

**Б.М. Галкін, М.О. Фіногенова, М.Б. Галкін,
А.С. Семенець, Т.О. Філіпова**

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна,
тел.: +380482635761, e-mail: bgalkin@ukr.net

БІОСУРФАКТАНТИ МОРСЬКИХ МІКРООРГАНІЗМІВ: III. ЗАСТОСУВАННЯ У ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Поверхнево-активні речовини (ПАР) та емульгатори завдяки здатності зменшувати міжфазне натягнення широко використовуються у різних галузях промисловості. Більшість ПАР, що застосовуються сьогодні, виробляється з невідновлюваних нафтохімічних сировинних ресурсів та є небезпечними для живих істот і довкілля. Біосурфактанти (Біо-ПАР) синтезуються мікроорганізмами з відновлюваних сировинних ресурсів, зокрема, з відходів харчової промисловості, є перспективною альтернативою хімічним ПАР завдяки їх біологічній трансформації та екологічності. Перевагами Біо-ПАР, що продукуються представниками морської мікробіоти, є, що вони проявляють свою активність в широкому діапазоні температур, рН та солоності. Показано, що ці біосурфактанти крім поверхнево-активних властивостей часто чинять також інші види активності: антимікробну, протибіоплівкову, антиоксидантну. Встановлено, що біосурфактанти морських мікроорганізмів можуть широко використовуватися у таких галузях, як виробництво засобів гігієни, фармацевтиці, косметології, харчовій промисловості, сільському господарстві, біоремедіації, нафтовидобуванні.

Ключові слова: Біосурфактанти, морські мікроорганізми, промислові технології

Біологічні поверхнево активні речовини (Біо-ПАР) стають важливими продуктами біотехнології для багатьох галузей промисловості, включаючи харчову, косметичну, нафтогазову та фармацевтичну. Доходи на світовому ринку склали 1,5 млрд. дол. США в 2019 році і, за прогнозами, зростатимуть щорічно на 5,5% між 2020 і 2027 роками [1]. Побутові засоби для миття є найбільшим ринком застосування Біо-ПАР, за ними йдуть косметичні вироби і засоби особистої гігієни та вироби харчової промисловості [34]. Серед ключових виробників Біо-ПАР фірми Ecover, Jeneil Biotech, Evonik та Biotensidon (табл. 1). Європа займає понад половину частки ринку використання Біо-ПАР, за нею йдуть США та Азія [34]. Зростаючий світовий інтерес до Біо-ПАР



зумовлений їх низькою токсичністю, здатністю до розкладання, низьким ступенем впливу на навколишнє середовище [8].

Таблиця 1

Компанії виробники та застосування Біо-ПАР у промисловості [23, 28]

Table 1

Companies producing and using Bio-surfactants in industry [23, 28]

Компанії	Держава	Продукти	Використання у промисловості
AGAE Technologies LLC	США	Рамноліпіди	Фармацевтика, косметика, засоби особистої гігієни, біоремедіація та покращення видобутку нафти
Jeneil Biotech	США	Рамноліпіди	Засоби для очищення, покращення видобутку нафти
Biotensidon	Німеччина	Рамноліпіди	Сільське господарство (боротьба з шкідниками рослин), косметика, засоби для миття і очищення та покращення видобутку нафти
Fraunhofer IGB	Німеччина	Гліколіпіди, мікробні емульгатори	Засоби для миття та очищення (гелі для душу, шампуні, миючі засоби)
Saraya Co. Ltd	Японія	Софороліпіди	Засоби для очищення, косметика, засоби гігієни
Ecover	Бельгія	Софороліпіди	Засоби для очищення, косметика, біомедицина, боротьба зі шкідниками, фармацевтика
Groupe Soliance	Франція	Софороліпіди	Косметика
MG Intobio Co. Ltd	Південна Корея	Софороліпіди	Продукти особистої гігієни
Evonik	Німеччина	Софороліпіди	Продукти для очищення
Lipotec S.A.U	Іспанія	Морські Біо-ПАР	Косметика, особистий догляд
Biopolymer International	Бельгія	Ксантанові та геланові камеді	Харчування, засоби особистої гігієни, фармацевтика, буріння нафтових свердловин, корм для тварин

Використання Біо-ПАР з морських мікроорганізмів у біоремедіації

Завдяки своїй здатності до розкладання та низькій екотоксичності Біо-ПАР можуть бути дуже корисними в процесах ремедіації, тому що збільшення видобутку нафти, газу, важких металів та інших необхідних для промисловості продуктів призводить до забруднення навколишнього середовища



та створює зростаючу глобальну стурбованість щодо наземного та морського середовищ [6, 35]. Відповідно до їх фізико-хімічних властивостей Біо-ПАР можна застосовувати не тільки для очищення наземного середовища, але і для водного середовища [38, 39]. Біо-ПАР виступають альтернативою класичним ПАР, що використовуються для рекультивациі [32].

Морські мікроорганізми, такі як *Halomonas*, *Marinobacter*, *Myroides*, а також морські дріжджі *Yarrowia lipolytica* можуть відігравати важливу роль у остаточному видаленні вуглеводнів із забруднених ділянок у результаті виробництва емульгаторів. Завдяки своїм різноманітним структурним і функціональним властивостям вони мають потенційні застосування в процесах біоремедіації. *Halomonas sp.* беруть участь у видаленні розливої нафти шляхом синтезу емульгаторів. Молекули гліколіпідів, що містяться на клітинній поверхні *Halomonas sp.*, підвищують розчинність вуглеводнів і, отже, збільшують їх біодоступність для деградації. Біо-ПАР *Halomonas sp.* може використовуватися для посилення процесів видобутку нафти в екстремальних середовищах [9], оскільки вони є дієвими емульгаторами при низькій температурі [25].

Орнітинові ліпіди, інший тип біоемульгаторів, який синтезується *Myroides sp.* SM1, здатні емульгувати сиру нафту та стабільні у широкому діапазоні температур та рН. Орнітинові ліпіди більш активні ніж синтетичні миючі засоби та сурфактин [22]. Емульсан, з *Acinetobacter calcoaceticus* RAG-1, може мати потенційне застосування у збільшенні видобування нафти та очищенні розливів нафти [30]. Інші Біо-ПАР теж здатні до біоремедіаційної активності [5]. Біоемульгатор, синтезований бактерією *Alteromonas sp.* 17, яка за сучасної класифікації перейменована на *Marinobacter*, також може бути використана для ефективної деградації вуглеводнів [2]. Бактерія *Marinobacter sp.* M22.20 синтезує фосфоліпопептид, який є ефективним емульгатором. Створені емульсії мають низьку екоотоксичність і емульгують сиру нафту у морській воді [27]. Гліколіпід, виділений з штаму *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* SdK644, продемонстрував у 2 рази більшу здатність до солнобілізації сирової нафти, ніж твін 80 [40]. Інший емульгатор "Yansan", синтезований аеробними дріжджами *Yarrowia lipolytica*, показав високу емульгувальну активність та стабільність у діапазоні рН 3–9. Його використовують у рецептурі емульсії, створеної на основі перфторвуглецю, яку застосовують для деградації вуглеводнів [3]. З цією ж метою застосовують Біо-ПАР *Candida lipolytica* [31].

Використання Біо-ПАР з морських мікроорганізмів у харчовій та косметичній промисловості

Завдяки посиленому використанню стабілізаторів та загусників у харчових продуктах, в цій галузі шукають інгредієнти, які можуть покращити якість та властивості їжі. Гуміарабік, ксантанова камедь і лецитин широко використовуються як гідроколоїдні емульгатори, що стабілізують емульсії олія-у-воді. У продуктах фірми Quorn, суху культуру гриба *Fusarium venenatum* використовують разом з ячним білком, як зв'язувальний компонент. Однак зміна клімату та коливання погоди, такі як посуха, спричинять дефоліацію та впливають на виробництво продуктів на рослинній основі. З метою змен-



шення залежності від синтетичних емульгаторів та рослинних емульгаторів підвищується інтерес до пошуку нових інгредієнтів. На відміну від хімічних поверхнево-активних речовин, Біо-ПАР з морських організмів є нетоксичними і володіють високою стабільністю за екстремальних температур, рН та солоності. Більшість Біо-ПАР з морських мікроорганізмів є експериментальними речовинами з потенціалом застосування у складі харчових та косметичних продуктів. Єдиним комерціалізованим мікробним емульгатором є Емульсан, що продукується *A. calcoaceticus* [30]. За рахунок стабілізації емульсії покращується консистенція та аромат продуктів. Включення Біо-ПАР покращує реологію тіста, збільшує об'єм та емульгує жир і, таким чином, знаходить корисне застосування у хлібопекарській та м'ясопереробній промисловості. Стабілізатор емульсії глюкопротеїд, який був виділений з морської *Antarctobacter* sp. TG22, утворює стабільні емульсії олія-у-воді з комерційними харчовими оліями [12]. Два інших глюкопротеїнових емульгатора з штамів *Halomonas* sp. TG39 і TG67 за властивостями не відрізняються від комерційних емульгаторів. Крім того, їх емульгувальна активність зберігається також в кислих умовах та при високих температурах [13].

Ліпопептид MSA31, виділений з морського мікроорганізму *Nesterenkonia* sp. є ефективним емульгатором, що володіє високою антиоксидантною активністю, а його додавання до кексів покращує м'якість і зберігає якість їжі. Ліпопептид MSA31 ефективно (на 90%) знижує масу біоплівки, що утворюється золотистим стафілококом на поверхні харчових продуктів, і не є токсичним до креветок [18]. Біоемульгатор, синтезований морською бактерією *Enterobacter cloacae*, сприяє в'язкості кислих харчових продуктів [15]. У харчовій промисловості існує широка сфера застосування морських похідних Біо-ПАР як емульгаторів, стабілізуювальних речовин, антимікробних та антиадгезивних антибіотиків (табл. 2).

Хімічні речовини, що використовуються в косметичних засобах, часто викликають подразнення шкіри та алергію. Серед споживачів існує значний інтерес до натуральних косметичних продуктів. Заміна синтетичних ПАР в них на Біо-ПАР може зменшити такий шкідливий вплив. Поверхнево-активні властивості є важливими для визначення типу та кількості Біо-ПАР у миючих, косметичних, фармацевтичних та інших галузях промисловості. Тип сполуки Біо-ПАР, що включається у косметичні засоби, можуть бути обрані на основі їх емульгувальної активності та/або поверхневої активності. Існують такі показники, як гідрофільно-ліпофільний баланс (ГЛБ) та критична концентрація міцел (ККМ), відповідно. ГЛБ визначає полярність Біо-ПАР, що вказує на його розчинність у різних системах. Біо-ПАР з високим значенням ГЛБ є високо гідрофільними, тоді як низьке значення ГЛБ вказує на виражені ліпофільні властивості. На підставі значень ГЛБ можливо прогнозувати сферу їх застосування як емульгаторів, протипінних агентів або зволожувачів. Ці властивості Біо-ПАР необхідні для косметичних продуктів [38].

ККМ – це мінімальна концентрація Біо-ПАР, яка необхідна для зниження поверхневого натягу води. Вони утворюють міцели, які і зменшують поверхневий та міжфазний натяги. Властивості Біо-ПАР визначаються довжиною бічного ланцюга, ненасиченими зв'язками та розміром гідрофільної



Таблиця 2

Table 2

Використання Біо-ПАР з морських мікроорганізмів у косметичних продуктах

Use of Biosurfactants from marine microorganisms in cosmetic products

Мікроорганізм	Метод ідентифікації	Тип Біо-ПАР	Використання	Концентрація	Методи визначення *	Посилання
<i>Antarctobacter</i> sp. TG22	16SrPНК	Глікопротеїн	Стабілізатор емульсій	21,1 мг/л	ЯМР, ВЕРХ, ГХ	[12]
<i>Halomonas</i> TG39 і TG67	16SrPНК	Глікопротеїн	Емульгування та стабілізація харчових олій	131,0 мг/л TG39, 28,0 мг/л TG67	ЯМР, ВЕРХ, ГХ	[13]
<i>Nesterenkonia</i> species MSA31	16SrPНК	Ліпопеп-тид	Стабілізатор емульсій, антибіоплівковий агент, антиоксидант	Не вказано	ГХ-МС, ТШХ, ЯМР, ІЧФС	[18]
<i>Enterobacter cloacae</i>	АПП*	Екзополіукрид EPS 71a	Емульгувальний засіб харчових продуктів	Не вказано	Структура не визначена	[15]
<i>Nocardioopsis VITS15B</i>	–	Не визначений	Компонент зубної пасти	Не вказано	Структура не визначена	[7]
<i>Pseudomonas fluorescens</i> BD5	16SrPНК	Ліпопептид	Активність проти меланоми	10 мг/л	ЗВЕРХ, МАЛДІ-МС	[16]

Примітка: * АПП – аналітичний профільний індекс; ЯМР – ядерно-магнітна резонансна спектроскопія; ВЕРХ – високоєфективна рідина хроматографія; ГХ – газова хроматографія; ТШХ – тонкошарова хроматографія; ГХ-МС – комплекс газової хроматографії з мас-спектрометрією; ЗВЕРХ – звернено фазова високоєфективна рідина хроматографія; МАЛДІ – матрично-активована лазерна десорбція/іонізація; ІЧФС – інфрачервона Фур'є спектроскопія

Note: * API – analytical profile index, NMR – nuclear magnetic resonance, HPLC – high performance liquid chromatography, GC – gas chromatography, TLC – thin-layer chromatography, GC-MS – gas chromatography coupled with mass spectrometry, RP-HPLC – reversed-phase high-performance liquid chromatography, MALDI – matrix-activated laser desorption/ionization, FTIR – Fourier transform infrared spectrometry



групи. За збільшення гідрофобності молекул Біо-ПАР ККМ має тенденцію до зменшення. Це означає, що потрібна менша концентрація Біо-ПАР для утворення міцел. *Burkholderia thailandensis*, що синтезує рамноліпіди Rha-Rha-C14-C14, має ККМ $225 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$ порівняно з *P. aeruginosa* PG201, що синтезує Rha-Rha-C10-C10 – $600 \text{ мг} \times \text{л}^{-1}$. Завдяки гідрофобності довших ланцюгів жирних кислот Біо-ПАР синтезований *Burkholderia thailandensis* має нижчий ККМ порівняно з *P. aeruginosa* [10].

Піноутворювальні та емульгувальні властивості, Біо-ПАР можна використовувати в різних продуктах, таких як засоби для миття, зволожувачі, зубна паста та засоби особистої гігієни. Біосурфактанти, що синтезуються морськими мікроорганізмами, мають високу протимікробну, антиадгезивну та антибіоплівкову активності проти патогенних мікроорганізмів. Ці властивості Біо-ПАР можуть бути використані у косметичних засобах та засобах для догляду за шкірою. Крім того, деякі Біо-ПАР мають антиоксидантну активність і можуть блокувати вільні радикали. Тому Біо-ПАР можна застосовувати як антиоксиданти в продуктах по догляду за шкірою [38].

Для використання Біо-ПАР в харчових та косметичних продуктах необхідно знати токсичність цих сполук. Токсичність можна визначати на різних клітинних моделях та на тваринах. Гліколіпід BS-SLSZ2, що синтезується морською бактерією *Staphylococcus lentus*, ефективно пригнічував утворення біоплівки вібріонами та *P. aeruginosa* на поверхні еукаріотів аквакультур. Експерименти *in vivo* показали, що BS-SLSZ2 є нетоксичним по відношенню до артемії та ефективним у захисті *A. salina* від інфекцій *V. harveyi* та *P. aeruginosa* [14]. Штами морської *Pseudomonas sp.* MK90e8 та MK91CC8 синтезують массетолід А, новий циклічний депсипептид та віскозин. Массетолід А і віскозин проявляють *in vitro* антимікробну активність проти *Mycobacterium tuberculosis* та *Mycobacterium avium*. Массетолід А є нетоксичним для мишей у дозі 10 мг/кг [11].

Ліпепептид псевдофактин ІІ, виділений з арктичного штаму *P. fluorescens* BD5, викликає апоптоз клітин меланоми, але практично не впливає на фібробласти шкіри. Механізм загибелі клітин меланоми може бути зумовлений підвищеною проникністю плазматичних мембран міцелами Біо-ПАР [16].

Біо-ПАР, що синтезуються морською бактерією *Nocardioopsis* VITSISB, використовується у складі зубної пасти. Ця сполука є менш токсичною, чим лаурилсульфат натрію [7].

Використання Біо-ПАР з морських організмів у промислових технологіях

Біо-ПАР використовуються у деяких промислових технологіях. Наприклад, при охолодженні та біопереробці. Для системи охолодження використовується однорідна суміш води та дрібних частинок льоду. Було показано, що діацетильовані Біо-ПАР стабілізують дрібні частинки льоду і тим самим запобігають їх агломерації та утворенню більших кристалів [19]. Крім того, добавки Біо-ПАР покращують текучі властивості біодизелю і, отже, його ефективність при низькій температурі [21]. Біо-ПАР також



застосовуються для поліпшення деградації складної біомаси в так званих процесах біопереробки, щоб використовувати альтернативні промислові ресурси. Тут їх добавки можуть підвищити ефективність ферментативної деградації лігноцелюлози, ймовірно, шляхом поліпшення зв'язування субстрату з целюлазами [20]. Добавки сурфактину та сапоніну збільшують виробництво водню з твердих органічних відходів [33].

Таким чином, Біо-ПАР корисні для різноманітних галузей застосування. Речовини, синтезовані морськими мікроорганізмами, представляють інтерес, оскільки вони пристосовані для ефективної роботи в холодному та/або солоному середовищі, що відкриває нові сфери використання [26]. У біотехнологічному виробництві не морських Біо-ПАР активно використовуються не тільки природні штами, але і гетерологічні продуценти [17, 29]. Однак такі стратегії виробництва біосурфактантів морськими продуцентами, переважно бактеріями, досліджувалися лише зрідка. Відомі два дослідження щодо використання гетерологічних штамів для синтезу похідних гліколіпідів *A. borkumensis* [24] та трегалозоліпідів *Rhodococcus* [4].

Виробництво Біо-ПАР шляхом культивування морських бактерій може створити технічні проблеми для встановлення надійних та здійснених умов накопичення продукту синтезу [36]. Крім того, внутрішні регуляторні схеми можуть вимагати додавання жиру для індукції біосинтезу Біо-ПАР [4], що, в свою чергу, ускладнює подальше накопичення продукту синтезу. Тому використання рекомбінантних технологій може бути перспективним підходом до накопичення Біо-ПАР морських мікроорганізмів та їх впровадження у різні галузі. Для цього необхідно вивчати біохімію та генетику цих морських мікроорганізмів продуцентів Біо-ПАР. В подальшому використання сучасних технологій, таких як метагеноміка та біоінформатика, сприятиме як одержанню нових Біо-ПАР з морських мікроорганізмів так і розширенню сфер їх застосування у промисловості.

**B.M. Galkin, M.O. Finogenova, M.B. Galkin,
A.S. Semenets, T.O. Filipova**

Odesa I.I. Mechnikov National University,
st. Dvoryanska, 2, Odessa, 65082, Ukraine,
tel.: +380482635761 e-mail: bgalkin@ukr.net

BIOSURFACTANTS OF MARINE MICROORGANISMS: III. APPLICATIONS IN INDUSTRIAL TECHNOLOGIES

Summary

Surface-active compounds (SAC) and emulsifiers, due to their ability to reduce interfacial tension, are widely used in various industries. Most of the SAC used today are produced from non-renewable petrochemical raw materials and are not safe for living beings and the environment. Biosurfactants (BS) are synthesized by microorganisms from renewable raw materials, in particular, from food indus-



try waste, they are a promising alternative to chemical surfactants due to their biological transformation and environmental friendliness. The advantage of BS produced by marine microbiota is that they exhibit their activity over a wide range of temperatures, pH and salinity. It is shown that these biosurfactants, in addition to surface-active properties, often have other types of activity: antimicrobial, antibiofilm, antioxidant. It has been established that biosurfactants of marine microorganisms can be widely used in industries such as the production of hygiene products, pharmaceuticals, cosmetology, food industry, agriculture, bioremediation, and oil production.

Key words: Biosurfactant, marine microorganisms, industrial technologies

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ahuja K., Singh S. Biosurfactants market size by product // Glob. Market Insights. – 2020.
2. Al-Mallah M., Goutx M., Mille G., Bertrand J-C. Production of emulsifying agents during growth of a marine *Alteromonas* in sea water with eicosane as carbon source, a solid hydrocarbon // Oil and Chem. Poll. – 1990. – V. 6(4). – P. 289–305.
3. Amaral P.F.F., da Silva J.M., Lehocky M. et al. Production and characterization of a bioemulsifier from *Yarrowia lipolytica* // Process. Biochem. – 2006. – V. 26(41). – P. 1894–1898.
4. Bages S., White D.A., Winterburn J.B. et al. Production and separation of a trehalolipid biosurfactant // Biochem. Eng. J. – 2018. – V. 38(1). – P. 85–94.
5. Banat I.M., Franzetti A., Gandolfi I. et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2010. – V. 87(2). – P. 427–444.
6. Bezza F.A., Chirwa E.M.N. Pyrene biodegradation enhancement potential of lipopeptide biosurfactant produced by *Paenibacillus dendritiformis* CN5 strain // J. Hazard. Mater. – 2017. – V. 321(5). – P. 218–227.
7. Das I., Roy S., Chandni S. et al. Biosurfactant from marine actinobacteria and its application in cosmetic formulation of toothpaste // Der Pharm. Lett. – 2013. – V. 5(5). – P. 1–6.
8. Desai J.D., Banat I.M. Microbial production of surfactants and their commercial potential // Microbiol. Mol. Biol. Rev. – 1997. – V. 61(1). – P. 47–64.
9. Dhasayan A., Kiran G.S., Selvin J. Production and characterisation of glycolipid biosurfactant by *Halomonas* sp. MB-30 for potential application in enhanced oil recovery // Appl. Biochem. Biotechnol. – 2014. – V. 174(7). – P. 2571–2584.
10. Dubeau D., Deziel E., Woods D.E., Lepine F. *Burkholderia thailandensis* harbors two identical rhl gene clusters responsible for the biosynthesis of rhamnolipids // BMC Microbiol. – 2009. – V. 9(2). – P. 263–274.
11. Gerard J., Lloyd R., Barsby T. et al. Massetolides A-H, antimycobacterial cyclic depsipeptides produced by two *Pseudomonads* isolated from marine habitats // J. Nat. Prod. – 1997. – V. 60(3). – P. 223–229.
12. Gutierrez T., Mulloy B., Bavington C. et al. Partial purification and chemical characterization of a glycoprotein (putative hydrocolloid) emulsifier pro-



- duced by a marine bacterium *Antarctobacter* // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2007. – V. 76(12). – P. 1017–1026.
13. Gutierrez T., Mulloy B., Black K., Green D.H. Glycoprotein emulsifiers from two marine *Halomonas* species: chemical and physical characterization // J. Appl. Microbiol. – 2007. – V. 103(10). – P. 1716–1727.
 14. Hamza F., Satpute S., Banpurkar A. Biosurfactant from a marine bacterium disrupts biofilms of pathogenic bacteria in a tropical aquaculture system // FEMS Microbiol. Ecol. – 2017. – V. 93(11). – P. 1–11.
 15. Iyer A., Mody K., Jha B. Emulsifying properties of a marine bacterial exopolysaccharide // Enzyme Microb. Technol. – 2006. – V. 38(1-2). – P. 220–222.
 16. Janek T., Krasowska A., Radwanska A., Lukaszewicz M. Lipopeptide biosurfactant pseudofactin II induced apoptosis of melanoma A 375 cells by specific interaction with the plasma membrane // PLoS One. – 2013. – V. 8(3). – e57991.
 17. Kiran G.S., Ninawe A.S., Lipton, A.N. et al. Rhamnolipid biosurfactants: Evolutionary implications, applications and future prospects from untapped marine resource // Crit. Rev. Biotechnol. – 2016. – V. 36(3). – P. 399–415.
 18. Kiran G.S., Priyadharsini S., Sajayan A. et al. Production of lipopeptide biosurfactant by a Marine *Nesterenkonia* sp. and its application in food industry // Front. Microbiol. – 2017. – 8:1381.
 19. Kitamoto D., Yanagishita H., Endo A. et al. Remarkable antiagglomeration effect of a yeast biosurfactant, diacylmannosylerythritol, on ice-water slurry for cold thermal storage // Biotechnol. Prog. – 2001. – V. 17(2). – P. 362–365.
 20. Liu J., Zhu N., Yang, J. et al. Lipopeptide produced from *Bacillus* sp. W112 improves the hydrolysis of lignocellulose by specifically reducing non-productive binding of cellulases with and without CBMs // Biotechnol. Biofuels. – 2017. – 10:301.
 21. Madihalli C., Sudhakar H., Doble M. Mannosylerythritol lipid-A as a pour point depressant for enhancing the low-temperature fluidity of biodiesel and hydrocarbon fuels // Energy Fuels. – 2016. – V. 30(5). – P. 4118–4125.
 22. Maneerat S., Bamba T., Harada K. et al. A novel crude oil emulsifier excreted in the culture supernatant of a marine bacterium, *Myroides* sp. strain SM1 // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2006. – V. 70(2). – P. 254–259.
 23. Nikolova Ch., Gutierrez T. Biosurfactants and their applications in the oil and gas industry: Current state of knowledge and future perspectives // Front. in Bioeng. and Biotech. – 2021. – 9:626639.
 24. Passeri A., Schmidt M., Haffner T. et al. Marine biosurfactants. IV. Production, characterization and biosynthesis of an anionic glucose lipid from the marine bacterial strain MM1 // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 1992. – V. 37(3). – P. 281–286.
 25. Pepi M., Cesaro A., Liut G., Baldi F. An antarctic psychrotrophic bacterium *Halomonas* sp. ANT-3b, growing on n-hexadecane, produces a new emulsifying glycolipid // FEMS Microbiol. Ecol. – 2005. – V. 53(1). – P. 157–166.
 26. Perfumo A., Banat I.M., Marchant R. Going green and cold: Biosurfactants



- from low-temperature environments to biotechnology applications // Trends Biotechnol. – 2018. – V. 36(3). – P. 277–289.
27. Raddadi N., Giacomucci L., Totaro G., Fava F. *Marinobacter* sp. from marine sediments produce highly stable surface-active agents for combatting marine oil spills // Microb. Cell Fact. – 2017. – 16:186.
 28. Randhawa K.K.S., Rahman, P.K.S.M. Rhamnolipid biosurfactants past, present, and future scenario of global market // Front. Microbiol. – 2014. – 5:454.
 29. Roelants S.L.K.W., Ciesielska K., De Maeseneire S.L. et al. Towards the industrialization of new biosurfactants: Biotechnological opportunities for the lactone esterase gene from *Starmarella bombicola* // Biotechnol. Bioeng. – 2016. – V. 113(3). – P. 550–559.
 30. Rosenberg E., Zuckerberg A., Rubinovitz C., Gutnick D.L. Emulsifier of *Arthrobacter* RAG-1: isolation and emulsifying properties // Appl. Environ. Microbiol. – 1979. – V. 37(3). – P. 402–408.
 31. Santos D.K.F., Resende A.H.M., De Almeida D.G. et al. *Candida lipolytica* UCP0988 Biosurfactant: potential as a bioremediation agent and formulating a commercial related product // Front. Microbiol. – 2017. – 8:767.
 32. Shah A., Shahzad S., Munir A. et al. Micelles as soil and water decontamination agents // Chem Rev. – 2016. – V. 116(10). – P. 6042–6074.
 33. Sharma P., Melkania U. Biosurfactant-enhanced hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste using co-culture of *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes* // Bioresour. Technol. – 2017. – V. 243. – P. 566–572.
 34. Singh P., Patil Y., Rale V. Biosurfactant production: emerging trends and promising strategies // J. Appl. Microbiol. – 2018. – V. 126(1). – P. 2–13.
 35. Souza, E.C., Vessoni-Penna T.C., de Souza Oliveira R.P. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview // Int. Biodeterior. Biodegradation. – 2014. – V. 89(1). – P. 88–94.
 36. Tripathi L., Irorere V.U., Marchant R., Banat I.M. Marine derived biosurfactants: A vast potential future resource // Biotechnol. Lett. – 2018. – V. 40(10). – P. 1441–1457.
 37. Vecino X., Cruz J.M., Moldes A.B., Rodrigues L.R. Biosurfactants in cosmetic formulations: trends and challenges // Crit. Rev. Biotechnol. – 2017. – V. 37(10). – P. 911–923.
 38. Vecino X., Rodríguez-López L., Cruz J.M. et al. Sewage sludge polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) decontamination technique based on the utilization of a lipopeptide biosurfactant extracted from corn steep liquor // J. Agric. Food Chem. – 2015. – V. 63(32). – P. 7143–7150.
 39. White D.A., Hird L.C., Ali S.T. Production and characterization of a trehalolipid biosurfactant produced by the novel marine bacterium *Rhodococcus* sp. strain PML026 // J. Appl. Microbiol. – 2013. – V. 115(3). – P. 744–755.
 40. Zenati B., Chebbi A., Badis A. et al. A non-toxic microbial surfactant from *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* SdK644 for crude oil solubilization enhancement // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2018. – V. 154(5). – P. 100–107.



REFERENCES

1. Ahuja K, Singh S. Biosurfactants market size by product. Glob Market Insights. 2020; 564.
2. Al-Mallah M, Goutx M, Mille G, Bertrand J-C. Production of emulsifying agents during growth of a marine *Alteromonas* in sea water with eicosane as carbon source, a solid hydrocarbon. Oil and Chem Poll. 1990;6(4):289–305.
3. Amaral PFF, da Silva JM, Lehoczy M et al. Production and characterization of a bioemulsifier from *Yarrowia lipolytica*. Process Biochem. 2006;26(41): 1894–1898.
4. Bages S, White DA, Winterburn JB et al. Production and separation of a trehalolipid biosurfactant. Biochem Eng J. 2018;38(1):85–94.
5. Banat IM, Franzetti A, Gandolfi I et al. Microbial biosurfactants production, applications and future potential. Appl Microbiol Biotechnol. 2010;87(2):427–444.
6. Bezza FA, Chirwa EMN. Pyrene biodegradation enhancement potential of lipopeptide biosurfactant produced by *Paenibacillus dendritiformis* CN5 strain. J Hazard Mater. 2017;321(5):218–227.
7. Das I, Roy S, Chandni S et al. Biosurfactant from marine actinobacteria and its application in cosmetic formulation of toothpaste. Der Pharm Lett. 2013;5(5): 1–6.
8. Desai JD, Banat IM. Microbial production of surfactants and their commercial potential. Microbiol Mol Biol Rev. 1997;61(1):47–64.
9. Dhasayan A, Kiran GS, Selvin J. Production and characterisation of glycolipid biosurfactant by *Halomonas* sp. MB-30 for potential application in enhanced oil recovery. Appl Biochem Biotechnol. 2014;174(7):2571–2584.
10. Dubeau D, Deziel E, Woods DE, Lepine F. *Burkholderia thailandensis* harbors two identical rhl gene clusters responsible for the biosynthesis of rhamnolipids. BMC Microbiol. 2009;9(2):263–274.
11. Gerard J, Lloyd R, Barsby T et al. Massetolides A-H, antimycobacterial cyclic depsipeptides produced by two *Pseudomonads* isolated from marine habitats. J. Nat Prod. 1997;60(3):223–229.
12. Gutierrez T, Mulloy B, Bavington C et al. Partial purification and chemical characterization of a glycoprotein (putative hydrocolloid) emulsifier produced by a marine bacterium *Antarctobacter*. Appl Microbiol Biotechnol. 2007;76(12):1017–1026.
13. Gutierrez T, Mulloy B, Black K, Green D.H. Glycoprotein emulsifiers from two marine *Halomonas* species: chemical and physical characterization. J Appl Microbiol. 2007;103(10):1716–1727.
14. Hamza F, Satpute S, Banpurkar A. Biosurfactant from a marine bacterium disrupts biofilms of pathogenic bacteria in a tropical aquaculture system. FEMS Microbiol Ecol. 2017;93(11):1–11.
15. Iyer A, Mody K, Jha B. Emulsifying properties of a marine bacterial exopolysaccharide. Enzyme Microb Technol. 2006;38(1-2):220–222.
16. Janek T, Krasowska A, Radwanska A, Lukaszewicz M. Lipopeptide biosurfactant pseudofactin II induced apoptosis of melanoma A 375 cells by specific interaction with the plasma membrane. PLoS One. 2013;8(3): e57991.



17. Kiran GS, Ninawe AS, Lipton AN et al. Rhamnolipid biosurfactants: Evolutionary implications, applications and future prospects from untapped marine resource. *Crit Rev Biotechnol*. 2016;36(3):399–415.
18. Kiran GS, Priyadharsini S, Sajayan A et al. Production of lipopeptide biosurfactant by a Marine *Nesterenkonia* sp. and its application in food industry. *Front Microbiol*. 2017;8(1):1–15.
19. Kitamoto D, Yanagishita H, Endo A et al. Remarkable antiagglomeration effect of a yeast biosurfactant, diacylmannosylerythritol, on ice-water slurry for cold thermal storage. *Biotechnol Prog*. 2001;17(2):362–365.
20. Liu J, Zhu N, Yang J et al. Lipopeptide produced from *Bacillus* sp. W112 improves the hydrolysis of lignocellulose by specifically reducing non-productive binding of cellulases with and without CBMs. *Biotechnol Biofuels*. 2017;10(1):1–12.
21. Madihalli C, Sudhakar H, Doble M. Mannosylerythritol lipid-A as a pour point depressant for enhancing the low-temperature fluidity of biodiesel and hydrocarbon fuels. *Energy Fuels*. 2016;30(5):4118–4125.
22. Maneerat S, Bamba T, Harada K et al. A novel crude oil emulsifier excreted in the culture supernatant of a marine bacterium, *Myroides* sp. strain SM1. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2006;70(2):254–259.
23. Nikolova Ch, Gutierrez T. Biosurfactants and their applications in the oil and gas industry: current state of knowledge and future perspectives. *Front in Bioeng and Biotech*. 2021;9(626639):1–19.
24. Passeri A, Schmidt M, Haffner T et al. Marine biosurfactants. IV. Production, characterization and biosynthesis of an anionic glucose lipid from the marine bacterial strain MM1. *Appl Microbiol Biotechnol*. 1992;37(3):281–286.
25. Pepi M, Cesaro A, Liut G, Baldi F. An antarctic psychrotrophic bacterium *Halomonas* sp. ANT-3b, growing on n-hexadecane, produces a new emulsifying glycolipid. *FEMS Microbiol Ecol*. 2005;53(1):157–166.
26. Perfumo A, Banat IM, Marchant R. Going green and cold: Biosurfactants from low-temperature environments to biotechnology applications. *Trends Biotechnol*. 2018;36(3):277–289.
27. Raddadi N, Giacomucci L, Totaro G, Fava F. *Marinobacter* sp. From marine sediments produce highly stable surface-active agents for combatting marine oil spills. *Microb Cell Fact*. 2017;16(1):1–13.
28. Randhawa KKS, Rahman PKS.M. Rhamnolipid biosurfactants past, present, and future scenario of global market. *Front Microbiol*. 2014;5(454):1–8.
29. Roelants SLKW, Ciesielska K, De Maeseneire SL et al. Towards the industrialization of new biosurfactants: Biotechnological opportunities for the lactone esterase gene from *Starmarella bombicola*. *Biotechnol Bioeng*. 2016;113(3):550–559.
30. Rosenberg E, Zuckerberg A, Rubinovitz C, Gutnick DL. Emulsifier of *Arthrobacter* RAG-1: isolation and emulsifying properties. *Appl Environ Microbiol*. 1979;37(3):402–408.
31. Santos DKF, Resende AHM., De Almeida DG et al. *Candida lipolytica*



- UCP0988 Biosurfactant: potential as a bioremediation agent and informulating a commercial related product. *Front Microbiol.* 2017;8(10):767.
32. Shah A, Shahzad S, Munir A et al. Micelles as soil and water decontamination agents. *Chem Rev.* 2016;116(10):6042–6074.
 33. Sharma P, Melkania U. Biosurfactant-enhanced hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste using co-culture of *Escherichia coli* and *Enterobacter aerogenes*. *Bioresour Technol.* 2017;243:566–572.
 34. Singh P, Patil Y, Rale V. Biosurfactant production: emerging trends and promising strategies. *J Appl Microbiol.* 2018;126(1):2–13.
 35. Souza, EC, Vessoni-Penna TC, de Souza Oliveira RP. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. *Int Biodeterior Biodegradation.* 2014;89(1):88–94.
 36. Tripathi L, Irorere VU, Marchant R, Banat IM. Marine derived biosurfactants: A vast potential future resource. *Biotechnol Lett.* 2018;40(10):1441–1457.
 37. Vecino X, Cruz JM, Moldes AB, Rodrigues LR. Biosurfactants in cosmetic formulations: trends and challenges. *Crit Rev Biotechnol.* 2017;37(10):911–923.
 38. Vecino X, Rodríguez-López L, Cruz JM et al. Sewage sludge polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) decontamination technique based on the utilization of a lipopeptide biosurfactant extracted from corn steep liquor. *J Agric Food Chem.* 2015;63(32):7143–7150.
 39. White DA, Hird LC, Ali ST. Production and characterization of a trehalolipid biosurfactant produced by the novel marine bacterium *Rhodococcus* sp. strain PML026. *J Appl Microbiol.* 2013;115(3):744–755.
 40. Zenati B, Chebbi A, Badis A et al. A non-toxic microbial surfactant from *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* SdK644 for crude oil solubilization enhancement. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2018;154(5):100–107.

Стаття надійшла до редакції 08.08.2022 р.

