

ФИЗИКО ХИМИЧЕСКАЯ И ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ / PHYSICO-CHEMICAL AND GENERAL BIOLOGY

Оригинальная статья / Original article

УДК 579.222; 579.6

DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79

СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИКОЛИПИДНЫХ БИОСУРФАКТАНТОВ, ПРОДУЦИРУЕМЫХ БАКТЕРИЯМИ-НЕФТЕДЕСТРУКТОРАМИ *RHODOCOCCLUS SP. X5*

© Т.М. Лыонг*, И.А. Нечаева*, К.В. Петриков**, А.Е. Филонов**,
О.Н. Понаморева*

*Тульский государственный университет,
Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

**Институт физиологии и биохимии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН,
Российская Федерация, 142290, г. Пущино, проспект Науки, д. 5.

Показано, что основными биосурфактантами, продуцируемыми Rhodococcus sp. X5 при росте на n-гексадекане, являются сукциноилтетраэфиромы трегалозы. Структурная характеристика трегалолипидов была проведена методами tandemной масс-спектрометрии и ГС-МС. Сукциноил-трегалолипиды, образуемые Rhodococcus sp. X5, обладают высокой поверхностной (27 мН/м) и эмульгирующей активностью ($E_{24} = 55\%$). Биосурфактанты охарактеризованы по следующим физико-химическим показателям – минимальное значение поверхностного натяжения (27 мН/м), критическая концентрация мицеллообразования ($4,1 \cdot 10^{-5}$ моль/л), гидрофильно-липофильный баланс (7–8), максимальное количество молекул, адсорбируемых на единице площади раздела фаз ($1,27 \cdot 10^{-5}$ моль/м²), минимальная площадь, занимаемой одной молекулой биосурфактанта (13 нм²) и свободная энергия Гиббса (-35 кДжоль/моль). Установлено, что изучаемые трегалолипиды способны увеличивать смачиваемую водой поверхность гидрофобных веществ и образовывать эмульсии в виде «масло в воде».

Ключевые слова: биосурфактанты, трегалолипиды, Rhodococcus, бактерии-нефтедеструкторы

Формат цитирования: Лыонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., А.Е. Филонов, Понаморева 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.

STRUCTURE AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF GLYCOLIPID BIOSURFACTANT, PRODUCED BY OIL-DEGRADING BACTERIA *RHODOCOCCLUS SP. X5*

© Т.М. Luong*, I. A. Nechaeva*, K.V. Petrikov**, A.E. Filonov**, O.N. Ponamoreva*

*Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012, Russian Federation.

**G.K. Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, Russian Academy of Sciences,
5, Nauki Ave., Pushchino, 142290, Russian Federation.

In this study it was reported, that significant biosurfactants produced by Rhodococcus sp. X5 grown on n-hexadecane, are succinoyl trehalose tetraesters. The structural characterization of trehalolipids was determined based on MS/MS and GC/MS analysis. Succinoyl trehalolipids from Rhodococcus sp. X5 exhibit high surface activity (27 mN/m) and emulsifying activity ($E_{24} - 55\%$). Biosurfactants were characterized by the next physico-chemical indications – minimum surface tension (27 mN/m), critical micelle concentration ($4,1 \cdot 10^{-5}$ mol/l), hydrophilic - lipophilic balance (7-8), the maximum number of molecule adsorbed per unit area ($1,27 \cdot 10^{-5}$ mol/m²), the minimum area per molecule biosurfactant (13 nm²), Gibbs free energy of adsorption (-35 kJ/mol). The results demonstrate that studied trehalolids are capable to increase wetting the surface of hydrophobic compounds by water and to form type of emulsion “oil/water”.

Keywords: biosurfactants, trehalolipids, Rhodococcus, oil-degrading microorganisms

For citation: Luong T.M., Nechaeva I.A., Petrikov K.V., Filonov A.E., Ponomoreva O.N. Structure and physicochemical properties of glycolipid biosurfactant, produced by oil-degrading bacteria *Rhodococcus* sp. X5 *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2017, vol. 7, no. 2, pp. 72-79 (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-72-79

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследования по получению биосурфактантов – поверхностноактивных веществ (ПАВ) микробного происхождения, вызывают большой интерес у микробиологов, биохимиков и биотехнологов. Несмотря на то, что биосурфактанты являются относительно новым продуктом биотехнологии, они нашли применение в разных областях промышленности (химической, фармацевтической, пищевой), в экологии для очистки нефтезагрязненных территорий, в технологиях по добыче нефти, в сельском хозяйстве. К этим веществам относятся трегалолипиды, которые продуцируют некоторые микроорганизмы, такие как бактерии рода *Rhodococcus*, *Norcadia*, *Corynebacteria*, *Arthrobacteria* [1].

Бактерии нефтедеструкторы рода *Rhodococcus* продуцируют трегалолипиды различного строения. В работе [2] установлено, что бактерии *R. erythropolis* при росте на гидрофобных субстратах способны синтезировать димиколаты трегалозы, которые повышают доступность гидрофобных субстратов для бактерий. Родоккоки продуцируют не только моно- и диэфиры трегалозы, но и тетра-, гекса- и октапроизводные. Кроме миколовых кислот в состав неионогенных трегалолипидов родококков могут входить остатки других жирных кислот. Анионные трегалолипиды (сукциноилтрегалоллипиды), выделяемые родококками, характеризуются обязательным наличием в молекуле остатка янтарной кислоты и остатков более коротких жирных кислот, чем миколовые кислоты [3]. Трегалоллипиды проявляют биологическую активность при взаимодействии с фосфолипидными мембранами и белками, гемолитическую активность и воздействуют на дифференциацию опухолевых клеток человека [4], т.е. имеют значительный потенциал в области медицины. Трегалоллипиды обладают уникальными поверхностно-активными свойствами, биodeградельностью, биосовместимостью, низкой токсичностью [3]. Таким образом, трегалолипидные биосурфактанты обладают многофункциональным потенциалом для разных областей деятельности человека. В этой работе охарактеризованы поверхностно-активные свойства биосурфактантов – сукциноилтрегалоллипидов, продуцируемых бактериями нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 при росте на гидрофобном субстрате – *n*-гексадекане, которые свидетельствуют о перспективах ис-

пользования этих веществ как эмульгаторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования является бактерия нефтедеструктор *Rhodococcus* sp.X5, полученный из коллекции лаборатории биологии плазмид ИБФМ РАН. В ходе работы, микроорганизмы культивировали на жидкой минеральной среде при добавлении *n*-гексадекана как единственного источника углерода и энергии [5].

Биосурфактанты выделяли и охарактеризовали по методике [5]. Структуру гликолипида идентифицировали методом масс-спектрометрии на масс-спектрометре (Thermo Scientific, Germany). Ионизацию электрораспылением (ESI-MS) проводили в режиме отрицательных зарядов и полный масс-спектр сканировали от m/z 100 по m/z 2000. Тандемную масс-спектрометрию (MS/MS) проводили в положении иона-предшественника с m/z 875, m/z 847. MS/MS сканировали в интервале от m/z 50 по m/z 1500.

Жирнокислотные состав трегалолипидов определяли методом газовой хроматографии с масс-спектрометрической детекцией. Для этого проводили переэстерификацию эфиров жирных кислот метанолом по методике [6]. Метилловые эфиры жирных кислот (МЭЖК) анализировали с помощью хроматографа Aligent 6890N (Aligent Technologies Inc., USA) с масс-спектрометрическим детектором Aligent 5973 на капиллярной колонке XP-1 (30м x 25 мм x 25 μ m). МЭЖК идентифицировали по базе данных NIST/EPA/NIH (<http://www.nist.gov/srd/nist1a.cfm>).

Физико-химические свойства трегалолипидов оценивали по следующим критериям: критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) [7], гидрофильно-липофильный баланс (ГЛБ) [8], поверхностная адсорбция (Γ), свободная энергия мицеллообразования (ΔG), минимальная площадь (S_{min}) молекулярной области, соответствующей насыщенным монослоям биосурфактанта на границе вода-воздух и вода – *n*-гексадекан [9].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структурная характеристика трегалолипида

Выделение биосурфактантов, продуцируемых бактериями нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 при росте на *n*-гексадекане, проводили экстракцией липидов из бесклеточного

супернатанта органическими растворителями. Липидный экстракт характеризовали методом тонкослойной хроматографии. На хроматограмме обнаруживали пять гликолипидных компонентов с Rf 0,31; 0,4; 0,45; 0,51; 0,67 (рис. 1, а), что соответствует результатам, полученным нами ранее [5]. Компонент смеси гликолипидов с Rf 0,31, проявляющийся с наибольшей интенсивностью на хроматограмме, выделяли методом колоночной хроматографии для дальнейшего изучения.

Структурный анализ очищенного вещества проводили с помощью масс-спектрометрии в режиме отрицательных ионов (рис. 1, б).

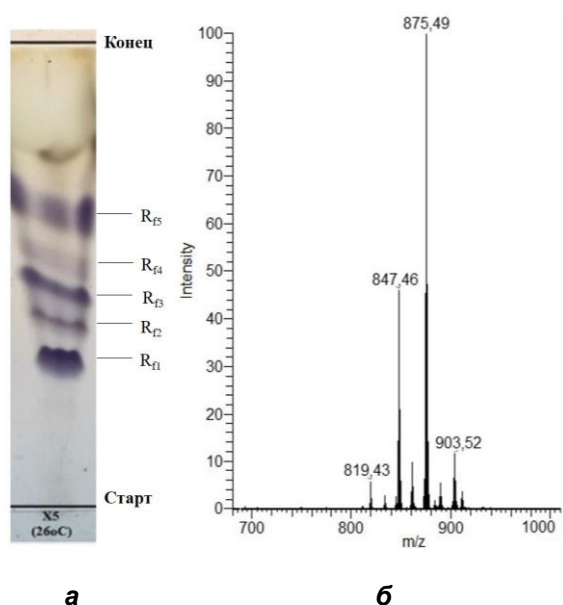


Рис. 1. Хроматограмма (а) липидного экстракта бесклеточной культуральной среды бактерий *Rhodococcus sp. X5*, выращенных на *n*-гексадекане через 6 сут культивирования; Масс-спектры (б) анализируемого гликолипида

В масс-спектрах очищенного образца присутствуют четыре сигнала депротонированных ионов $[M-H]^-$ с m/z 819, m/z 847, m/z 875 и m/z 903 ($z=1$), которые соответствуют молекулярным массам 820, 848, 876 и 904 Да. Поскольку разница в массах между соседними сигналами составляет 28 Да, что соответствует молярной массе двух метиленовых групп ($-CH_2-$), можно предположить, что эти четыре вещества являются гомологами. Интенсивность пика m/z 875 почти в 2, 17,5 и 8 раз больше, чем интенсивность сигналов m/z 847, m/z 819 и m/z 903 соответственно.

В фрагментации иона $[M-H]^-$ с m/z 875 наблюдаются пики с m/z 775, m/z 631, m/z 603,

которые соответствуют соединениям, образовавшимся путем отщепления фрагментов ангидрида янтарной кислоты (-100 Да), октановой (-144 Да) и декановой кислот (-172 Да) соответственно (рис. 2).

Ион с m/z 459 соответствует соединению, образованному после разрыва гликозидной связи в трегалолипиде, в результате чего отщепляется фрагмент ангидрида глюкозы, ацилированной янтарной, октановой и декановой кислотами (-416 Да). Это предполагает наличие у одного глюкопиранозного кольца по одному остатку янтарной, октановой и декановой кислоты, а у второго – единственного остатка декановой кислоты, т.е. разность между пиками с m/z 459 по m/z 143 (-316 Да) соответствуют ангидриду глюкозы, эстерифицированному декановой кислотой.

В фрагментации иона $[M-H]^-$ с m/z 847 появились пики с m/z 747, m/z 603, m/z 575, которые образовались путем отщепления тех же фрагментов, что и при распаде молекулярного иона с m/z 875. Однако вместо пика с m/z 459 появился пик с m/z 431, который соответствует глюкопиранозе, ацилированной янтарной и двумя октановыми кислотами. Это подтверждает наше предположение о том, что оба трегалолипида являются гомологами.

Сигналы m/z 819, m/z 903 обладают низкой интенсивностью, и их фрагментацию не проводили. Однако, по аналогии с предыдущим анализом можно заключить, что ион $[M-H]^-$ с m/z 819 соответствует тетраэфиру трегалозы с тремя остатками октановой кислоты, а m/z 903 – с тремя остатками декановой кислоты.

Это согласуется с данными других авторов, полученными для биосурфактантов бактерий рода *Rhodococcus*. В работе [8] показали, что *R. erythropolis* 51T7 при росте на тетрадекане (2%, *v/v*) продуцировали один главный и пять минорных компонентов, которые идентифицированы как тетраэфиры трегалозы, в молекуле которых присутствуют остатки сукцината и жирных кислот $C_7 - C_{11}$. Tokumoto et al. выращивали *R. erythropolis* SD-74 на *n*-гексадекане (10%, *v/v*) при 30 °C [6]. Анализ липидов бесклеточного супернатанта методом ТСХ показал присутствие трех пятен на хроматограмме.

Наиболее интенсивный сигнал на хроматограмме принадлежал изомерам эфиров трегалозы, содержащим два остатка сукцината и два остатка жирных кислот C_{10} , C_{12} , C_{14} .

В работе [10] было показано, что при культивировании на *n*-гексадекане бактерии *R. wratislaviensis* при 28 °C продуцировали тетраэфиры трегалозы, которые на хроматограмме

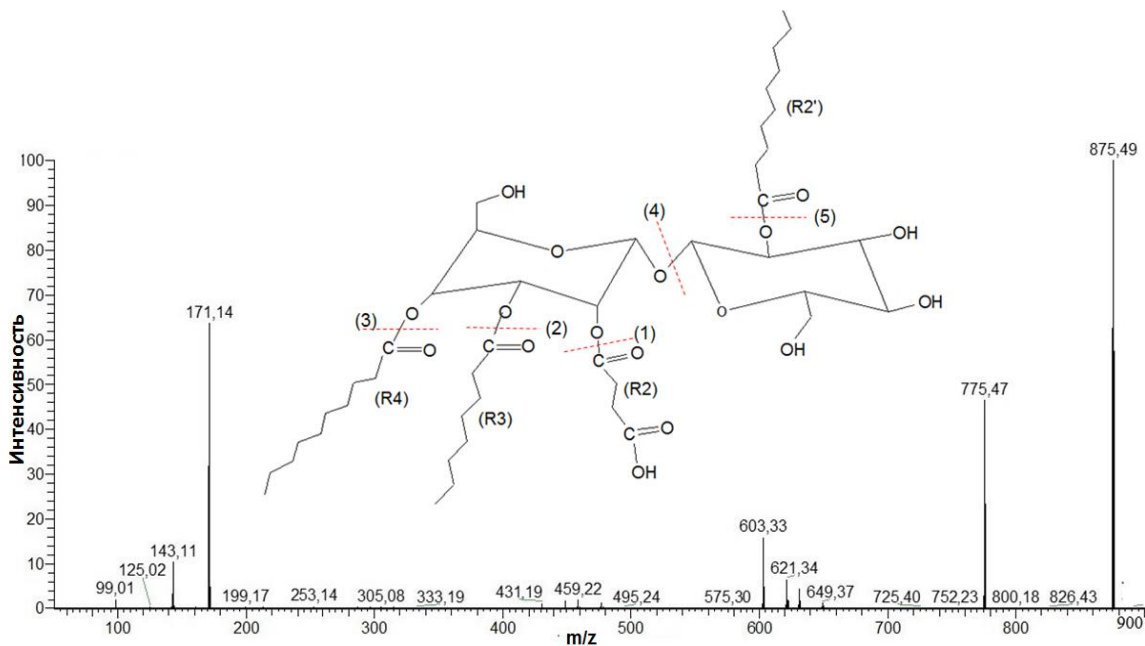


Рис. 2. Фрагментация в положении иона $[M-H]^-$ с m/z 875

проявлялись в виде одной полосы с $R_f=0.39$.

Масс-спектрометрия с ионизацией электро-спреем в режиме положительных ионов показала наличие двух соединений, которым соответствовали ионы $[M+Na]^+$ с m/z 899 и m/z 871. Использование в той же работе ЯМР-анализа было установлено, что у трегало-липида массой 876 Да одно глюкопиранозное кольцо ацилировано остатком декановой кислоты в положении C-2', а другое - остатком янтарной в положении C-2 или C-4, остатком декановой и остатком октановой кислот в положения C-2, C-3 или C-4. Трегалоллипид массой 848 Да отличался тем, что положения C-2, C-3 или C-4 были ацилированы двумя остатками октановой кислоты. Соединения с аналогичной структурой были обнаружены при анализе гликолипидов, продуцируемых штаммом *Rhodococcus* sp. MS11 при росте на н-гексадекане в условии температуры 20 °С.

Для этих соединений была продемонстрирована идентичная фрагментация ионов $[M+Na]^+$ с m/z 899 и 871, а ЯМР-анализ подтвердил наличие заместителей в положениях C-2, C-3, C-4 и C-2' [11]. Идентификацию трегалолипидов масс-спектрометрическим методом часто проводили при положительных ионах. Однако, в работе [12] показывали масс-спектры трегалолипидов, продуцируемых микроорганизмами *Norcadia farcinica* BN26 в режиме отрицательных ионов, значения m/z депротонированных ионов, которых совпадают полученными пиками (в положении иона m/z 875, 847, 903). Структурный анализ трегалолипидов в данной работе позволил установить

наличие по одному остатку янтарной кислоты в положении C₂ и остаткам изомеров жирных кислот (C₆–C₁₁) в положении C-2', C-3, C-4. Сравнивая полученные нами результаты и результаты предшествующих работ, можно заключить, что основными био-сурфактантами, продуцируемыми *Rhodococcus* sp. X5 при росте на н-гексадекане, являются 2,3,4-сукциноил-диоктаноил-2'-деcanoилтрегалозой и 2,3,4-сукциноил-октаноил-деcanoил-2'-деcanoилтрегалозой.

Для подтверждения строения трегалолипидов определяли их жирнокислотный состав методом ГХ-МС (рис. 3). На хроматограмме присутствовали два основных пика с временами удерживания 12,78 и 14,31, соответствующие метиловым эфирам октановой и декановой кислот.

Таким образом, нами показано, что в составе сукциноилтрегалоллипидов, продуцируемых *Rhodococcus* sp. X5, входят только остатки двух жирных кислот – октановой и декановой, что подтверждает предложенную структуру трегалолипидов.

Физико-химические свойства тетраэфиров трегалозы

Основные физико-химические свойства выделенной смеси изомеров трегалолипидов определяли на основе их способности ресуспендировать две несмешивающиеся жидкости и снижать поверхностное натяжение водного раствора. Анализ зависимости поверхностного натяжения раствора от содержания трегалолипидов показал, что при увеличении концентрации биосурфактанта происходит снижение

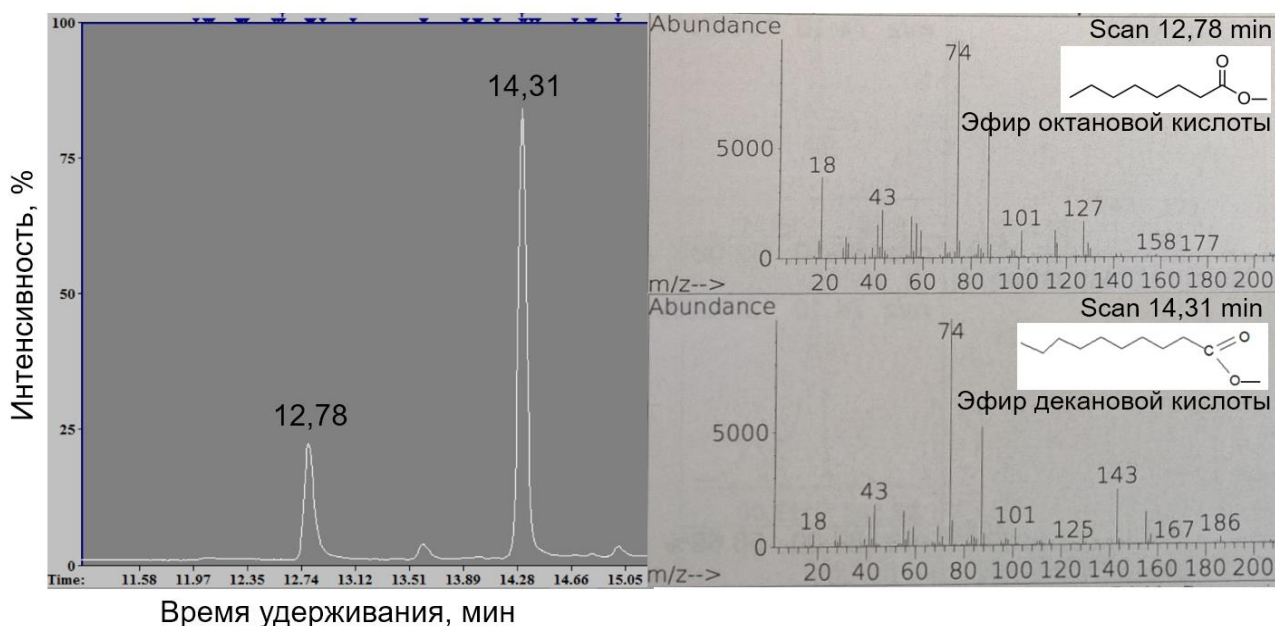


Рис. 3. ГХ-МС жирнокислотного состава сукциноилтрегалолипидов, продуцируемых *Rhodococcus sp.X5* при росте на *n*-гексадекане

поверхностного натяжения водного раствора, что характерно для ПАВ. ККМ определяли по точке перегиба графической зависимости поверхностного натяжения от концентрации биосурфактанта. Значение ККМ составляла 32 мг/л при постоянном поверхностном натяжении 27 мН/м. Полученные результаты нами соответствуют данным других авторов. Трегалолипиды, продуцируемые бактериями рода *Rhodococcus*, способны снижать поверхностное натяжение водных растворов с 72 мН/м до значения от 19 по 43 мН/м при ККМ от 0,7 до 37 мг/л [1].

Индекс эмульгирования (E_{24}) тетраэфиров трегалозы, который определяли в системе с *n*-гексадеканом, составлял 55%. Ившина со авторами [3] определяли E_{24} биосурфактантов, продуцированных бактериями *R. erythropolis*, *R. longus*, *R. opacus* и *R. ruber*, и получили максимальное значение 62,5%. Тетраэфиры трегалозы от бактерий *R. wratislaviensis*, имеющие E_{24} от 23% до 69% с разным водонесмешивающим жидкостям [10]. Таким образом, сукциноилтрегалолипиды, продуцируемые бактериями *Rhodococcus sp. X5*, обладают высокой поверхностной и эмульгирующей активностью.

Эффективность биосурфактантов можно охарактеризовать физико-химическими показателями – минимальным значением поверхностного натяжения ($\sigma_{\text{мин}}$), максимальным количеством молекул, адсорбируемых на едини-

це площади раздела фаз (Γ), минимальной площадью, занимаемой одной молекулой биосурфактанта ($S_{\text{мин}}$) и свободная энергия мицеллообразования (ΔG). Основные физико-химические характеристики сукциноилтрегалолипида, продуцируемого *Rhodococcus sp. X5*, приведены в таблице.

Тип образуемой эмульсии любого ПАВ зависит от ГЛБ вещества. ГЛБ является критерием практического применения ПАВ, в зависимости от величины которого и подбирают эмульгаторы. Значение ГЛБ всех ПАВ по Гриффину укладывается в интервал от 1 до 20 [8]. Для тетраэфиров трегалозы, продуцируемых *Rhodococcus sp. X5*, рассчитанное значение ГЛБ находится в интервале 7–8 (таблица). Трегалолипиды из *R. erythropolis* 517Т, содержащие длинноцепочечные остатки жирных кислот, имели значение ГЛБ 11 и образовывали стабильные эмульсии [8]. Согласно шкале Гриффина ПАВ со значениями ГЛБ 8-18 способны образовывать эмульсии «масло в воде», а со значениями ГЛБ 7–9 – увеличивать смачиваемую водой поверхность гидрофобных веществ. Таким образом, сукциноилтрегалолипиды со среднецепочечными остатками жирных кислот, продуцируемых бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus sp. X5* способны не только увеличивать смачиваемую водой поверхность гидрофобных веществ, но и образовывать эмульсии в виде «масло в воде».

Основные физико-химические характеристики сукциноилтрегалопида

Вещество	ККМ, моль/л	$\sigma_{\text{мин}}$, мН/м	ГЛБ	Г, моль/м ²	S _{мин} , нм ²	ΔG , кДж/моль
Сукциноилтетраэфир трегалозы	$4,1 \cdot 10^{-5}$	27	7-8	$1,27 \cdot 10^{-5}$	13	-35

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бактерии нефтедеструкторы *Rhodococcus* sp. X5 – компоненты биопрепарата «Микро-Бак», являются продуцентами гликолипидных биосурфактантов при росте в жидкой мине-

ральной среде на н-гексадекане и обладают значительным биотехнологическим потенциалом для получения сукциноилтрегалопида как эффективных биосурфактантов для дальнейшего применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Mulligan C.N., Sharma S.K., Mudhoo A (Editor). *Biosurfactants. Research trends and applications*. CRC Press, 2015. 346 p.
- Kretschmer A., Bock H., Wagner F. Chemical and physical characterization of Interfacial-Active Lipids from *Rhodococcus erythropolis* grown on n-alkanes // *Applied and Environmental Microbiology*. 1982. V. 44, N 4. P. 864-870.
- Alvarez H.M (Editor). *Biology of Rhodococcus*. Microbiology Monographs 16. Springer-Verlag, 2010. 371 p.
- Gudina E.J., Rangarajan V., Sen R., Rodrigues L.R. Potential therapeutic applications of biosurfactants // *Trends Pharmacol Sci*. 2013. V. 34, N 12. P. 667–675.
- Petrikov K., Delean Y., Surin A., Ponomareva O., Puntus I., Filonov A., Boronin A. Glycolipids of *Pseudomonas* and *Rhodococcus* oil-degrading bacteria used in bioremediation preparations: Formation and structure // *Process Biochemistry*. 2013. V. 48, N 5–6. P. 931–935.
- Tokumoto Y., Nomura N. Structural characterization and surface-active properties of a succinoyl trehalose lipid produced by *Rhodococcus* sp. SD-74 // *J. Oleo Sci*. 2009. V. 58, N 2. P. 97–102.
- White D.A., Hird L.C., Ali T.S. Production and characterization of a trehalolipid biosurfactant produced by the novel marine bacterium

- Rhodococcus* sp., strain PML026 // *J. Appl Microbiol*. 2013. V. 115, N 3. P. 744–755.
- Marques A. M., Pinazo A., Farfan M., Aranda F. J. The physicochemical properties and chemical composition of trehalose lipids produced by *Rhodococcus erythropolis* 51T7 // *Chem Phys Lipids*. 2009. V.158, N 2. P. 110–117.
- Soultani S., Ognier S., Engasser J.M., Ghoul M. Comparative study of some surface active properties of fructose esters and commercial sucrose esters // *Colloids and Surfaces A*. 2003. V. 227, N 1–3. P. 35–44.
- Tuleva B., Christova N., Cohen R., Stoev G., Stoineva I. Production and structural elucidation of trehalose tetraesters (biosurfactants) from a novel alkanotrophic *Rhodococcus wratislaviensis* strain // *J. Appl Microbiol*. 2008. V.104, N 6. P. 1703–1710.
- Rapp P., Gabriel-Jurgens L.H. Degradation of alkanes and highly chlorinated benzenes and production of biosurfactants by a psychrophilic *Rhodococcus* sp. and genetic characterization of its chlorobenzene dioxygenase // *Microbiology*. 2003. V. 149, N 10. P. 2879–2890.
- Christova N.S., Lang S., Wray K. Production, structural elucidation and in vitro antitumor activity of trehalose lipid biosurfactant from *Norcadia farcinica* strain // *J. Microbiol Biotechnol*. 2015. V. 25, N 4. P. 439–447.

REFERENCES

- Mulligan C.N., Sharma S.K., Mudhoo A (Editor). *Biosurfactants. Research trends and applications*. CRC Press, 2015, 346 p.
- Kretschmer A., Bock H., Wagner F. Chemical and physical characterization of interfacial-active lipids from *Rhodococcus erythropolis* grown on n-alkanes. *Applied and Environmental Microbiology*. 1982, vol. 44, no. 4, pp. 864–870.
- Alvarez H.M. (ed.) *Biology of Rhodo-*

- coccus*. Microbiology Monographs 16. Springer-Verlag, 2010, 371 p.
- Gudina E.J., Rangarajan V., Sen R., Rodrigues L.R. Potential therapeutic applications of biosurfactants. *Trends Pharmacol Sci*. 2013, vol. 34, no. 12, pp. 667–675.
- Petrikov K., Delean Y., Surin A., Ponomareva O., Puntus I., Filonov A., Boronin A. Glycolipids of *Pseudomonas* and *Rhodococcus* oil-degrading bacteria used in bioremediation

preparations: Formation and structure. *Process Biochemistry*. 2013, vol. 48, no. 5–6, pp. 931–935.

6. Tokumoto Y., Nomura N. Structural characterization and surface-active properties of a succinoyl trehalose lipid produced by *Rhodococcus* sp. SD-74. *J. Oleo Sci.* 2009, vol. 58, no. 2, pp. 97–102.

7. White D.A., Hird L.C., Ali T.S. Production and characterization of a trehalolipid biosurfactant produced by the novel marine bacterium *Rhodococcus* sp., strain PML026. *J. Appl. Microbiol.* 2013, vol. 115, no. 3, pp. 744–755.

8. Marques A.M., Pinazo A., Farfan M., Aranda F.J. The physicochemical properties and chemical composition of trehalose lipids produced by *Rhodococcus erythropolis* 51T7. *Chem. Phys. Lipids*. 2009, vol. 158, no. 2, pp. 110–117.

9. Soultani S., Ognier S., Engasser J.M., Ghoul M. Comparative study of some surface active properties of fructose esters and

commercial sucrose esters. *Colloids and Surfaces A*. 2003, vol. 227, no. 1–3, pp. 35–44.

10. Tuleva B., Christova N., Cohen R., Stoev G., Stoinea I. Production and structural elucidation of trehalose tetraesters (biosurfactants) from a novel alkanotrophic *Rhodococcus wratislaviensis* strain. *J. Appl. Microbiol.* 2008, vol. 104, no. 6, pp. 1703–1710.

11. Rapp P., Gabriel-Jurgens L.H. Degradation of alkanes and highly chlorinated benzenes and production of biosurfactants by a psychrophilic *Rhodococcus* sp. and genetic characterization of its chlorobenzene dioxygenase. *Microbiology*. 2003, vol. 149, no. 10, pp. 2879–2890.

12. Christova N.S., Lang S., Wray K. Production, structural elucidation and in vitro antitumor activity of trehalose lipid biosurfactant from *Norcadia farcinica* strain. *J. Microbiol. Biotechnol.* 2015, vol. 25, no. 4, pp. 439–447.

Критерии авторства

Льонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., А.Е. Филонов, Понаморева О.Н. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Льонг Т.М., Нечаева И.А., Петриков К.В., А.Е. Филонов, Понаморева О.Н. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Мо Т. Льонг

Тульский государственный университет
Аспирант
luongmo@mail.ru

Ирина А. Нечаева

Тульский государственный университет,
К.б.н, доцент кафедры биотехнологии
nechaeva1902@gmail.com

Кирилл В. Петриков

Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН
Российская Федерация, 142290, г. Пушкино,

Contribution

Luong T.M., Nechaeva I.A., Petrikov K.V., Filonov A.E., Ponomoreva O.N. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Luong T.M., Nechaeva I.A., Petrikov K.V., Filonov A.E., Ponomoreva O.N. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

AUTHORS' INDEX

Affiliations

Mo T. Luong

Tula State University
Postgraduate Student
Department of Chemistry
luongmo@mail.ru

Irina A. Nechaeva

Tula State University
Ph.D. (Biology), Associate Professor
Department of Biotechnology
nechaeva1902@gmail.com

Kirill V. Petrikov

G.K. Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, RAS
5, Nauki Ave., Pushchino, Moskovskaya oblast,

пр-т Науки, д. 5.
К.х.н, н.с. лаборатории биологии плазмид
bioscience.kp@gmail.com

Андрей Е. Филонов

Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН
К.б.н, н.с, зав. лабораторией биологии плазмид
filonov.andrey@rambler.ru

Ольга Н. Понаморева

Организация: Тульский государственный университет
Д.х.н, доцент кафедры биотехнологии
olgaponamoreva@mail.ru

142290, Russian Federation
Ph.D. (Chemistry), Researcher
Laboratory of Plasmid Biology
bioscience.kp@gmail.com

Andrey E. Filonov

G.K. Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, RAS
Ph.D. (Biology), Head of the Laboratory of Plasmid Biology
filonov.andrey@rambler.ru

Olga N. Ponamoreva

Tula State University
Doctor of Chemistry, Associate Professor
Department of Biotechnology
olgaponamoreva@mail.ru

Поступила 24.03.2017

Received 24.03.2017