

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ УГЛЕРОДА НА ПРОДУКЦИЮ БИОСУРФАКТАНТОВ ПРИРОДНЫМИ ШТАММАМИ BACILLUS SPP.**Д.Е. Дудник, А.Н. Иркитова, А.В. Малкова, Е.Н. Кожевникова***Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия***E-mail:** dudnik-dina@mail.ru

Для цитирования: Влияние разных источников углерода на продукцию биосурфактантов природными штаммами *Bacillus spp.* / Д.Е. Дудник, А.Н. Иркитова, А.В. Малкова, Е.Н. Кожевникова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 2(75). – С. 152–159. – DOI 10.31677/2072-6724-2025-75-2-152-159.

Ключевые слова: биосурфактанты, *Bacillus*, источник углерода, культивирование, оптимизация, индекс эмульгирования, внеклеточные биосурфактанты.

Реферат. Биосурфактанты – биотехнологически ценные метаболиты микроорганизмов. Эти соединения обладают не только поверхностно-активными свойствами, но и способностью к подавлению роста патогенных и условно-патогенных бактерий и грибов. Широкий спектр свойств, а также безопасность биосурфактантов позволили найти им применение в разных отраслях промышленности. Однако их производство в настоящее время проблематично. Основные проблемы при получении биосурфактантов связаны с поиском высокоактивных штаммов-продуцентов, оптимизацией состава сред для их культивирования и сокращением затрат на производство. Целью работы было изучить влияние разных источников углерода на продукцию биосурфактантов природными штаммами бацилл. Был проведен скрининг штаммов *Bacillus spp.* из коллекции Инжинирингового центра «Промбиотех», обладающих сурфактанционной активностью. Для отобранных штаммов показано влияние сахарозы, глицерина, маннита и свеколовичной мелассы на продукцию биосурфактантов. Установлено, что штамм *Bacillus atrophaeus* 7 способен к производству поверхностно-активных соединений только при культивировании на средах с мелассой в качестве единственного источника углерода. Напротив, для штамма *Bacillus subtilis* 1/8 зафиксирована продукция биосурфактантов при использовании сред с сахарозой, глицерином, маннитом и свеколовичной мелассой. Также установлено влияние продолжительности культивирования на накопление сурфактантов в среде для обоих штаммов бацилл. Увеличение продолжительности роста приводило к снижению концентрации биосурфактантов в культуральной жидкости.

EFFECT OF DIFFERENT CARBON SOURCES ON BIOSURFACTANT PRODUCTION BY NATURAL STRAINS OF BACILLUS SPP.**D.E. Dudnik, A.N. Irkitova, A.V. Malkova, E.N. Kozhevnikova***Altai State University, Barnaul, Russia***E-mail:** dudnik-dina@mail.ru

Keywords: biosurfactants, *Bacillus*, carbon sources, cultivation, optimization, emulsification index, extracellular biosurfactants.

Abstract. Biosurfactants are biotechnologically valuable metabolites of microorganisms. These compounds have not only surface-active properties, but also the ability to suppress growth of pathogenic and opportunistic bacteria and fungi. The wide range of characteristics and safety of biosurfactants have allowed them to find application in various industries. However, their production is currently problematic. The main problems in biosurfactants obtaining are associated with the search for highly active strains-producers, optimization of media composition for their cultivation, and production costs reduction. The aim of the work was to study the influence of different carbon sources on the biosurfactants production by natural bacilli strains. A screening of *Bacillus spp.* strains that possess surfactant activity from the Engineering Center “Prombiotech” collection was conducted. For the selected strains, the influence of sucrose, glycerol, mannitol and beet molasses on the biosurfactants production was shown. It was established that the *Bacillus atrophaeus* 7 strain is capable of producing surface-active compounds only when cultivated on media with molasses as the sole carbon source. On the contrary, for the *Bacillus subtilis* 1/8 strain, production of biosurfactants was recorded when using media with sucrose, glycerol, mannitol and beet molasses. The influence of cultivation duration on the surfactants accumulation in the medium for both bacilli strains was also established. The growth duration increase resulted in biosurfactants concentration decrease in the culture liquid.

В настоящее время все большее внимания уделяется микробным метаболитам как агентам биологического контроля. Микроорганизмы продуцируют различные соединения, обладающие антибактериальной, антифунгальной и противовирусной активностью. К основным биологически активным соединениям относят биосурфактанты, бактериоцины, кислоты, ферменты, летучие органические и неорганические вещества [1, 2]. Особый интерес из перечисленных соединений представляют биосурфактанты, обладающие широким спектром свойств, позволяющих применять их в разных отраслях: нефтяная промышленность, сельское хозяйство, фармакология, пищевая промышленность, производство моющих и чистящих средств. Высокий потенциал применения биосурфактантов обусловлен также их безопасностью, экологичностью и высоким уровнем биоразлагаемости [3–5].

Биосурфактанты – поверхностно-активные вещества, вырабатываемые различными бактериями, дрожжами, грибами, растениями и животными в процессе их жизнедеятельности. Однако для биотехнологии наиболее перспективны биосурфактанты микробного происхождения. Наиболее изучены гликолипиды бактерий рода *Pseudomonas* и липопептиды рода *Bacillus* [6].

Биосурфактанты бацилл представлены сурфактином, лихенизином, фенгицином, итурином, пумилицидином и бацилломицином [4]. Данные соединения могут влиять на рост, адгезию и образование биопленок патогенными микроорганизмами. Так, установлена антиадгезионная и антибиопленочная активность биосурфактантов *B. subtilis* DS03 в отношении *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Listeria monocytogenes* [3]. А для липопептида, продуцируемого штаммом *B. cereus* NK1, определены антимикробный и антибиопленочный эффекты в отношении *P. aeruginosa* и *S. epidermidis* [7].

При этом производство необходимого на рынке количества биосурфактантов остается проблематичным [6]. В первую очередь это связано с низкой активностью штаммов продуцентов. Например, при проведении скрининга сурфактационной активности Felix et al. [8] из 12 штаммов *Bacillus* spp. только для пяти был установлен синтез биосурфактантов разного уровня.

Актуальной проблемой при производстве биосурфактантов является подбор источников углерода и азота, обеспечивающих оптимальную продукцию данного метаболита штаммом-продуцентом. Проведено много исследований по

оптимизации состава сред для культивирования штаммов-продуцентов. Чаще всего наибольший выход биосурфактантов отмечают на средах, включающих моно- и дисахара (глюкоза, сахароза, ксилоза), реже многоатомные спирты (сорбитол, маннит) [9–12].

Третьей проблемой является высокая себестоимость производства биосурфактантов, которая ограничивает масштабы их использования. Затраты на компоненты среды составляют до 30 % общей стоимости [9]. Это создает потребность в поиске штаммов, способных к продукции биосурфактантов на средах с дешевыми компонентами. Многие исследователи отмечают возможность использования для этих целей отходов производств, например, глицерин, патоку, побеги виноградной лозы, сыворотку, крахмал маниоки [3, 9, 13–15].

Цель настоящего исследования: оценка продукции биосурфактантов природными штаммами *Bacillus* spp. при культивировании на средах с разными источниками углерода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования использовались 17 штаммов *Bacillus* spp. из коллекции ИЦ Промбиотех АлтГУ, выделенные из естественных и антропогенных экологических ниш.

Для первичного скрининга сурфактационной активности бациллы выращивали на L бульоне следующего состава, г/л: NaCl 5, пептон 15, дрожжевой экстракт 5. Штаммы культивировали в шейкере-инкубаторе Innova 44 («New Brunswick», США) при 37 °C и 200 об/мин в течение 24 ч.

Продукцию биосурфактантов оценивали с помощью теста на парафильме [16]. Суточную культуру каждого штамма центрифугировали MiniSpin («Eppendorf», Германия) для отделения клеток в течение 10 мин при 4500 об/мин. Полученные супернатанты наносили каплей на полоску парафильма. Оценку результата проводили в течение 1–2 мин. При сохранении каплей округлого профиля результат считался отрицательным, при сглаживании профиля и растекании капли по поверхности материала – положительным.

У штаммов с положительным результатом оценивали эмульгирующую активность E_{24} [16]. Для этого смешивали в равных объемах керосин и бесклеточный супернатант с последующим встряхиванием раствора на вихревом смесителе V3 («Elmi», Латвия) в течение 2 мин. Полученную эмульсию оставляли на 24 ч при комнатной температуре. По истечении времени измеряли размер

эмульгированного слоя. Индекс E_{24} рассчитывали, как отношение высоты слоя эмульсии к высоте общего слоя жидкости в пробирке. Значение выражали в процентах.

Для штаммов с эмульгирующей активностью более 50 % изучили динамику продукции биосурфактантов на среде MSS с нитратом аммония в качестве источника азота [12]. В качестве источников углерода в среду вносили сахарозу, глицерин, маннит и свекловичную мелассу (содержание сахара прямой поляризации 46,8 %) в количестве 10 % от объема среды. Культивирование проводили в шейкере-инкубаторе Innova 44 («New Brunswick», США) в течение 72 ч при 37 °С и 200 об/мин.

Рост культуры оценивали путем измерения оптической плотности среды на спектрофотометре UV-1280 («Shimadzu», Япония) при длине волны 600 нм. Образец среды предварительно разводили в 10 раз. Отбор проб для определения оптической плотности и эмульгирующей активности осуществляли каждые 24 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биосурфактанты – поверхностно-активные соединения, нерибосомально синтезируемые метаболиты микроорганизмов разных таксономических групп. Их синтез обнаружен у бактерий *Pseudomonas*, *Lactobacillus*, *Serratia* и грибов *Candida*, *Rhodotorula* и др. [17]. Продукция биосурфактантов также отмечается у многих видов бацилл. В частности, известны штаммы *B. safensis*, *B. siamensis*, *B. tequilensis*, *B. paralicheniformis*, *B. licheniformis* и *B. subtilis*, выделяющие в культуральную жидкость различные липопептиды [10, 13, 18, 19]. В нашем исследовании был проведен скрининг сурфактационной активности разных видов бацилл: 3 штамма *B. atrophaeus*, 1 штамм *B. safensis*, 2 штамма *B. licheniformis*, 5 штаммов *B. pumilus*, 3 штамма *B. firmus*, 1 штамм *B. mojavensis*, 1 штамм *B. toyonensis* и 1 штамм *B. subtilis*. Продукция сурфактантов установлена для 4 из 17 штаммов: *B. atrophaeus* 7, *B. atrophaeus* 8, *B. firmus* 3, *B. subtilis* 1/8 (табл. 1).

Таблица 1

Скрининг продукции биосурфактантов штаммами *Bacillus* spp.
Screening of biosurfactant production by *Bacillus* spp. strains.

Штамм	Parafilm-тест	E_{24} , %
Контроль (1%-й раствор лаурилсульфата натрия)	+	62,96±1,57
<i>B. atrophaeus</i> 1	–	0
<i>B. atrophaeus</i> 7	+	53,32±2,93
<i>B. atrophaeus</i> 8	+	47,06±1,34
<i>B. safensis</i> 6	–	0
<i>B. licheniformis</i> 5	–	0
<i>B. licheniformis</i> 10	–	0
<i>B. pumilus</i> 4	–	0
<i>B. pumilus</i> 5	–	0
<i>B. pumilus</i> 6	–	0
<i>B. pumilus</i> 7	–	0
<i>B. pumilus</i> 16	–	0
<i>B. firmus</i> 1	–	0
<i>B. firmus</i> 2	–	0
<i>B. firmus</i> 3	+	25,93±2,33
<i>B. mojavensis</i> 9	–	0
<i>B. toyonensis</i> 15	–	0
<i>B. subtilis</i> 1/8	+	57,97±2,84

Примечание. «+» сурфактационная активность обнаружена, «-» сурфактационная активность не обнаружена.

Биосурфактанты по их локализации разделяют на внеклеточные и связанные с клетками [13]. Большинство исследований, в том числе наше,

направлены на оценку продукции поверхностно-активных соединений, выделяемых клетками во внешнюю среду. Возможно, штаммы, супер-

натанты которых не проявили эмульгирующей активности, способны к образованию связанных с клетками биосурфактантов.

Эмульгирующая способность биосурфактантов не одинакова в отношении разных углеводородных субстратов. Это также могло отразиться на полученных результатах. Так, некоторые авторы отмечают разные значения индекса эмульгирования для штаммов *B. subtilis* при эмульгировании бензина, керосина и дизельного топлива [8].

Индекс эмульгирования – сила поверхностно-активного вещества, ограничивающая разделение фаз смеси. При значении этого показателя более 50 % эмульсия считается стойкой [10, 18]. В связи с чем штаммы, супернатанты которых показали такой результат (*B. atrophaeus* 7 и *B. subtilis* 1/8), использовали для оценки продукции биосурфактантов в динамике при использовании сред с разными источниками углерода.

Выбор источника углерода существенно влияет на продукцию бактериями биосурфактантов. В данной работе оценивали продукцию биосурфактантов на средах с сахарозой, глицерином, маннитом и мелассой в качестве единственного источника углерода. Количество поверхностно-активных соединений в супернатанте определяли косвенно – по индексу эмульгирования. Прямая корреляция между этими показателями отмечена в работе Rocha et al. [19].

Источник углерода оказал существенное влияние на продуктивность штаммов. Для штамма *B. subtilis* 1/8 отмечена способность к образованию биосурфактантов при использовании всех углеводных субстратов. Напротив, для штамма *B. atrophaeus* 7 продукция таких соединений зафиксирована только при использовании сред с мелассой (табл. 2).

Таблица 2

Индекс эмульгирования супернатантов штамма *B. subtilis* 1/8 и *B. atrophaeus* 7 при культивировании на средах с разными источниками углерода
Emulsification index of supernatants of *B. subtilis* strain 1/8 and *B. atrophaeus* 7 when cultivated on media with different carbon sources

Время культивирования, ч	Источник углерода	E24, %	
		<i>B. subtilis</i> 1/8	<i>B. atrophaeus</i> 7
24	Сахароза	15,38±1,33	0
	Глицерин	26,92±1,59	0
	Маннит	59,26±0,53	0
	Меласса	59,26±2,59	37,03±0,18
48	Сахароза	42,85±1,71	0
	Глицерин	21,43±0,33	0
	Маннит	0	0
	Меласса	42,85±1,17	11,11±0,25
72	Сахароза	39,29±1,84	0
	Глицерин	10,71±0,11	0
	Маннит	0	0
	Меласса	39,29±1,62	0

Меласса является перспективным и экономически выгодным источником углерода для синтеза биосурфактантов микроорганизмами. В состав патоки помимо сахаров входят аминокислоты, витамины и минералы, что может положительно сказываться на продукции метаболитов [20]. Повышение выхода биосурфактантов при использовании мелассных питательных сред подтверждается другими учеными [3, 9].

Продукция биосурфактантов штаммом *B. subtilis* 1/8 зафиксирована и при использовании других источников. На среде, содержащей маннит,

также в первые 24 ч культивирования отмечены значения индекса эмульгирования, близкие к полученным на среде с мелассой. Это согласуется с данными других авторов. В исследовании штамм *B. atrophaeus* 5-2а при культивировании на средах с маннитом также показал значение E_{24} больше 50 % [12].

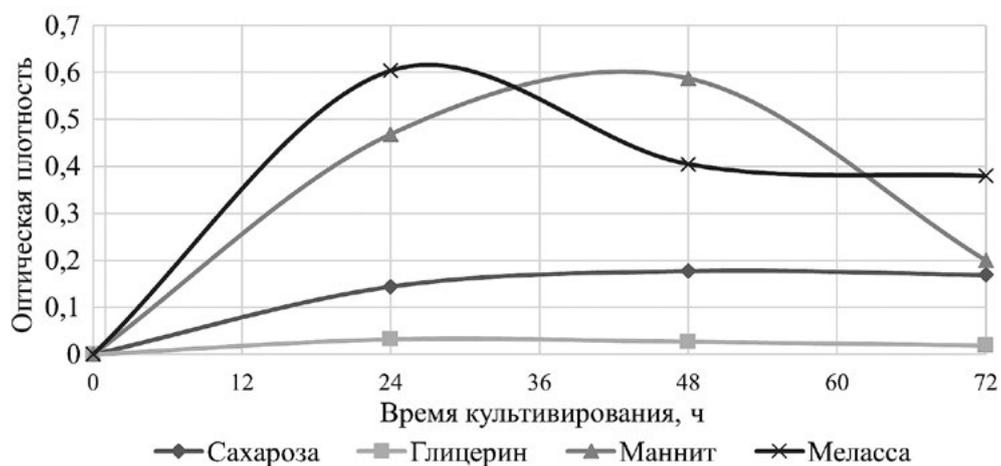
Сахароза в ряде исследований рассматривается как перспективный источник углерода для получения биосурфактантов. Так, в работе Wu et al. штамм *B. subtilis* SL на среде с сахарозой в качестве единственного источника углерода показы-

вал лучший результат по количеству полученного сурфактина [11]. А Abdel-Mawgoud et al. и Zhang et al. отмечают высокий выход биосурфактантов (не менее 700 мг/л) на средах с сахарозой [9, 12]. В нашем исследовании продукция биосурфактантов при использовании сахарозы зафиксирована только для штамма *B. subtilis* 1/8. При этом полученные значения индекса эмульгирования ниже, чем при использовании мелассы и маннита. Такое расхождение может быть обусловлено различиями в ферментных системах разных штаммов бацилл.

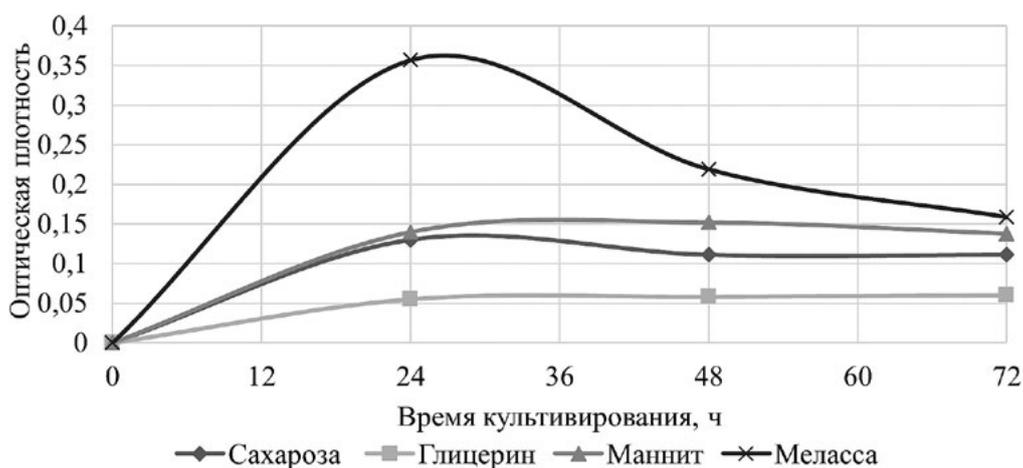
О глицерине как источнике углерода для производства биосурфактантов бациллами в литературе сложилось неоднозначное мнение. Это связано в первую очередь с тем, что не все штаммы бацилл способны к эффективному использованию этого соединения. Так, известны

штаммы *B. velezensis* BS-37 и *B. subtilis* #309, для которых отмечен хороший рост и продукция сурфактина на средах с глицерином [15, 21]. Напротив, для штамма *B. subtilis* BS5 зафиксировано слабое относительно других источников углерода накопление биомассы и низкая концентрация биосурфактантов в культуральной жидкости [9].

В нашем исследовании также получены противоречивые результаты: для штамма *B. subtilis* 1/8 отмечена продукция биосурфактантов, несмотря на самое малое количество клеток ($ОП_{600} 0,027 \pm 0,005$). Это указывает на использование глицерина данным штаммом для синтеза соединений. Штамм *B. atrophaeus* 7, несмотря на большую концентрацию клеток ($ОП_{600} 0,057 \pm 0,003$) оказался не способен к продукции биосурфактантов из данного субстрата (рисунок).



а



б

Изменение количества клеток штаммов в процессе культивирования при использовании различных источников углерода: а – *B. subtilis* 1/8; б – *B. atrophaeus* 7

Change in the cell count of strains during cultivation using different carbon sources: а – *B. subtilis* 1/8; б – *B. atrophaeus* 7

Производство биосурфактантов штаммами неодинаково в процессе их роста. Фактор времени часто играет ключевую роль. Во многих исследованиях отмечают интенсивное накопление биосурфактантов в экспоненциальной фазе роста. Рост концентрации поверхностно-активных веществ идет параллельно росту культуры до наступления стационарной фазы [3, 11]. При этом увеличение продолжительности культивирования может негативно сказываться на количестве биосурфактантов в среде. Так, Rocha et al. и Abdel-Mawgoud et al. [9, 19] указывают на падение концентрации сурфактина в культуральной жидкости после 48 ч роста для штаммов *B. subtilis*.

В данном исследовании показана аналогичная корреляция. Для штаммов отмечается снижение индекса эмульгирования через 48 ч культивирования. Исключение составляет продукция биосурфактантов штаммом *B. subtilis* 1/8 на среде с сахарозой, где максимальная эмульгирующая активность зафиксирована через 48 ч роста. Это может быть связано с особенностями утилизации данного субстрата штаммом.

Падение уровня биосурфактантов в среде при последующем культивировании связывают с его потреблением штаммами на фоне истощения питательных веществ. Помимо этого, через 48–72 ч роста начинается отмирание клеток из-за накопления метаболитов, изменения физико-хи-

мических параметров среды и недостатка питания [11, 13]. Так, на средах с мелассой для обоих исследуемых штаммов отмечается снижение количества клеток через 48 ч культивирования, что совпадает с моментом падения значений индекса эмульгирования.

ВЫВОДЫ

1. Для четырех природных штаммов бацилл была установлена продукция биосурфактантов. Из них два штамма показали значения индекса эмульгирования более 50 %.

2. Источник углерода существенно повлиял на продуктивность исследуемых штаммов. Максимальные значения E_{24} зафиксированы для штамма *B. subtilis* 1/8 при использовании мелассы в качестве единственного источника углерода.

3. Продолжительность культивирования сказалась на продукции биосурфактантов штаммами. При росте штаммов на средах с глицерином, маннитом и мелассой более 24 ч зафиксировано падение количества данного метаболита в культуральной жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта губернатора Алтайского края, соглашение № 30-2024-004271.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shleeva M.O., Kondratieva D.A., Kaprelyants A.S. *Bacillus licheniformis*: A Producer of Antimicrobial Substances, including Antimycobacterials, Which Are Feasible for Medical Applications // *Pharmaceutics*. – 2023. – Vol. 7. – P. 1893 – DOI: 10.3390/pharmaceutics15071893.
2. *Antimicrobial Bacillus*: Metabolites and Their Mode of Action / C. Tran, I. E. Cock, X. Chen [et al.] // *Antibiotics (Basel)*. – 2022. – Vol. 11. – DOI: 10.3390/antibiotics11010088.
3. *Biosurfactant from Bacillus subtilis DS03*: Properties and Application in Cleaning Out Place System in a Pilot Sausages Processing / I. Cruz Mendoza, M. Villavicencio-Vasquez, P. Aguayo [et al.] // *Microorganisms*. – 2022. – Vol. 10(8) – DOI: 10.3390/microorganisms10081518.
4. *Lipopeptide Biosurfactants from Bacillus spp.*: Types, Production, Biological Activities, and Applications in Food / N. Ali, Z. Pang, F. Wang [et al.] // *Journal of Food Quality*. – 2022. – DOI: 10.1155/2022/3930112.
5. *Harnessing the Potential of Biosurfactants for Biomedical and Pharmaceutical Applications* / C. Ceresa, L. Fracchia, A.C. Sansotera [et al.] // *Pharmaceutics*. – 2023. – Vol. 15(8). – DOI: 10.3390/pharmaceutics15082156.
6. Kumari R., Singha L.P., Shukla P. Biotechnological potential of microbial bio-surfactants, their significance, and diverse applications // *FEMS Microbes*. – 2023. – Vol. 4. – DOI: 10.1093/femsmc/xtad015.
7. *Biofilm inhibition and antimicrobial action of lipopeptide biosurfactant produced by heavy metal tolerant strain Bacillus cereus NK1* / M.I. Sriram, K. Kalishwaralal, V. Deepak [et al.] // *Colloids Surf B Biointerfaces*. – 2011. – Vol. 85(2). – P. 174–181. – DOI: 10.1016/j.colsurfb.2011.02.026.
8. *Purification and characterization of a biosurfactant produced by Bacillus subtilis in cashew apple juice and its application in the remediation of oil-contaminated soil* / A.K.N. Felix, J.J. Martins, J.G.L. Almeida [et al.] // *Colloids Surf B Biointerfaces*. – 2019. – Vol. 175. – P. 256–263. – DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.11.062.
9. Abdel-Mawgoud A.M., Aboulwafa M.M., Hassouna N.A. Optimization of surfactin production by *Bacillus subtilis* isolate BS5 // *Appl Biochem Biotechnol*. – 2008. – Vol. 150(3). – P. 305–325. – DOI: 10.1007/s12010-008-8155-x.
10. *Evaluation of Biosurfactant Production by Bacillus Species Using Glucose and Xylose as Carbon Sources* / R.S. Adindari, R. Purwadi, H. Hoerudin [et al.] // *Curr Microbiol*. – 2023. – Vol. 80. – DOI: 10.1007/s00284-023-03345-6.

11. *Biosurfactant* production by *Bacillus subtilis* SL and its potential for enhanced oil recovery in low permeability reservoirs / B. Wu, J. Xiu, L. Yu [et al.] // *Sci Rep.* – 2022. – Vol. 12. – DOI: 10.1038/s41598-022-12025-7.
12. *Production* of lipopeptide biosurfactants by *Bacillus atrophaeus* 5-2a and their potential use in microbial enhanced oil recovery / J. Zhang, Q. Xue, H. Gao [et al.] // *Microb Cell Fact.* – 2016. – Vol. 15. – DOI: 10.1186/s12934-016-0574-8.
13. *Production* of biosurfactants from vine-trimming shoots using the halotolerant strain *Bacillus tequilensis* ZSB10 / S. Cortés-Camargo, N. Pérez, R. Oliveira [et al.] // *Industrial Crops and Products.* – 2016. – Vol. 79. – P. 258–266. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.11.003.
14. *Mouafo T. H., Mbawala A., Ndjouenkeu R.* Effect of Different Carbon Sources on Biosurfactants' Production by Three Strains of *Lactobacillus* spp. // *Biomed Res Int.* – 2018. – Vol. 2018. – DOI: 10.1155/2018/5034783.
15. *Sustainable* Surfactin Production by *Bacillus subtilis* Using Crude Glycerol from Different Wastes / T. Janek, E.J. Gudiña, X. Połomska [et al.] // *Molecules.* – 2021. – Vol. 26(12). – DOI: 10.3390/molecules26123488.
16. *Sohail R., Nazia J.* Microbial Biosurfactant Screening: Diversity in Assessment Methods // *Advancements of Microbiology.* – 2023. – Vol. 62. – P. 145–155. – DOI: 10.2478/am-2023-0013.
17. *Sharma J., Sundar D., Srivastava P.* Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism // *Front Mol Biosci.* – 2021. – Vol. 8. – DOI: 10.3389/fmolb.2021.727070.
18. *Biosurfactant* and biopolymer producing microorganisms from West Kazakhstan oilfield / U. Shaimerdenova, G. Kaiyrmanova, W. Lewandowska [et al.] // *Sci Rep.* – 2024. – Vol. 14. – DOI: 10.1038/s41598-024-52906-7.
19. *Kinetic* study and characterization of surfactin production by *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 using sugarcane molasses as carbon source / P.M. Rocha, A.C. Dos Santos Mendes, S.D. de Oliveira Júnior [et al.] // *Prep Biochem Biotechnol.* – 2021. – Vol. 51(3). – P. 300–308. – DOI: 10.1080/10826068.2020.1815055.
20. *Zhang S., Wang J., Jiang H.* Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry // *Food Chem.* – 2021. – Vol. 346. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128860.
21. *Genome* and transcriptome analysis of *Bacillus velezensis* BS-37, an efficient surfactin producer from glycerol, in response to d-/l-leucine / D. Zhou, F. Hu, J. Lin [et al.] // *Microbiologyopen.* – 2019. – Vol. 8. – DOI: 10.1002/mbo3.794.

REFERENCES

1. Shleeva M.O., Kondratieva D.A., Kaprelyants A.S., *Bacillus licheniformis*: A Producer of Antimicrobial Substances, including Antimycobacterials, Which Are Feasible for Medical Applications, *Pharmaceutics*, 2023, Vol. 7, pp. 1893, DOI: 10.3390/pharmaceutics15071893.
2. Tran C., Cock I. E., Chen X. et al., Antimicrobial *Bacillus*: Metabolites and Their Mode of Action, *Antibiotics (Basel)*, 2022, Vol. 11, DOI: 10.3390/antibiotics11010088.
3. Cruz Mendoza I., Villavicencio-Vasquez M., Aguayo P. et al., Biosurfactant from *Bacillus subtilis* DS03: Properties and Application in Cleaning Out Place System in a Pilot Sausages Processing, *Microorganisms*, 2022, Vol. 10(8), DOI: 10.3390/microorganisms10081518.
4. Ali N., Pang Z., Wang F. et al., Lipopeptide Biosurfactants from *Bacillus* spp.: Types, Production, Biological Activities, and Applications in Food, *Journal of Food Quality*, 2022, DOI: 10.1155/2022/3930112.
5. Ceresa C., Fracchia L., Sansotera A.C. et al., Harnessing the Potential of Biosurfactants for Biomedical and Pharmaceutical Applications, *Pharmaceutics*, 2023, Vol. 15(8), DOI: 10.3390/pharmaceutics15082156.
6. Kumari R., Singha L.P., Shukla P., Biotechnological potential of microbial bio-surfactants, their significance, and diverse applications, *FEMS Microbes*, 2023, Vol. 4, DOI: 10.1093/femsmc/xtad015.
7. Sriram M.I., Kalishwaralal K., Deepak V. et al., Biofilm inhibition and antimicrobial action of lipopeptide biosurfactant produced by heavy metal tolerant strain *Bacillus cereus* NK1, *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2011, Vol. 85(2), pp. 174–181, DOI: 10.1016/j.colsurfb.2011.02.026.
8. Felix A.K.N., Martins J.J., Almeida J.G.L. et al., Purification and characterization of a biosurfactant produced by *Bacillus subtilis* in cashew apple juice and its application in the remediation of oil-contaminated soil, *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2019, Vol. 175, pp. 256–263, DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.11.062.
9. Abdel-Mawgoud A.M., Aboulwafa M.M., Hassouna N.A., Optimization of surfactin production by *Bacillus subtilis* isolate BS5, *Appl Biochem Biotechnol*, 2008, Vol. 150(3), pp. 305–325, DOI: 10.1007/s12010-008-8155-x.
10. Adiandri R.S., Purwadi R., Hoerudin H. et al., Evaluation of Biosurfactant Production by *Bacillus* Species Using Glucose and Xylose as Carbon Sources, *Curr Microbiol*, 2023, Vol. 80, DOI: 10.1007/s00284-023-03345-6.
11. Wu B., Xiu J., Yu L. et al., Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* SL and its potential for enhanced oil recovery in low permeability, *Sci Rep*, 2022, Vol. 12, DOI: 10.1038/s41598-022-12025-7.
12. Zhang J., Xue Q., Gao H. et al., Production of lipopeptide biosurfactants by *Bacillus atrophaeus* 5-2a and their potential use in microbial enhanced oil recovery, *Microb Cell Fact*, 2016, Vol. 15, DOI: 10.1186/s12934-016-0574-8.
13. Cortés-Camargo S., Pérez N., Oliveira R. et al., Production of biosurfactants from vine-trimming shoots using the halotolerant strain *Bacillus tequilensis* ZSB10, *Industrial Crops and Products*, 2016, Vol. 79, pp. 258–266, DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.11.003.

14. Mouafo T.H., Mbawala A., Ndjouenkeu R., Effect of Different Carbon Sources on Biosurfactants' Production by Three Strains of *Lactobacillus* spp., *Biomed Res Int*, 2018, Vol. 2018, DOI: 10.1155/2018/5034783.
15. Janek T., Gudiña E.J., Połomska X. et al., Sustainable Surfactin Production by *Bacillus subtilis* Using Crude Glycerol from Different Wastes, *Molecules*, 2021, Vol. 26(12), DOI: 10.3390/molecules26123488.
16. Sohail R., Nazia J., Microbial Biosurfactant Screening: Diversity in Assessment Methods, *Advancements of Microbiology*, 2023, Vol. 62, pp. 145–155, DOI: 10.2478/am-2023-0013.
17. Sharma J., Sundar D., Srivastava P., Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism, *Front Mol Biosci*, 2021, Vol. 8, DOI: 10.3389/fmolb.2021.727070.
18. Shaimerdenova U., Kaiyrmanova G., Lewandowska W. et al., Biosurfactant and biopolymer producing microorganisms from West Kazakhstan oilfield, *Sci Rep*, 2024, Vol. 14, DOI: 10.1038/s41598-024-52906-7.
19. Rocha P.M., Dos Santos Mendes A.C., de Oliveira Júnior S.D. et al., Kinetic study and characterization of surfactin production by *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 using sugarcane molasses as carbon source, *Prep Biochem Biotechnol*, 2021, Vol. 51(3), pp. 300–308, DOI: 10.1080/10826068.2020.1815055.
20. Zhang S., Wang J., Jiang H., Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry, *Food Chem*, 2021, Vol. 346, DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128860.
21. Zhou D., Hu F., Lin J. et al., Genome and transcriptome analysis of *Bacillus velezensis* BS-37, an efficient surfactin producer from glycerol, in response to d-/l-leucine, *Microbiologyopen*, 2019, Vol. 8, DOI: 10.1002/mbo3.794.

Информация об авторах:

Д.Е. Дудник, аспирант ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»
 А.Н. Иркитова, кандидат биологических наук, доцент
 А.В. Малкова, кандидат биологических наук
 Е.Н. Кожевникова, лаборант-исследователь

Contribution of the authors:

D.E. Dudnik, Postgraduate Student
 A.N. Irkitova, Candidate of Biological Science
 A.V. Malkova, Candidate of Biological Science
 E.N. Kozhevnikova, Laboratory assistant

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.