

Научная статья
УДК 579.6
EDN: SQKPVO
DOI: 10.21285/achb.998



Штамм *Gordonia amicalis* G2 – продуцент поверхностно-активных веществ биологического происхождения

И.А. Нечаева*✉, А.Н. Осина*, А.С. Филиппова*, Н.В.Т. Нам**, Л.Т. Мо**

*Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

**Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского

Тропического научно-исследовательского и технологического центра, Хо-Ши-Минь, Вьетнам

Аннотация. Целью проведенного исследования являлось изучение способности нового штамма-деструктора парафинов *Gordonia amicalis* G2, выделенного из загрязненного песка морского порта во Вьетнаме, продуцировать биосурфактанты. Мониторинг продукции биосурфактантов штаммом *Gordonia amicalis* G2 проводили в процессе роста бактерий при периодическом культивировании с использованием гексадекана в качестве ростового субстрата. Эффективность действия продуцируемых биосурфактантов оценивали с помощью поверхностного и межфазного натяжения. Поверхностное и межфазное натяжение растворов биосурфактантов определяли методом отрыва кольца де Нуи с использованием тензиометра Kruss K6. Поверхностное натяжение снизилось до 39 мН/м, межфазное натяжение – до 2 мН/м. Для характеристики химической структуры биосурфактантов использовали тонкослойную хроматографию и инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье. По результатам качественной оценки выявлена гликолипидная природа вторичных метаболитов. Критическую концентрацию мицеллообразования определяли по точке перегиба на кривых зависимостей поверхностного натяжения от содержания биосурфактанта. Значение критической концентрации мицеллообразования составило 200 мг/л при постоянном поверхностном натяжении 39 мН/м. Новый штамм *Gordonia amicalis* G2 продемонстрировал эффективную способность к продукции гликолипидных биосурфактантов. Учитывая способность *Gordonia amicalis* G2 участвовать в синтезе каротиноидов, можно предположить разработку комплексной технологии получения вторичных метаболитов на основе данного штамма.

Ключевые слова: *Gordonia*, биосурфактанты, каротиноиды, поверхностное натяжение, межфазное натяжение, гликолипиды, критическая концентрация мицеллообразования

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-24-20033 (<https://rscf.ru/project/24-24-20033/>) и правительства Тульской области.

Для цитирования: Нечаева И.А., Осина А.Н., Филиппова А.С., Нам Н.В.Т., Мо Л.Т. Штамм *Gordonia amicalis* G2 – продуцент поверхностно-активных веществ биологического происхождения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 2. С. 213–223. DOI: 10.21285/achb.978. EDN: SQKPVO.

***Gordonia amicalis* G2 strain as a producer of biosurfactants**

Irina A. Nechaeva*✉, Anna N. Osina*, Anastasia S. Filippova*,
Nguyen V.T. Nam**, Luong T. Mo**

*Tula State University, Tula, Russian Federation

**Southern Branch of the Joint Russia-Vietnam Tropical Research and Technology Center,
Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract. The present study was aimed at analyzing the ability of a new paraffin-degrading strain, *Gordonia amicalis* G2, isolated from the contaminated sand of a seaport in Vietnam, to produce biosurfactants. The production of biosurfactants by the *Gordonia amicalis* G2 strain was monitored during bacterial growth in batch culture with the use of hexadecane as the growth medium. The effectiveness of produced biosurfactants was evaluated in terms of surface and interfacial tension. The surface and interfacial tension of biosurfactant solutions were determined using the du Noüy ring method by means of a Kruss K6 tensiometer. Surface tension decreased to 39 mN/m; interfacial tension, to 2 mN/m. The chemical structure of biosurfactants was characterized using thin-layer chromatography and Fourier transform infrared spectroscopy. A qualitative assessment revealed the glycolipid nature of secondary metabolites. The critical micelle concentration was determined from the inflection point of the curves showing the dependence of surface tension on the biosurfactant content. The critical micelle concentration amounted to 200 mg/L at a constant surface tension of 39 mN/m. The new *Gordonia amicalis* G2 strain was found to have an effective ability to produce glycolipid biosurfactants. Given the ability of *Gordonia amicalis* G2 to participate in the synthesis of carotenoids, an integrated technology could be developed for secondary metabolite production by this strain.

Keywords: *Gordonia*, biosurfactants, carotenoids, surface tension, interfacial tension, glycolipids, critical micelle concentration

Funding. The Russian Science Foundation (no. 24-24-20033, <https://rscf.ru/project/24-24-20033/>) and the government of the Tula region supported the research.

For citation: Nechaeva I.A., Osina A.N., Filippova A.S., Nam N.V.T., Mo L.T. *Gordonia amicalis* G2 strain as a producer of biosurfactants. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(2):213-223. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.978. EDN: SQKPVO.

ВВЕДЕНИЕ

Представители рода *Gordonia* являются аэробными грамположительными нокардиоморфными актиномицетами. Различные виды гордоний выделены из почвы [1], морской воды [2], сточных вод [3], территорий фермерских хозяйств, птичников [4], мест нефтяных разливов [5]. Широкий ареал их обитания во многом обеспечивается высокой метаболической активностью, благодаря которой представители *Gordonia* способны утилизировать большой спектр различных соединений, в том числе промышленные загрязнители – алканы [6], ароматические углеводороды (пирен [7], фенантрен [2]), эфиры фталевой кислоты [8], нитрилы [9], некоторые синтетические инсектициды (тетраметрин, D-цифенотрин, хлоремпентрин, праллетрин, аллетрин) [10], бифенилы и их полихлорированные производные [11], фенол [12] пиридины [13], стероидные соединения (холестерол [14], эстрадиол [15]). Отличительной особенностью гордоний является способность осуществлять десульфуризацию сероорганических соединений, например изопренового каучука [16], тиофена [17] или дибензотиофена [18]. Бактерии рода *Gordonia* обладают устойчивостью к действию тяжелых металлов, что важно для их практического

применения в экологической биотехнологии. Так, штамм *Gordonia alkanivorans* YC-RL2 проявлял устойчивость к ионам Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} и Pb^{2+} [11].

Кроме того, гордонии синтезируют широкий спектр вторичных метаболитов, которые имеют значительный потенциал для применения в различных отраслях промышленности и областях деятельности человека. К таким соединениям относятся антибиотики (актиномицин D) [19], алкалоиды (пимпринин, кладониамин), фенилпропаноиды (атрамицин типов А и В, куркумин А, В и С, 1,4-дифенил-2,3-бутандиол) [20], сидерофоры (дифероксамин [20, 21]), бендиголы [22], терпеноиды [23], каротиноиды [24], липопептиды [19], экзополисахариды [25], биосурфактанты [26].

Биосурфактанты рассматриваются как «зеленые» аналоги синтетических поверхностно-активных веществ. Они нетоксичны, биоразлагаемы, стабильны в широком диапазоне температур, pH и ионной силы [27]. Показано, что некоторые из них обладают антибактериальной, противовирусной, противогрибковой, противораковой и иммунологической активностью [28–30]. Благодаря вышеперечисленным преимуществам и свойствам биосурфактанты предложено использовать в сельском

хозяйстве [31], косметологии [32], медицине и фармацевтике [33], пищевой промышленности [34] и нефтегазовой отрасли [35].

Несмотря на большой спрос и многочисленные преимущества биосурфактантов, их широкое использование ограничено относительно высокой стоимостью. Для снижения затрат на их производство предложены различные биотехнологические подходы, такие как твердофазная ферментация, оптимизация состава питательной среды, иммобилизация продуцентов [36]. В то же время микроорганизм-продуцент играет ключевую роль в реализации биотехнологического процесса. Учитывая высокий деградативный потенциал и устойчивость к токсикантам, поиск продуцентов поверхностно-активных веществ среди гордоний позволит найти новые штаммы с большим биотехнологическим потенциалом.

В связи с вышесказанным целью проведенной работы являлось оценка потенциала нового штамма *Gordonia amicalis* G2 – деструктора углеводов нефти для применения в технологии получения «зеленых» поверхностно-активных веществ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования. В исследовании использовали штамм *G. amicalis* G2 из рабочей коллекции лаборатории экологической и медицинской биотехнологии Научно-исследовательского центра «БиоХимТех» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия). Этот штамм выделен из загрязненного песка морского порта Кат Лай (г. Хошимин, Вьетнам) и предоставлен для исследований кандидатом химических наук, заведующим лабораторией тропической медицины Южного отделения Совместного Российско-Вьетманского Тропического центра Лыонг Тхи Мо. Геном штамма *G. amicalis* G2 секвенирован и депонирован в базе данных NCBI под номером BioSample SAMN27068010, BioProject PRJNA821361, GenBank CP094665 (хромосома), CP094666 (плазмида рCP89), CP094667 (плазмида рCP113).

Условия культивирования. Периодическое культивирование проводили в колбах Эрленмейера, содержащих 100 мл модифицированной среды Эванса, с использованием в качестве единственного источника углерода и энергии гексадекан (2% по объему) при 32 °C в течение 96 ч на орбитальном шейкере-инкубаторе ES-20/60 (BioSan, Латвия) при 180 об/мин. Посевная доза инокулята составляла 2%.

Состав среды Лурия – Бертрани, г/л: триптон – 10; дрожжевой экстракт – 5; NaCl – 10.

Состав среды Эванса: K_2HPO_4 – 8,71 г; $NaNO_3$ – 1,7 г; 0,1 моль/л раствор Na_2SO_4 – 1 мл; 62 ммоль/л раствор $MgCl_2$ – 1 мл; 1 ммоль/л раствор $CaCl_2$ – 1 мл; 0,005 ммоль/л раствор $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ – 1 мл; раствор микроэлементов – 1 мл. pH среды доводили 1 моль/л раствором HCl до 7,0. Состав раствора микроэлементов в 1%-м водном растворе HCl, г/л: ZnO – 0,41; $FeCl_3$ – 2,9; $MnCl_2$ – 1,28; $CuCl_2$ – 0,13; $CoCl_2$ – 0,26; H_3BO_3 – 0,06.

Питательные среды стерилизовали в течение 30 мин при 121 °C.

Получение бесклеточного супернатанта. Бесклеточный супернатант получали центрифугированием культуральной жидкости на центрифуге Avanti J-30I (Beckman Coulter, США) при 9100 об/мин (10000 g) и 4 °C в течение 10 мин.

Определение поверхностного и межфазного натяжения. Поверхностное натяжение бесклеточного супернатанта определяли по методу кольца Дю Нуи с использованием тензиометра К6 (Kruss, Германия) при 25 °C. Раствором сравнения выступала дистиллированная вода (поверхностное натяжение 72 мН/м).

Межфазное натяжение определяли на границе раздела фаз (бесклеточный супернатант – гексадекан). Измерения проводили на тензиометре К6 (Kruss, Германия) при 25 °C.

Экстракция биосурфактантов из бесклеточного супернатанта. Экстракцию биосурфактантов проводили в две стадии. На первой стадии бесклеточный супернатант очищали от остатков гексадекана с использованием гексана в соотношении 1:1 (по объему). Очищенный супернатант подкисляли 5 моль/л раствором HCl до pH 3,5 и оставляли при 4 °C на ночь. На второй стадии для извлечения биосурфактантов из подкисленного супернатанта использовали трет-метилбутиловый эфир в соотношении 1:1 (по объему). Полученный органический экстракт осушали с использованием безводного $CaCl_2$ в течение 3–5 дней. Растворитель удаляли на ротационном испарителе IP-1 LT (Labtex, Россия) при 33–35 °C и 0,66–0,68 кгс/см³. Незадолго до окончания упаривания к смеси добавляли 100 мкл бензола и упаривали досуха.

Определение критической концентрации мицеллообразования. Критическую концентрацию мицеллообразования определяли как точку перегиба на кривых зависимостях поверхностного натяжения от содержания растворов биосурфактантов [37]. Для этого готовили серию растворов с содержанием биосурфактантов от 0 до 500 мг/л и измеряли поверхностное натяжение на тензиометре К6 (Kruss, Германия).

Качественная характеристика биосурфактантов методом тонкослойной хроматографии. Разделение компонентов биосурфактантов проводили на пластинах с силикагелем Sorbfil ПТСХ-АФ-А (ИМИД, Россия) с использованием подвижной фазы хлороформ:метанол:вода (65:15:2 по объему). Для определения наличия углеводов пластины обрабатывали α -нафтолом (0,25 г α -нафтола в 50 мл смеси метанола и воды (1:1 по объему)) и 10%-й серной кислотой и нагревали на плитке при 110 °C до появления интенсивной окраски. Для определения наличия липидов пластины помещали в камеру, насыщенную парами йода, до появления максимальной окраски. Для определения наличия аминокислот тонкослойную хроматографию проводили с использованием подвижной фазы изопропанол:вода (70:30 по объему). Готовые пластины окрашивали раствором нингидрина и нагревали на плитке при 110 °C до появления интенсивной окраски [26].

Исследование структуры биосурфактантов методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Инфракрасную (ИК) спектроскопию с преобразованием Фурье экстрактов биосурфактантов проводили на приборе ИнфраЛЮМ ФТ-08 («Люмэкс», Россия) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Статистическая обработка результатов. Эксперименты выполняли в трехкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения MS Excel 2016 и

SigmaPlot 2011. Данные представлены в виде среднего значения с доверительными интервалами. Рассчитаны показатели среднее $\pm$ доверительный интервал. Уровень статистической значимости $p \leq 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Штамм *G. amicalis* G2 отобран как деструктор парафинов в результате скрининга микроорганизмов, выделенных из загрязненного нефтепродуктами морского песка. В настоящей работе возможность этого штамма использовать гидрофобные источники углерода и энергии оценивали по способности роста на жидких и твердых алканах – додекане ($C_{12}H_{26}$), гексадекане ($C_{16}H_{34}$), нонадекане ($C_{19}H_{40}$) и тетракозане ($C_{24}H_{50}$) и ароматических соединениях – феноле (C_6H_5OH), нафталине ($C_{10}H_8$) и фенантрене ($C_{14}H_{10}$) (рис. 1).

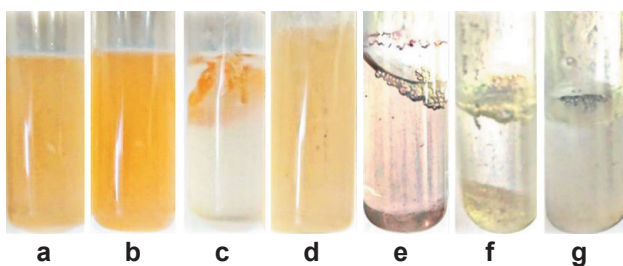


Рис. 1. Рост штамма *Gordonia amicalis* G2 на минеральной среде Эванса, содержащей 1% додекана (а), гексадекана (b), нонадекана (c), тетракозана (d), фенола (e), нафталина (f), фенантрена (g)

Fig. 1. Growth of *Gordonia amicalis* G2 strain on Evans mineral medium containing 1% dodecane (a), hexadecane (b), nonadecane (c), tetracosane (d), phenol (e), naphthalene (f), phenanthrene (g)

Рост бактериальной культуры (образование биомассы оранжевого цвета) наблюдали только на алканах – додекане, гексадекане, нонадекане, тетракозане (см. рис. 1, а–d). Следует отметить, что оранжевый цвет биомассы бактерий свидетельствует об образовании каротиноидов, что можно использовать при разработке комплексной технологии получения вторичных метаболитов. Распределение биомассы в объеме культуральной жидкости зависит от агрегатного состояния субстрата. При использовании жидких алканов рост бактериальной культуры происходит во всем объеме культуральной жидкости (см. рис. 1, а, b). В случае использования твердых алканов в качестве источника углерода и энергии наблюдается адгезия клеток к поверхности субстрата (см. рис. 1, c).

Биодеградация алканов является общей чертой для представителей данного рода [38–40]. Кроме того, при росте на углеводородах актиномицеты родов *Rhodococcus*, *Gordonia* продуцируют поверхностно-активные соединения, такие как биоэмульгаторы и биосурфактанты [41]. Мониторинг продукции биосурфактантов штаммом *G. amicalis* G2 проводили в процессе роста бактерий при периодическом культивировании с использованием гексадекана в качестве ростового субстрата. На кривой роста *G. amicalis* G2 начало стационарной фазы соответствует 100 ч культивирования (рис. 2). В этой фазе роста происходит продукция биосурфактантов, что является характерным для вторичных метаболитов.

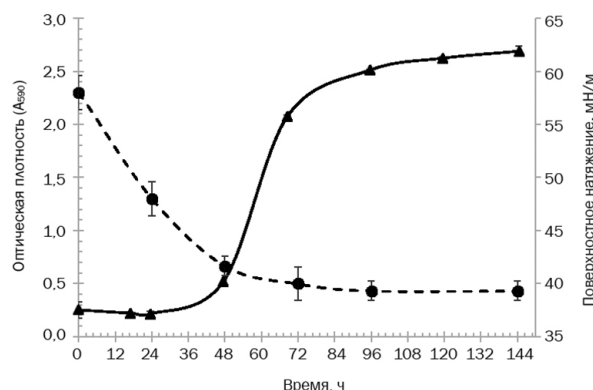


Рис. 2. Кривая роста бактерий *Gordonia amicalis* G2 в условиях периодического культивирования (сплошная линия) и зависимость поверхностного натяжения бесклеточного супернатанта от времени (пунктирная линия)

Fig. 2. Growth curve of *Gordonia amicalis* G2 bacteria under conditions of batch cultivation (solid line) and time dependence of the surface tension of the cell-free supernatant (dotted line)

В стационарной фазе роста поверхностное натяжение снижается до 39 мН/м (см. рис. 2), что свидетельствует об эффективной продукции биосурфактантов на этой стадии. Полученное значение поверхностного натяжения бесклеточного супернатанта соответствует результатам других исследований (30–40 мН/м) [42–45].

Эффективность действия продуцируемых биосурфактанов можно оценить с помощью еще одного показателя – межфазного натяжения на границе раздела фаз между бесклеточным супернатантом и гидрофобным веществом. Межфазное натяжение бесклеточного супернатанта на границе с гексадеканом снизилось с 21 мН/м в начале культивирования микроорганизмов до 2 мН/м в стационарной фазе роста, что указывает на высокую эффективность продукции поверхностно-активных веществ.

Для характеристики биосурфактантов, продуцируемых штаммом *G. amicalis* G2, проводили их выделение методом жидкостной экстракции органическими растворителями. Для этого в работе использовали однокомпонентную систему – метил-трет-бутиловый эфир. Этот растворитель менее токсичен и легче поддается биологическому разложению по сравнению с другими системами экстракции (хлороформ:метанол, этилацетат). Кроме того, применение метил-трет-бутилового эфира способствует извлечению биосурфактантов из супернатанта с высоким выходом продукта [46].

Метод тонкослойной хроматографии применили для качественной характеристики экстракта биосурфактантов. В парах йода удалось обнаружить несколько компонентов липидов с разной подвижностью (см. рис. 2, b). С помощью специфического проявителя на сахара α -нафтольного реагента обнаружили, что эти компоненты имеют гликолипидную природу (рис. 3, a). Нингидриновый тест на наличие пептидов и аминокислот дал отрицательный результат (рис. 3, c).

Известно, что актиномицеты, к которым относятся гординии, при росте на гидрофобных субстратах продуцируют биосурфактанты гликолипидной природы [42, 43, 45, 47–49], липогликан [50] и липогликопротеин [51].

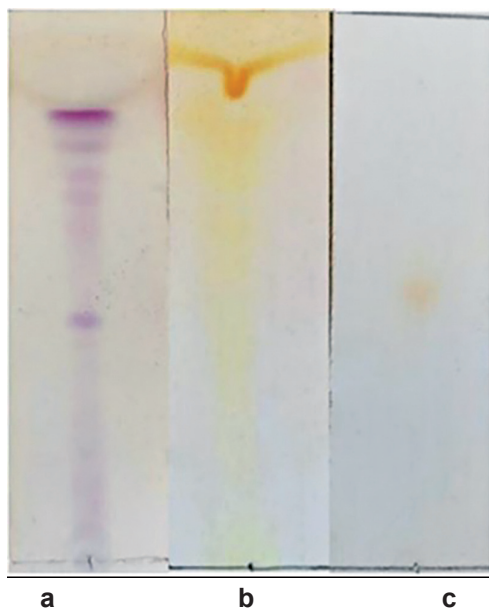


Рис. 3. Хроматограммы биосурфактанта *Gordonia amicalis* G2 при окрашивании α -нафтолом (a), йодом (b) и нингидрином (c)

Fig. 3. Chromatograms of *Gordonia amicalis* G2 biosurfactant staining with α -naphthol (a), iodine (b) and ninhydrin (c)

Тем не менее в большинстве работ показано присутствие именно гликолипидов различного строения.

Для выявления специфических функциональных групп у биосурфактантов *G. amicalis* G2 использовали ИК-спектроскопию с преобразованием Фурье (рис. 4).

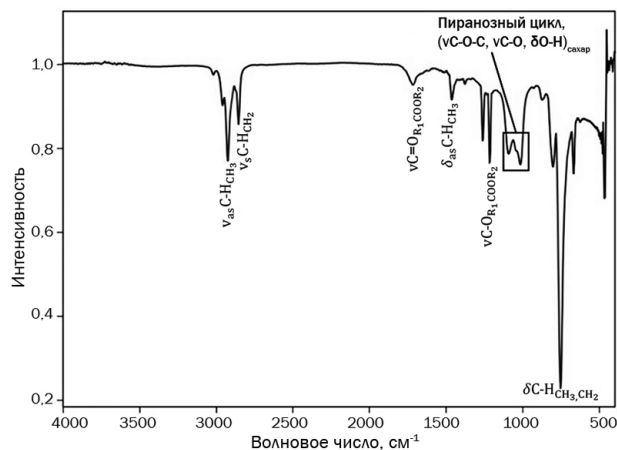


Рис. 4. Инфракрасный спектр биосурфактантов *Gordonia amicalis* G2

Fig. 4. Infrared spectrum of biosurfactants *Gordonia amicalis* G2

В ИК-спектре выявлены характеристические полосы, соответствующие колебаниям пиранозного цикла (1095, 1014 cm^{-1}), что свидетельствует о наличии остатков сахара в составе биосурфактантов. Кроме того, на спектрах присутствуют полосы поглощения, отвечающие за колебания связи $\text{C}=\text{O}$ (1714 cm^{-1}) и $\text{C}-\text{O}$ (1215 cm^{-1}) в сложных эфирах, валентные (2922, 2855 cm^{-1}) и деформационные (1462, 753 cm^{-1}) колебания связи $\text{C}-\text{H}$ в

алкильных группах жирных кислот. На основании данных ИК-спектров можно заключить, что в составе биосурфактантов содержатся остатки сахаров и жирных кислот. Ранее нашим научным коллективом было показано, что актиномицеты рода *Rhodococcus* продуцируют трегалолипиды, содержащие остатки октановой и декановой кислот. Смесь биосурфактантов представляла собой 2,3,4-сукцинил-октаноил-деcanoил-2'-деcanoилтрегалозу и 2,3,4-сукцинил-диооктаноил-2'-деcanoилтрегалозу [37]. Вероятно, соединения подобного строения могут синтезировать и гอร์ดонии.

Важной характеристикой биосурфактантов является значение критической концентрации мицеллообразования. Данный показатель продуцируемых *G. amicalis* G2 биосурфактантов определяли по точке перегиба графической зависимости поверхностного натяжения от содержания биосурфактанта. Значение критической концентрации мицеллообразования составляет 200 мг/л при постоянном поверхностном натяжении 39 мН/м (рис. 5). В работах [7, 26, 52] для биосурфактантов бактерий рода *Gordonia* значения критической концентрации мицеллообразования находится в диапазоне от 90 до 240 мг/л, что соответствует полученным нами данным. Таким образом, новый штамм *G. amicalis* G2, выделенный из загрязненного песка морского порта Вьетнама, продемонстрировал способность к эффективной продукции поверхностно-активных веществ биологического происхождения.

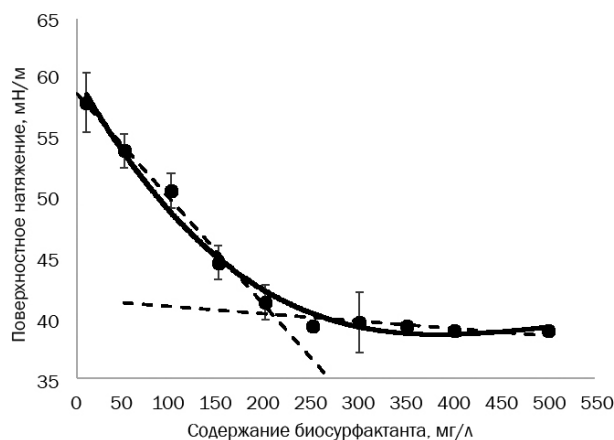


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации биосурфактанта *Gordonia amicalis* G2

Fig. 5. Surface tension versus concentration of biosurfactant *Gordonia amicalis* G2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый штамм *G. amicalis* G2 способен к использованию в качестве единственного источника углерода и энергии алканов как в жидком, так и в твердом агрегатном состоянии. При периодическом культивировании с использованием гексадекана в качестве ростового субстрата в стационарной фазе роста происходила продукция биосурфактантов. Эффективность действия продуцируемых биосурфактантов оценили с помощью поверхностного и межфазного натяжения. Поверхностное натяжение снижалось до 39 мН/м, межфазное натяжение – до 2 мН/м. Специфические

функциональные группы у биосурфактантов *G. amicalis* G2 выявлены с использованием ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. В ИК-спектре присутствуют характеристические полосы, соответствующие колебаниям пиранозного цикла, что свидетельствует о наличии остатков сахара в составе биосурфактантов. Кроме того, выявлены полосы поглощения, отвечающие за колебания связей C=O и C-O в сложных эфирах, валентные и деформационные колебания связи C-H в алкильных группах жирных кислот. Таким образом, в

составе биосурфактантов содержатся остатки сахаров и жирных кислот. Для характеристики биосурфактантов определяли критическую концентрацию мицеллообразования по точке перегиба на кривых зависимостей поверхностного натяжения от содержания биосурфактанта. Значение данного показателя составило 200 мг/л при постоянном поверхностном натяжении 39 мН/м. Выделенные биосурфактанты гликолипидной природы будут использованы при изучении их солюбилизирующей способности в отношении гидрофобных соединений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kim Y.S., Roh S.G., Kim S.B. *Gordonia insulae* sp. nov., isolated from an island soil // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2020. Vol. 70, no. 3. P. 2079–2083. DOI: 10.1099/ijsem.0.004023.
2. Mai Z., Wang L., Li Q., Sun Y., Zhang S. Biodegradation and metabolic pathway of phenanthrene by a newly isolated bacterium *Gordonia* sp. SCSIO19801 // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2021. Vol. 585. P. 42–47. DOI: 10.1016/j.bbrc.2021.10.069.
3. Riesco R., Rose J.J.A., Batinovic S., Petrovski S., Sánchez-Juanes F., Seviour R.J., et al. *Gordonia pseudamarae* sp. nov., a home for novel actinobacteria isolated from stable foams on activated sludge wastewater treatment plants // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2022. Vol. 72, no. 10. P. 005547. DOI: 10.1099/ijsem.0.005547.
4. Sowani H., Kulkarni M., Zinjard S. An insight into the ecology, diversity and adaptations of *Gordonia* species // Critical Reviews in Microbiology. 2018. Vol. 44, no. 4. P. 393–413. DOI: 10.1080/1040841X.2017.1418286.
5. Kim H.-S., Dong K., Kim J., Lee S.-S. Characteristics of crude oil-degrading bacteria *Gordonia iterans* isolated from marine coastal in Taean sediment // MicrobiologyOpen. 2019. Vol. 8, no. 6. P. e00754. DOI: 10.1002/mbo3.754.
6. Silva N.M., de Oliveira A.M.S.A., Pegorin S., Giusti C.E., Ferrari V.B., Barbosa D., et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia sihwensis* strains isolated from composting // PLOS One. 2019. Vol. 14, no. 4. P. e0215396. DOI: 10.1371/journal.pone.0215396.
7. Kurniati T.H., Rusmana I., Suryani A., Mubarik N.R. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene by biosurfactant-producing bacteria *Gordonia cholesterolivorans* AMP 10 // Biosaintifika: Journal of Biology and Biology Education. 2016. Vol. 8, no. 3. P. 336–343. DOI: 10.15294/biosaintifika.v8i3.6448.
8. Zhang H., Lin Z., Liu B., Wang G., Weng L., Zhou J., et al. Bioremediation of di-(2-ethylhexyl) phthalate contaminated red soil by *Gordonia terrae* RL-JC02: characterization, metabolic pathway and kinetics // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 733. P. 139138. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139138.
9. Kumar V., Bhalla T.C. Transformation of *p*-hydroxybenzotriazole to *p*-hydroxybenzoic acid using nitrilase activity of *Gordonia terrae* // Biocatalysis and Biotransformation. 2013. Vol. 31, no. 1. P. 42–48. DOI: 10.3109/10242422.2012.757761.
10. Guo Y., Huang Y., Pang S., Zhou T., Lin Z., Yu H., et al. Novel mechanism and kinetics of tetramethrin degradation using an indigenous *Gordonia cholesterolivorans* A16 // International Journal of Molecular Sciences. 2021. Vol. 22, no. 17. P. 9242. DOI: 10.3390/ijms22179242.
11. Nahurira R., Wang J., Yan Y., Jia Y., Fan S., Khokhar I., et al. In silico genome analysis reveals the metabolic versatility and biotechnology potential of a halotolerant phthalic acid esters degrading *Gordonia alkanivorans* strain YC-RL₂ // AMB Express. 2019. Vol. 9. P. 1–13. DOI: 10.1186/s13568-019-0733-5.
12. Kim K.K., Lee K.C., Klenk H.-P., Oh H.-M., Lee J.-S. *Gordonia kroppenstedtii* sp. nov., a phenol-degrading actinomycete isolated from a polluted stream // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2009. Vol. 59, no. 8. P. 1992–1996. DOI: 10.1099/ijms.0.005322-0.
13. Stobdan T., Sinha A., Singh R.P., Adhikari D.K. Degradation of pyridine and 4-methylpyridine by *Gordonia terreus* IIPN1 // Biodegradation. 2008. Vol. 19. P. 481–487. DOI: 10.1007/s10532-007-9152-4.
14. Drzyzga O., de las Heras L.F., Morales V., Navarro Llorens J.M., Perera J. Cholesterol degradation by *Gordonia cholesterolivorans* // Applied and Environmental Microbiology. 2011. Vol. 77, no. 14. P. 4802–4810. DOI: 10.1128/AEM.05149-11.
15. Liu N., Maser E., Zhang T. Genomic analysis of *Gordonia polyisoprenivorans* strain R9, a highly effective 17 beta-estradiol-and steroid-degrading bacterium // Chemical-Biological Interactions. 2021. Vol. 350. P. 109685. DOI: 10.1016/j.cbi.2021.109685.
16. Arenskötter M., Baumeister D., Berekaa M.M., Pötter G., Kroppenstedt R.M., Linos A., et al. Taxonomic characterization of two rubber degrading bacteria belonging to the species *Gordonia polyisoprenivorans* and analysis of hyper variable regions of 16S rDNA sequences // FEMS Microbiology Letters. 2001. Vol. 205, no. 2. P. 277–282. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2001.tb10961.x.
17. Deegan Y., Kocharovskaya Y., Frantsuzova E., Streletskii R., Vetrova A. Characterization and genomic analysis of *Gordonia alkanivorans* 135, a promising dibenzothiophene-degrading strain // Biotechnology Reports. 2021. Vol. 29. P. e00591. DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00591.
18. Ahmad V., Ahmad A., Khan M.I., Baothman O.A.S., Khan M.J. Desulfurization of benzothiophene by an isolated *Gordonia* sp. IITR100 // Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences. 2021. Vol. 10, no. 5. P. e2787. DOI: 10.15414/jmbfs.2787.
19. Ma Y., Xu M., Liu H., Yu T., Guo P., Liu W., et al. Antimicrobial compounds were isolated from the secondary metabolites of *Gordonia*, a resident of intestinal tract of *Periplaneta americana* // AMB Express. 2021. Vol. 11. P. 1–11. DOI: 10.1186/s13568-021-01272-y.
20. Sánchez-Suárez J., Díaz L., Coy-Barrera E., Villamil L. Specialized metabolism of *Gordonia* genus: an integrated survey on chemodiversity combined with a comparative genomics-based analysis // BioTech. 2022. Vol. 11, no. 4.

P. 53. DOI: 10.3390/biotech11040053.

21. Schwabe R., Senges C.H.R., Bandow J.E., Heine T., Lehmann H., Wiche O., et al. Cultivation dependent formation of siderophores by *Gordonia rubripertincta* CWB2 // Microbiological Research. 2020. Vol. 238. P. 126481. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126481.

22. Schneider K., Graf E., Irran E., Nicholson G., Stainsby F.M., Goodfellow M., et al. Bendigoles A~C, new steroids from *Gordonia australis* Acta 2299 // The Journal of Antibiotics. 2008. Vol. 61, no. 6. P. 356–364. DOI: 10.1038/ja.2008.50.

23. Wang J., He M., Zeng H., Liu W., Luo X., Ma Y., et al. A cytotoxic triterpenoid from a *Periplaneta americana*-derived, *Gordonia hongkongensis* WA12-1-1 // FEMS Microbiology Letters. 2022. Vol. 369, no. 1. P. fnac121. DOI: 10.1093/femsle/fnac121.

24. Loh W.L.C., Huang K.-C., Ng H.S., Lan J.C.-W. Exploring the fermentation characteristics of a newly isolated marine bacteria strain, *Gordonia terrae* TWRH01 for carotenoids production // Journal of Bioscience and Bioengineering. 2020. Vol. 130, no. 2. P. 187–194. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2020.03.007.

25. Liu W., Xing X., Dong Q., Liu X., Li W. Isolation and identification of the alga-symbiotic bacterium *Gordonia* and characterization of its exopolysaccharide // Natural Product Research. 2024. Vol. 38, no. 3. P. 523–529. DOI: 10.1080/14786419.2022.2123477.

26. Zargar A.N., Mishra S., Kumar M., Srivastava P. Isolation and chemical characterization of the biosurfactant produced by *Gordonia* sp. IITR100 // PLOS One. 2022. Vol. 17, no. 4. P. e0264202. DOI: 10.1371/journal.pone.0264202.

27. Абашева М.А., Хоравиди Е.Х., Акатова Е.В., Нечаева И.А., Бабкина Е.Е., Пономарева О.Н. Влияние физико-химических факторов окружающей среды на поверхностные свойства продуцируемых штаммом *Rhodococcus erythropolis* X5 биосурфактантов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2023. N 4. С. 28–37. DOI: 10.24412/2071-6176-2023-4-28-37. EDN: AFLD4A.

28. Soberón-Chávez G., Maier R.M. Biosurfactants: a general overview // Biosurfactants: from genes to applications / ed. G. Soberón-Chávez. Berlin: Springer-Verlag, 2011. P. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-642-14490-5_1.

29. Пат. № 2673747, Российская Федерация, МПК C12N 1/20, C09K 8/582, C12R 1/01. Штамм *Gordonia amicalis*, способный к генерации непосредственно в нефтяном пласте нефтевытесняющего агента – биоПАВ и снижающий содержание сероорганических соединений нефти / И.А. Борзенков, Д.Ш. Соколова, Т.Н. Назина, Т.Л. Бабич, Е.М. Семенова, А.П. Ершов [и др.]. Заявл. 29.11.2018; опубл. 29.11.2018. Бюл. № 34.

30. Hao D.-H., Lin J.-Q., Song X., Lin J.-Q., Su Y.-J., Qu Y.-B. Isolation, identification, and performance studies of a novel paraffin-degrading bacterium of *Gordonia amicalis* LH3 // Biotechnology and Bioengineering. 2008. Vol. 13, no. 1. P. 61–68. DOI: 10.1007/s12257-007-0168-8.

31. Datta D., Ghosh S., Kumar S., Gangola S., Majumdar B., Saha R., Mazumdar S.P., et al. Microbial biosurfactants: multifarious applications in sustainable agriculture // Microbiological Research. 2024. Vol. 279. P. 127551. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127551.

32. Karnwal A., Shrivastava S., Al-Tawaha A.R.M.S.,

Kumar G., Singh R., Kumar A., et al. Microbial biosurfactant as an alternate to chemical surfactants for application in cosmetics industries in personal and skin care products: a critical review // BioMed Research International. 2023. P. 2375223. DOI: 10.1155/2023/2375223.

33. Ceresa C., Fracchia L., Sansotera A.C., de Rienzo M.A.D., Banat I.M. Harnessing the potential of biosurfactants for biomedical and pharmaceutical applications // Pharmaceutics. 2023. Vol. 15, no. 8. P. 2156. DOI: 10.3390/pharmaceutics15082156.

34. Roy A., Khan M.R., Mukherjee A.K. Recent advances in the application of microbial biosurfactants in food industries: opportunities and challenges // Food Control. 2024. Vol. 163. P. 110465. DOI: 10.1016/j.foodcont.2024.110465.

35. Shaikhah D., Loise V., Angelico R., Porto M., Calandra P., Abe A.A., et al. New trends in biosurfactants: from renewable origin to green enhanced oil recovery applications // Molecules. 2024. Vol. 29, no. 2. P. 301. DOI: 10.3390/molecules29020301.

36. Miao Y., To M.H., Siddiqui M.A., Wang H., Lodens S., Chopra S.S., et al. Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock – recent advances, process optimization and perspectives // Frontiers in Chemistry. 2024. Vol. 12. P. 1327113. DOI: 10.3389/fchem.2024.1327113.

37. Льюнг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., Филонов А.Е., Пономарева О.Н. Структура и физико-химические свойства гликолипидных биосурфактантов, продуцируемых бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 2. С. 72–79. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79. EDN: YTPLSH.

38. Ehiosun K.I., Godin S., Urios L., Lobinski R., Grimaud R. Degradation of long-chain alkanes through biofilm formation by bacteria isolated from oil-polluted soil // International Biodeterioration & Biodegradation. 2022. Vol. 175. P. 105508. DOI: 10.1016/j.ibiod.2022.105508.

39. Ivanova A.E., Borzenkov I.A., Sokolova D.Sh. Catabolic potential and surfactant activity of halotolerant hydrocarbon-oxidizing bacteria // Microbiology. 2021. Vol. 90. P. 405–415. DOI: 10.1134/S0026261721040056.

40. Liu Y., Wu J., Liu Y., Wu X. Biological process of alkane degradation by *Gordonia sihwaniensis* // ACS Omega. 2021. Vol. 7, no. 1. P. 55–63. DOI: 10.1021/acsomega.1c01708.

41. Stainsby F.M., Hodar J., Vaughan H. Biosurfactant production by mycolic acid-containing Actinobacteria // Actinobacteria – diversity, applications and medical aspects / ed. W.N. Hozzein. 2022. P. 1835–2131. DOI: 10.5772/intechopen.104576.

42. Kumar R., Das A.J. Extraction, detection, and characterization of rhamnolipid biosurfactants from microorganisms // Rhamnolipid biosurfactant: recent trends in production and application / eds R. Kumar, A.J. Das. Singapore: Springer, 2018. P. 15–28. DOI: 10.1007/978-981-13-1289-2_2.

43. Pardhi D.S., Panchal R.R., Raval V.H., Joshi R.G., Poczai P., Almalki W.H., et al. Microbial surfactants: a journey from fundamentals to recent advances // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. P. 982603. DOI: 10.3389/fmicb.2022.982603.

44. Elshikh M., Moya-Ramírez I., Moens H., Roelants S., Soetaert W., Marchant R., et al. Rhamnolipids and lantibiotics: natural antimicrobial surfactants for oral hygiene // Journal of Applied Microbiology. 2017.

Vol. 123, no. 5. P. 1111–1123. DOI: 10.1111/jam.13550.

45. Sowani H., Deshpande A., Gupta V., Kulkarni M., Zinjarde S. Biodegradation of squalene and n-hexadecane by *Gordonia amicalis* HS-11 with concomitant formation of biosurfactant and carotenoid // International Biodeterioration & Biodegradation. 2019. Vol. 142. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.05.005.

46. Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Philp J.C., Christofi N., Dunban S.A., Ritchkova M.I. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl tertiary-butyl ether extraction // Journal of Microbiological Methods. 2001. Vol. 46, no. 2. P. 149–156. DOI: 10.1016/S0167-7012(01)00259-7.

47. Laorrattanasak S., Rongsayamanont W., Khondee N., Paorach N., Soonglerdsongpha S., Pinyakong O., et al. Production and application of *Gordonia westfalica* GY40 biosurfactant for remediation of fuel oil spill // Water, Air, and Soil Pollution. 2016. Vol. 227, no. 9. P. 325. DOI: 10.1007/s11270-016-3031-8.

48. Delegan Y., Sargsyan A., Hovhannisyan N., Babayan B., Petrikov K., Vainstein M. Analysis of genome sequence and trehalose lipid production peculiarities of the thermotolerant *Gordonia* strain // Journal of Basic

Microbiology. 2020. Vol. 60, no. 1. P. 14–21. DOI: 10.1002/jobm.201900439.

49. Janek T., Rodrigues L.R., Gudiña E.J., Czyżnikowska Z. Structure and mode of action of cyclic lipopeptide pseudofactin II with divalent metal ions // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2016. Vol. 146. P. 498–506. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.06.055.

50. Garton N.J., Sutcliffe I.C. Identification of a lipoarabinomannan-like lipoglycan in the actinomycete *Gordonia bronchialis* // Archives of Microbiology. 2006. Vol. 184, no. 6. P. 425–427. DOI: 10.1007/s00203-005-0050-z.

51. Silva T.P., Paixão S.M., Tavares J., Gil C.V., Torres C.A.V., Freitas F., et al. A new biosurfactant/bioemulsifier from *Gordonia alkanivorans* strain 1B: production and characterization // Processes. 2022. Vol. 10, no. 5. P. 845. DOI: 10.3390/pr10050845.

52. Franzetti A., Caredda P., La Colla P., Pintus M., Tamburini E., Papacchini M., et al. Cultural factors affecting biosurfactant production by *Gordonia* sp. BS29 // International Biodeterioration & Biodegradation. 2009. Vol. 63, no. 7. P. 943–947. DOI: 10.1016/j.ibiod.2009.06.001.

REFERENCES

1. Kim Y.S., Roh S.G., Kim S.B. *Gordonia insulae* sp. nov., isolated from an island soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2020;70(3):2079–2083. DOI: 10.1099/ijsem.0.004023.

2. Mai Z., Wang L., Li Q., Sun Y., Zhang S. Biodegradation and metabolic pathway of phenanthrene by a newly isolated bacterium *Gordonia* sp. SCSIO19801. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2021;585:42–47. DOI: 10.1016/j.bbrc.2021.10.069.

3. Riesco R., Rose J.J.A., Batinovic S., Petrovski S., Sánchez-Juanes F., Seviour R.J., et al. *Gordonia pseudamarae* sp. nov., a home for novel actinobacteria isolated from stable foams on activated sludge wastewater treatment plants. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2022;72(10):005547. DOI: 10.1099/ijsem.0.005547.

4. Sowani H., Kulkarni M., Zinjarde S. An insight into the ecology, diversity and adaptations of *Gordonia* species. *Critical Reviews in Microbiology*. 2018;44(4):393–413. DOI: 10.1080/1040841X.2017.1418286.

5. Kim H.-S., Dong K., Kim J., Lee S.-S. Characteristics of crude oil-degrading bacteria *Gordonia iterans* isolated from marine coastal in Taean sediment. *MicrobiologyOpen*. 2019;8(6):e00754. DOI: 10.1002/mbo3.754.

6. Silva N.M., de Oliveira A.M.S.A., Pegorin S., Giusti C.E., Ferrari V.B., Barbosa D., et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia sihwensis* strains isolated from composting. *PLOS One*. 2019;14(4):e0215396. DOI: 10.1371/journal.pone.0215396.

7. Kurniati T.H., Rusmana I., Suryani A., Mubarik N.R. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene by biosurfactant-producing bacteria *Gordonia cholesterolivorans* AMP 10. *Biosaintifika: Journal of Biology and Biology Education*. 2016;8(3):336–343. DOI: 10.15294/biosaintifika.v8i3.6448.

8. Zhang H., Lin Z., Liu B., Wang G., Weng L., Zhou J., et al. Bioremediation of di-(2-ethylhexyl) phthalate contaminated red soil by *Gordonia terrae* RL-JC02: charac-

terization, metabolic pathway and kinetics. *Science of the Total Environment*. 2020;733:139138. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139138.

9. Kumar V., Bhalla T.C. Transformation of *p*-hydroxybenzonitrile to *p*-hydroxybenzoic acid using nitrilase activity of *Gordonia terrae*. *Biocatalysis and Biotransformation*. 2013;31(1):42–48. DOI: 10.3109/10242422.2012.757761.

10. Guo Y., Huang Y., Pang S., Zhou T., Lin Z., Yu H., et al. Novel mechanism and kinetics of tetramethrin degradation using an indigenous *Gordonia cholesterolivorans* A16. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(17):9242. DOI: 10.3390/ijms22179242.

11. Nahurira R., Wang J., Yan Y., Jia Y., Fan S., Khokhar I., et al. In silico genome analysis reveals the metabolic versatility and biotechnology potential of a halotolerant phthalic acid esters degrading *Gordonia alkanivorans* strain YC-RL₂. *AMB Express*. 2019;9:1–13. DOI: 10.1186/s13568-019-0733-5.

12. Kim K.K., Lee K.C., Klenk H.-P., Oh H.-M., Lee J.-S. *Gordonia kroppenstedtii* sp. nov., a phenol-degrading actinomycete isolated from a polluted stream. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2009;59(8):1992–1996. DOI: 10.1099/ijms.0.005322-0.

13. Stobdan T., Sinha A., Singh R.P., Adhikari D.K. Degradation of pyridine and 4-methylpyridine by *Gordonia terrae* IIPN1. *Biodegradation*. 2008;19:481–487. DOI: 10.1007/s10532-007-9152-4.

14. Drzyzga O., de las Heras L.F., Morales V., Navarro Llorens J.M., Perera J. Cholesterol degradation by *Gordonia cholesterolivorans*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011;77(14):4802–4810. DOI: 10.1128/AEM.05149-11.

15. Liu N., Maser E., Zhang T. Genomic analysis of *Gordonia polyisoprenivorans* strain R9, a highly effective 17 beta-estradiol-and steroid-degrading bacterium. *Chemico-Biological Interactions*. 2021;350:109685. DOI: 10.1016/j.cbi.2021.109685.

16. Arenskötter M., Baumeister D., Berekaa M.M., Pötter G., Kroppenstedt R.M., Linos A., et al. Taxonomic

characterization of two rubber degrading bacteria belonging to the species *Gordonia polyisoprenivorans* and analysis of hyper variable regions of 16S rDNA sequences. *FEMS Microbiology Letters*. 2001;205(2):277-282. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2001.tb10961.x.

17. Delegan Y., Kocharovskaya Y., Frantsuzova E., Streletskii R., Vetrova A. Characterization and genomic analysis of *Gordonia alkanivorans* 135, a promising dibenzothiophene-degrading strain. *Biotechnology Reports*. 2021;29:e00591. DOI: 10.1016/j.btre.2021.e00591.

18. Ahmad V., Ahmad A., Khan M.I., Baothman O.A.S., Khan M.J. Desulfurization of benzothiophene by an isolated *Gordonia* sp. IITR100. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2021;10(5):e2787. DOI: 10.15414/jmbfs.2787.

19. Ma Y., Xu M., Liu H., Yu T., Guo P., Liu W., et al. Antimicrobial compounds were isolated from the secondary metabolites of *Gordonia*, a resident of intestinal tract of *Periplaneta Americana*. *AMB Express*. 2021;11:1-11. DOI: 10.1186/s13568-021-01272-y.

20. Sánchez-Suárez J., Diaz L., Coy-Barrera E. Villamil L. Specialized metabolism of *Gordonia* genus: an integrated survey on chemodiversity combined with a comparative genomics-based analysis. *BioTech*. 2022;11(4):53. DOI: 10.3390/biotech11040053.

21. Schwabe R., Senges C.H.R., Bandow J.E., Heine T., Lehmann H., Wiche O., et al. Cultivation dependent formation of siderophores by *Gordonia rubripertincta* CWB2. *Microbiological Research*. 2020;238:126481. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126481.

22. Schneider K., Graf E., Irran E., Nicholson G., Stainsby F.M., Goodfellow M., et al. Bendigoles A~C, new steroids from *Gordonia australis* Acta 2299. *The Journal of Antibiotics*. 2008;61(6):356-364. DOI: 10.1038/ja.2008.50.

23. Wang J., He M., Zeng H., Liu W., Luo X., Ma Y., et al. A cytotoxic triterpenoid from a *Periplaneta americana*-derived, *Gordonia hongkongensis* WA12-1-1. *FEMS Microbiology Letters*. 2022;369(1):fnac121. DOI: 10.1093/femsle/fnac121.

24. Loh W.L.C., Huang K.-C., Ng H.S., Lan J.C.-W. Exploring the fermentation characteristics of a newly isolated marine bacteria strain, *Gordonia terrae* TWRH01 for carotenoids production. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2020;130(2):187-194. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2020.03.007.

25. Liu W., Xing X., Dong Q., Liu X., Li W. Isolation and identification of the alga-symbiotic bacterium *Gordonia* and characterization of its exopolysaccharide. *Natural Product Research*. 2024;38(3):523-529. DOI: 10.1080/14786419.2022.2123477.

26. Zargar A.N., Mishra S., Kumar M., Srivastava P. Isolation and chemical characterization of the biosurfactant produced by *Gordonia* sp. IITR100. *PLOS One*. 2022;17(4):e0264202. DOI: 10.1371/journal.pone.0264202.

27. Abashcheva M.A., Horavidi E.X., Akatova E.V., Nechaeva I.A., Babkina E.E., Ponamareva O.N. Influence of physico-chemical environmental factors on the surface properties of biosurfactant produced by the strain *Rhodococcus erythropolis* X5. *Izvestiya Tula State University*. 2023;4:28-37 (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6176-2023-4-28-37. EDN: AFLFDA.

28. Soberón-Chávez G., Maier R.M. Biosurfactants: a general overview. In: Soberón-Chávez G. (ed.). *Biosurfac-*

tants: from genes to applications. Berlin: Springer-Verlag; 2011, p. 1-11. DOI: 10.1007/978-3-642-14490-5_1.

29. Borzenkov I.A., Sokolova D.Sh., Nazina T.N., Babich T.L., Semenova E.M., Ershov A.P., et al. *Gordonia amicalis* strain with ability of generation directly in oil reservoir of oil-displacing agent - bioPAV and decreasing content of organosulfur compounds of oil. Patent RF, no. 2673747; 2018.

30. Hao D.-H. Lin J.-Q., Song X., Lin. J.-Q., Su Y.-J., Qu Y.-B. Isolation, identification, and performance studies of a novel paraffin-degrading bacterium of *Gordonia amicalis* LH3. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2008;13(1):61-68. DOI: 10.1007/s12257-007-0168-8.

31. Datta D., Ghosh S., Kumar S., Gangola S., Majumdar B., Saha R., Mazumdar S.P., et al. Microbial biosurfactants: multifarious applications in sustainable agriculture. *Microbiological Research*. 2024;279:127551. DOI: 10.1016/j.micres.2023.127551.

32. Karnwal A., Shrivastava S., Al-Tawaha A.R.M.S., Kumar G., Singh R., Kumar A., et al. Microbial biosurfactant as an alternate to chemical surfactants for application in cosmetics industries in personal and skin care products: a critical review. *BioMed Research International*. 2023;2375223. DOI: 10.1155/2023/2375223.

33. Ceresa C., Fracchia L., Sansotera A.C., de Rienzo M.A.D., Banat I.M. Harnessing the potential of biosurfactants for biomedical and pharmaceutical applications. *Pharmaceutics*. 2023;15(8):2156. DOI: 10.3390/pharmaceutics15082156.

34. Roy A., Khan M.R., Mukherjee A.K. Recent advances in the application of microbial biosurfactants in food industries: opportunities and challenges. *Food Control*. 2024;163:110465. DOI: 10.1016/j.foodcont.2024.110465.

35. Shaikhah D., Loise V., Angelico R., Porto M., Calandra P., Abe A.A., et al. New trends in biosurfactants: from renewable origin to green enhanced oil recovery applications. *Molecules*. 2024;29(2):301. DOI: 10.3390/molecules29020301.

36. Miao Y., To M.H., Siddiqui M.A., Wang H., Lodens S., Chopra S.S., et al. Sustainable biosurfactant production from secondary feedstock – recent advances, process optimization and perspectives. *Frontiers in Chemistry*. 2024;12:1327113. DOI: 10.3389/fchem.2024.1327113.

37. Luong T.M., Nechaeva I.A., Petrikov K.V., Filonov A.E., Ponamareva O.N. Structure and physicochemical properties of glycolipid biosurfactants, produced by oil-degrading bacteria *Rhodococcus* sp. X5. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(2):72-79. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79. EDN: YTPLSH.

38. Ehiosun K.I., Godin S., Urios L., Lobinski R., Grimaud R. Degradation of long-chain alkanes through biofilm formation by bacteria isolated from oil-polluted soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2022;175:105508. DOI: 10.1016/j.ibiod.2022.105508.

39. Ivanova A.E., Borzenkov I.A., Sokolova D.Sh. Catabolic potential and surfactant activity of halotolerant hydrocarbon-oxidizing bacteria. *Microbiology*. 2021;90:405-415. DOI: 10.1134/S0026261721040056.

40. Liu Y., Wu J., Liu Y., Wu X. Biological process of alkane degradation by *Gordonia sihwaniensis*. *ACS Omega*. 2021;7(1):55-63. DOI: 10.1021/acsomega.1c01708.

41. Stainsby F.M., Hodar J., Vaughan H. Biosurfactant production by mycolic acid-containing Actinobacteria. In: Hozzein W.N. (ed.). *Actinobacteria – diversity, applications*

and medical aspects. 2022, p. 1835-2131. DOI: 10.5772/intechopen.104576.

42. Kumar R., Das A.J. Extraction, detection, and characterization of rhamnolipid biosurfactants from microorganisms. In: Kumar R., Das A.J. (eds). *Rhamnolipid biosurfactant: recent trends in production and application*. Singapore: Springer; 2018, p. 15-28. DOI: 10.1007/978-981-13-1289-2_2.

43. Pardhi D.S., Panchal R.R., Raval V.H., Joshi R.G., Pocai P., Almalki W.H., et al. Microbial surfactants: a journey from fundamentals to recent advances. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:982603. DOI: 10.3389/fmicb.2022.982603.

44. Elshikh M., Moya-Ramírez I., Moens H., Roelants S., Soetaert W., Marchant R., et al. Rhamnolipids and lactonicsophorolipids: natural antimicrobial surfactants for oral hygiene. *Journal of Applied Microbiology*. 2017;123(5):1111-1123. DOI: 10.1111/jam.13550.

45. Sowani H., Deshpande A., Gupta V., Kulkarni M., Zinjarde S. Biodegradation of squalene and n-hexadecane by *Gordonia amicalis* HS-11 with concomitant formation of biosurfactant and carotenoid. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2019;142:172-181. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.05.005.

46. Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Philp J.C., Christofi N., Dunbar S.A., Ritchkova M.I. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl tertiary-butyl ether extraction. *Journal of Microbiological Methods*. 2001;46(2):149-156. DOI: 10.1016/S0167-7012(01)00259-7.

47. Laorrattanasak S., Rongsayamanont W., Khondee N., Paorach N., Soonglerdsongpha S., Pinyakong O., et al. Production and application of *Gordonia westfalica* GY40 biosurfactant for remediation of fuel oil spill. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2016;227(9):325. DOI: 10.1007/s11270-016-3031-8.

48. Deegan Y., Sargsyan A., Hovhannisyan N., Babayan B., Petrikov K., Vainstein M. Analysis of genome sequence and trehalose lipid production peculiarities of the thermotolerant *Gordonia* strain. *Journal of Basic Microbiology*. 2020;60(1):14-21. DOI: 10.1002/jobm.201900439.

49. Janek T., Rodrigues L.R., Gudiña E.J., Czyżnikowska Z. Structure and mode of action of cyclic lipopeptide pseudofactin II with divalent metal ions. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2016;146:498-506. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.06.055.

50. Garton N.J., Sutcliffe I.C. Identification of a lipoarabinomannan-like lipoglycan in the actinomycete *Gordonia bronchialis*. *Archives of Microbiology*. 2006;184(6):425-427. DOI: 10.1007/s00203-005-0050-z.

51. Silva T.P., Paixão S.M., Tavares J., Gil C.V., Torres C.A.V., Freitas F., et al. A new biosurfactant/bioemulsifier from *Gordonia alkanivorans* strain 1B: production and characterization. *Processes*. 2022;10(5):845. DOI: 10.3390/pr10050845.

52. Franzetti A., Careda P., La Colla P., Pintus M., Tamburini E., Papacchini M., et al. Cultural factors affecting biosurfactant production by *Gordonia* sp. BS29. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2009;63(7):943-947. DOI: 10.1016/j.ibiod.2009.06.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нечаева Ирина Александровна,
к.б.н., доцент, доцент,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
✉ nechaeva1902@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2736-080X>

Осина Анна Николаевна,
магистрант,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
anya.osina2017@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2661-1145>

Филиппова Анастасия Сергеевна,
младший научный сотрудник,
Научно-исследовательский
центр «БиоХимТех»,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
stasya.filippova.01@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-6883-1543>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina A. Nechaeva,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Associate Professor,
Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
✉ nechaeva1902@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2736-080X>

Anna N. Osina,
Master's Student,
Tula State University
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
anya.osina2017@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-2661-1145>

Anastasia S. Filippova,
Junior Researcher,
BioChemTech Centre,
Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
stasya.filippova.01@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-6883-1543>

Нам Нгуен Ван Тхань,
магистр, научный сотрудник,
Южное отделение Совместного
Российско-Вьетнамского Тропического
научно-исследовательского
и технологического центра,
740300, г. Хо Ши Мин, ул. Третьего Февраля,
район 10, Вьетнам,
xungcavn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0091-5369>

Nguyen V.T. Nam,
Master's Student, Researcher,
Southern Branch of Joint Vietnam-Russia
Tropical Science and Technology
Research Center,
3, 3 Thang 2 St., Distr. 10, 740300,
Ho Chi Minh City, Vietnam,
xungcavn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0091-5369>

Мо Лыонг Тхи,
к.х.н., заведующий лабораторией,
Южное отделение Совместного
Российско-Вьетнамского Тропического
научно-исследовательского
и технологического центра,
740300, г. Хо Ши Мин, ул. Третьего Февраля,
район 10, Вьетнам,
luongmo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6035-5933>

Luong T. Mo,
Cand. Sci. (Chemistry), Head of the Laboratory,
Southern Branch of Joint Vietnam-Russia
Tropical Science and Technology
Research Center,
3, 3 Thang 2 St., Distr. 10, 740300,
Ho Chi Minh City, Vietnam,
luongmo@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6035-5933>

Вклад авторов

И.А. Нечаева – научное руководство,
написание черновика рукописи.
А.Н. Осина – проведение исследования.
А.С. Филиппова – визуализация.
Н.В.Т. Нам – проведение исследования.
Л.Т. Мо – предоставление ресурсов,
редактирование рукописи.

Contribution of the authors

Irina A. Nechaeva – supervision,
writing – original draft.
Anna N. Osina – investigation.
Anastasia S. Filippova – visualization.
Nguyen V.T. Nam – investigation.
Luong T. Mo – resources, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 31.10.2024.
Одобрена после рецензирования 05.12.2024.
Принята к публикации 31.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 31.10.2024..
Approved after reviewing 05.12.2024.
Accepted for publication 31.05.2025.