11.001>.

ВКЛАД АВТОРОВ

Кириченко А.А.: визуализация, написание – подготовка оригинального проекта.

Бикташева Л.Р.: концептуализация, методология, написание – подготовка оригинального проекта.

Гордеев А.С.: проверка достоверности, обработка данных.

Курынцева П.А.: формальный анализ, написание – обзор и редактирование, авторский надзор, финансирование.

Абдалджалил Х.: исследование.

Все авторы прочитали опубликованную версию рукописи и согласились с ней.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anastasia A. Kirichenko: visualization, writing – original draft preparation.

Liliia R. Biktasheva: conceptualization, methodology, writing – original draft preparation.

Alexander S. Gordeev: data validation, data processing.

Polina A. Kuryntseva: formal analysis, writing – review and editing, author supervision, funding.

Hasan Abdaljalil: investigation.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
Drgor@mail.ru*

Кириченко Анастасия Алексеевна, студент

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
A.Kirichenko696@yandex.ru*

Бикташева Лилия Рамилевна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологий

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
biktasheval@mail.ru*

Абдалджалил Хасан, аспирант

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
hasanabdaljalil23@gmail.com*

Курынцева Полина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологий

*Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Gordeev, Research Associate

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
Drgor@mail.ru
SPIN-code: 6961-0144*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1918-305X>

ResearcherID: AAI-8761-2020

Scopus Author ID: 57207854487

Anastasiia A. Kirichenko, Student

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

A.Kirichenko696@yandex.ru

SPIN-code: 5485-9014

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2799-4863>

ResearcherID: LLM-0739-2024

Scopus Author ID: 58754395500

Liliia R. Biktasheva, PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Biotechnology Department

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

biktasheval@mail.ru

SPIN-code: 2867-4922

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-444X>

ResearcherID: N-3675-2016

Scopus Author ID: 56358635400

Hassan Abdaljalil, Graduate Student

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

hasanabdaljalil23@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3038-1796>

Polina A. Kuryntseva, PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Biotechnology Department

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlyovskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Поступила 18.09.2025

После рецензирования 21.11.2025

Принята 30.12.2025

Received 18.09.2025

Revised 21.11.2025

Accepted 30.12.2025