

БИОТЕХНОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

DOI: 10.15593/2224-9400/2025.3.01
УДК 577.114

Научная статья

К.К. Стельмах, Ф.А. Прищепов

Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Российская Федерация

П.Ю. Мильман

Уфимский институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Российская Федерация

БАКТЕРИИ РОДА *Pantoea*, СПОСОБНЫЕ СИНТЕЗИРОВАТЬ ЭКЗОПОЛИСАХАРИД ГАЛАКТАНОВОГО ТИПА

В ходе поиска новых микроорганизмов-продуцентов экзополисахаридов (ЭПС) был проведен скрининг образцов с поверхности листьев капусты (*Brassica oleracea*), выделен новый бактериальный штамм KR24. На основании культурально-морфологических (грамотрицательные подвижные палочки, образующие слизистые колонии желтого цвета) и физиолого-биохимических признаков (каталазоположительный, оксидазоотрицательный факультативный анаэроб, не способный к гидролизу крахмала), а также филогенетического анализа последовательности 16S рРНК полученный штамм был идентифицирован как представитель рода *Pantoea*. Последовательность гена задепонирована в базе данных GenBank под номером PQ771671.1. Продукция экзополисахарида при оптимизации компонентов питательной среды и условий культивирования составила 3–5 г/л (на жидкой питательной среде, содержащей 4 % мелассы в качестве единственного источника углерода). Молекулярная масса, определенная с использованием вискозиметрического метода и уравнения Марка–Хаувинка–Куна, составила приблизительно 30 кДа. Полисахаридная природа полученного биополимера подтверждена ИК-спектроскопией, выявлены характерные полосы поглощения для ОН-групп, гликозидных связей и пиранозных колец, включая сигнал, специфичный для β-гликозидных связей. Характеристика кислотных гидролизатов, проведенная с помощью тонкослойной хроматографии и метода капиллярного электрофореза, показала, что полученный экзополисахарид представляет собой гомополимер галактозы. Данный результат представляет значительный интерес, так как известные гомополисахариды бактерий рода *Pantoea* состоят из остатков глюкозы или фруктозы, а галактоза до настоящего времени обнаруживалась только в составе гетерополисахаридов; выделенный же в данной

работе штамм KR24 продуцирует гомополимер галактозы. Таким образом, штамм *Pantoea* sp. KR24, продуцирующий гомогалактан, представляет перспективный объект для фундаментальных и прикладных исследований в области биотехнологии бактериальных экзополисахаридов.

Ключевые слова: бактерии, идентификация, род *Pantoea*, экзополисахарид, мономерный состав.

K.K. Stelmakh, F.A. Prishchepov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

P.Yu. Milman

Institute of Biology of Ufa Federal Research Centre of the RAS,
Ufa, Russian Federation

BACTERIA OF THE GENUS PANTOEAE CAPABLE OF SYNTHESIZING GALACTAN-TYPE EXOPOLYSACCHARIDE

*In the course of the search for new microorganisms producing exopolysaccharides (EPS), samples from the surface of cabbage (*Brassica oleracea*) leaves were screened and a new bacterial strain KR24 was isolated. Based on cultural-morphological (gram-negative motile rods forming yellow mucous colonies) and physiological-biochemical characteristics (catalase-positive, oxidase-negative facultative anaerobe incapable of starch hydrolysis), as well as phylogenetic analysis of the 16S rRNA sequence, the obtained strain was identified as a representative of the genus *Pantoea*. The gene sequence was deposited in the GenBank database under number PQ771671.1. Exopolysaccharide production with optimization of nutrient medium components and cultivation conditions was 3-5 g/l (on a liquid nutrient medium containing 4% molasses as the only carbon source). The molecular weight determined using the viscosimetric method and the Mark-Houwink-Kuhn equation was approximately 30 kilodaltons. The polysaccharide nature of the obtained biopolymer was confirmed by IR spectroscopy; characteristic absorption bands for OH groups, glycosidic bonds and pyranose rings, including a signal specific for β -glycosidic bonds, were revealed. Characterization of acid hydrolysates carried out using thin-layer chromatography and capillary electrophoresis showed that the obtained exopolysaccharide is a galactose homopolymer. This result is of considerable interest, since the known homopolysaccharides of bacteria of the genus *Pantoea* consist of glucose or fructose residues, and galactose has hitherto been found only in the composition of heteropolysaccharides; strain KR24 produces a galactose homopolymer. Thus, strain *Pantoea* sp. KR24, which produces homogalactan, is a promising object for fundamental and applied research in the field of biotechnology of bacterial exopolysaccharides.*

Keywords: bacteria, identification, genus *Pantoea*, exopolysaccharide, monomeric composition

Экзополисахариды (ЭПС) представляют собой высокомолекулярные полимеры, исполняющие роль источника энергии, регуляторов специфических биохимических процессов, барьера между клеткой и окружающей средой. Благодаря своим многочисленным полезным свойствам, экзополисахариды нашли применение в медицине, пищевой, косметической, нефтедобывающей промышленности [1].

Спектр областей, в которых применение ЭПС имеет значительный потенциал, продолжает расширяться. В последние годы активно исследуется возможность применения экзополисахаридов в биомедицине, главным образом в тканевой инженерии и фармацевтике [2].

Широкое применение нашли такие микробные полисахариды, как ксантан, гиалуроновая кислота, альгинат, леван, декстран, бактериальная целлюлоза и др. [3].

Большой интерес представляют уникальные природные гетерополисахариды – галактаны, содержащиеся в растениях (красные морские водоросли, семена люпина, кожура цитрусовых и др.), а также синтезируемые микроорганизмами. Наиболее известные представители гетерополисахаридов – агар и каррагинан. Галактаны растительного происхождения находят применение в пищевой промышленности в качестве пребиотика для стимуляции роста кишечной микробиоты или стабилизатора для йогуртов и соусов [4]; в фармацевтической промышленности в качестве средства доставки лекарств [5].

Стоит отметить, что на производство растительных полисахаридов существенное влияние оказывает сезонный и климатический фактор. Кроме того, структура растительных полисахаридов может быть неоднородной за счет большого числа внешних факторов. В случае же микробных полисахаридов эти недостатки минимизируются [6]. Также можно использовать в качестве субстратов отходы различных производств, например: свекловичный жом, мелассу, фруктовые отжимки, лигноцеллюлозную биомассу, сырную сыворотку [7]. Это дополнительно повышает рентабельность производства бактериальных ЭПС по сравнению с растительными.

Данная работа посвящена поиску, выделению и идентификации новых штаммов бактерий, способных синтезировать экзополисахариды с уникальными физико-химическими свойствами.

Экспериментальная часть. Для получения накопительных культур образцы почвы и частей растений вносили в колбы с полусинтетической жидкой средой следующего состава (г/л): сахароза – 20; KH_2PO_4 – 3; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 1,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,3; дрожжевой экстракт – 3 [8].

Режим стерилизации сред: 121 °С в течение 30 мин.

Для выделения чистых культур микроорганизмов использовали среду того же состава с добавлением агар-агара в концентрации 20 г/л.

Культурально-морфологические и физиолого-биохимические свойства штамма изучали, руководствуясь методическими рекомендациями по идентификации микроорганизмов [9].

Филогенетическое положение исследуемого штамма устанавливали на основе сравнительного анализа последовательности гена 16S рРНК. Секвенирование осуществлялось на автоматическом секвенаторе Нанофор 05 («Синтол», Россия) согласно рекомендациям производителя с применением набора реактивов «GenSeq-100» («Синтол», Россия). Анализ гомологии последовательности гена 16S рРНК проводили с помощью Ribosomal Database Project при использовании международной базы данных GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Множественное выравнивание и филогенетический анализ полученных нуклеотидных последовательностей проводили с использованием программы MEGA11 (<http://www.megasoftware.net>). Филогенетическое дерево построено методом присоединения ближайших соседей (Neighbor-Joining), показатель бутстрепанализа соответствовал не менее чем 1000 альтернативным деревьям.

Для исследования способности образовывать полисахариды, использовали среду следующего состава (г/л): пептон – 2, K_2HPO_4 – 2, NaCl – 2, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,4, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,01, меласса – 20–80 [9].

Биосинтез ЭПС проводили на шейкере-инкубаторе ES-20/60 («Biosan», Латвия) в течение 72–120 ч при температуре 30 °С и скорости перемешивания 150 об/мин.

Кинематическую вязкость культуральной жидкости определяли стандартным методом с использованием стеклянного капиллярного вискозиметра ВПЖ-2 (Россия) [10].

Молекулярную массу полученного ЭПС оценивали методом капиллярной вискозиметрии с использованием уравнения Марка–Хаувинка–Куна.

Для определения количества образовавшегося ЭПС сначала производили центрифугирование культуральной жидкости в течение 30 мин и 10 000 об/мин, полученный супернатант осаждали двумя объемами 96 % этанола, выдерживали сутки при 4 °С и высушивали до постоянной массы.

Для анализа моносахаридного состава полученного экзополисахарида проводили кислотный гидролиз ЭПС в автоклаве с 2М H_2SO_4 , 121 °С, 30 мин) [12].

Качественное и количественное определение сахаров в гидролизатах осуществляли с помощью системы капиллярного электрофореза «Капель-105М» («Люмэкс», Россия), включающей кварцевый капилляр с внутренним диаметром 50 мкм (эффективная длина капилляра – 65 см, общая – 75 см), встроенный УФ-спектрофотометрический детектор с длиной волны от 190 до 380 нм и источник высокого напряжения переменной полярности. Регистрацию и обработку электрофореграмм проводили с помощью программного обеспечения Elforun (Россия). Концентрация сахаров была определена по калибровочной кривой с использованием стандартных растворов моно- и дисахаридов (0,05–0,5 %).

ИК-спектры в интервале частот $600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ записывали на приборе IR Prestige-21 (Fourier Transform Spectrophotometer – Shimadzu, Япония) в вазелиновом масле.

Результаты и их обсуждение. Полученный в ходе скрининга штамм KR24, выделенный с поверхности листа капусты (*Brássica olerácea*), демонстрирующего типичные симптомы бактериального ожога, включая пятна на листьях и водянистые поражения, представлял собой подвижные грамотрицательные бактериальные палочки размером $0,5\text{--}1,0 \times 1,0\text{--}3,0$ мкм. На агаризованных питательных средах, содержащих сахарозу и глюкозу, образовывал слизистые колонии желтого цвета, не образовывал споры (на третьи сутки культивирования). Выделенный штамм являлся каталазаположительным и оксидазоотрицательным факультативным анаэробом. Не гидролизировал крахмал. Исследуемый штамм рос на глюкозе, сахарозе, глицерине, фруктозе, мелассе.

По данным анализа нуклеотидных последовательностей гена 16S рРНК штамма KR24 построено филогенетическое древо с типовыми штаммами бактерий рода *Pantoea* (рис. 1).

Таким образом, на основании полученных результатов исследуемый штамм был идентифицирован как *Pantoea sp.* KR24. Нуклеотидная последовательность гена 16S рРНК задепонирована в международной базе данных GenBank под номером PQ771671.1.

Ранее нами была проведена оптимизация состава питательной среды и условий культивирования с целью повышения выхода экзополисахарида [13]. Максимальная вязкость культуральной жидкости составила $3,57\text{ мм}^2/\text{с}$. Выход экзополисахарида составлял 3–5 г/л.

Определение молекулярной массы полученного ЭПС проводили вискозиметрически, используя уравнение Марка–Куна–Хаувинка. Значение молекулярной массы составило ~ 30 кДа.

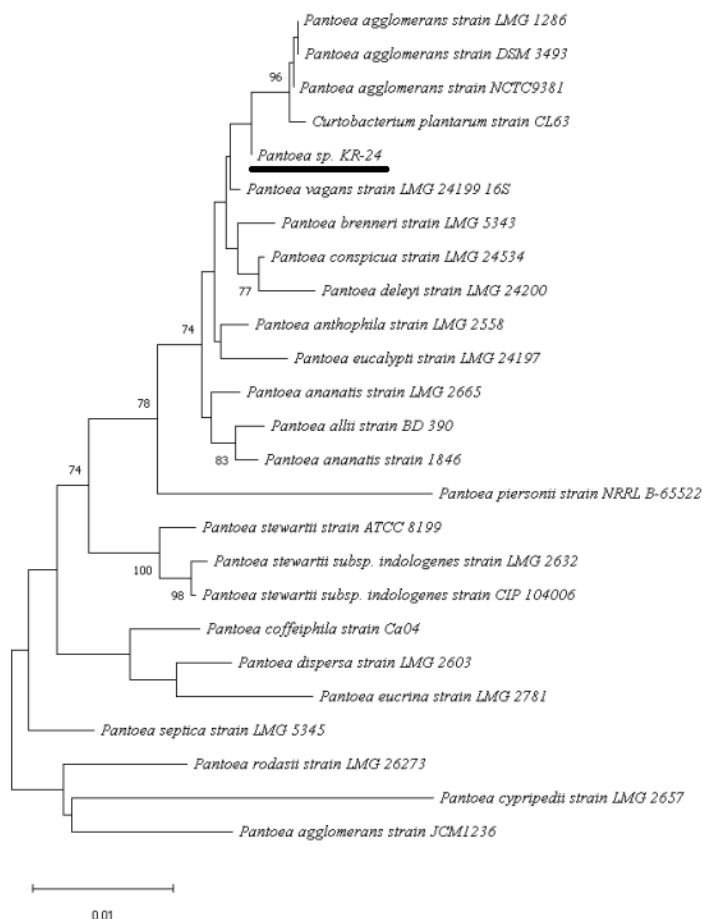


Рис. 1. Филогенетическое древо (метод Neighbor-Joining) на основе сравнительного анализа гена 16S рПНК штамма KR24 и гомологичных последовательностей типовых видов бактерий рода *Pantoea*

На рис. 2 показан ИК-спектр выделенного ЭПС. Широкая полоса поглощения в области 3181,72–3507,70 см^{-1} соответствует валентным колебаниям -ОН групп. Полосы поглощения в области 1016,53–1151,55 см^{-1} свидетельствуют о наличии асимметричных валентных колебаниях эфирной связи C1-O-C4, с одним атомом углерода, входящим в пиранозное кольцо, и вторым атомом, образующим связь с гликозидным гидроксилом. Наличие полосы поглощения при частоте 940,34 см^{-1} характеризует деформационные колебания связи C-H у первого углеродного атома пиранозного кольца, т.е. наличие β -гликозидной связи [14]. Таким образом, ИК-спектр полученного биополимера содержит характерные для полисахаридов функциональные группы.

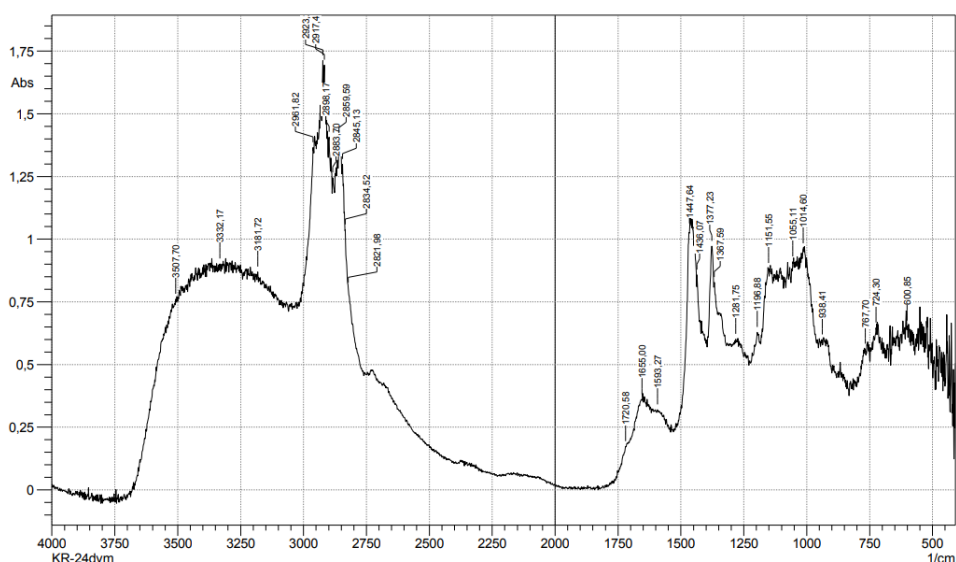


Рис. 2. ИК-спектр экзополисахарида *Pantoea* sp. KR24

Анализ электрофореграммы гидролизованного ЭПС, продуцируемого исследуемой бактерией из мелассы, выявил наличие только одного моносахарида, галактозы в концентрации 0,1742 %. Учитывая, что мономером ЭПС является только галактоза, его можно отнести к гомополисахаридам.

В таблице приведено сравнительное описание экзополисахаридов, образованных штаммами *Pantoea* (литературных и экспериментальных).

Сравнение экзополисахаридов, образованных штаммами *Pantoea*

Штамм	Источник выделения	Состав ЭПС	Молекулярная масса, Да	Ссылка
<i>Pantoea agglomerans</i> ZMR7	Ризосферная почва кукурузы, Ирак	Гомополимер фруктозы	Нет данных	[15]
<i>Pantoea</i> sp. BM39	Отложения Тирренского моря	Гомополимер глюкозы	$8,3 \cdot 10^5$	[16]
<i>Pantoea</i> sp. YU16-S3	Прибрежные зоны Аравийского моря	Глюкоза:галактоза: N-ацетилгалактоза-мин:глюкозамин	$1,75 \cdot 10^5$	[17]
<i>Pantoea alhagi</i> NX-11	Ризосфера морского риса, Китай	Галактоза:глюкоза:глюкозамин: глюкуроновая кислота:манноза	$>10^6$	[18]
<i>Pantoea</i> sp. BCCS 001 GH	Плоды нектарина, Иран	Глюкоза: галактоза	$2,5 \cdot 10^6$	[19]

Окончание таблицы

Штамм	Источник выделения	Состав ЭПС	Молекулярная масса, Да	Ссылка
<i>Pantoea Agglomerans</i> KFS-9	Мангровый лес, Китай	Арабиноза:глюкоза: галактоза: глюкуроновая кислота	$7,6 \cdot 10^5$	[20]
<i>Pantoea</i> sp. KR24	Лист капусты, Россия	Гомополимер галактозы	$3 \cdot 10^4$	Данная работа

Как видно из таблицы, упоминаемые в литературе гомополисахариды, синтезируемые в ходе культивирования бактерий *Pantoea* представлены фруктанами и глюканами, т.е. состоят из звеньев фруктозы или глюкозы. Галактоза встречается лишь в гетерополисахаридах, как упомянуто выше, поэтому выделенный штамм *Pantoea* sp. KR24 и синтезируемый им полисахарид представляет интерес для дальнейших исследований.

Таким образом, в ходе исследования с поверхности листа капусты выделен штамм *Pantoea* sp. KR24, образующий экзополисахарид молекулярной массой $3 \cdot 10^4$ Да. Выход по сухому веществу составляет 3–5 г/л. На основании мономерного состава можно предположить, что данный полисахарид относится к классу галактанов.

Список литературы

1. Mouro, C. Microbial Exopolysaccharides: Structure, Diversity, Applications, and Future Frontiers in Sustainable Functional Materials / C. Mouro, A.P. Gomes, I.C. Gouveia // Polysaccharides. – 2024. – Vol. 5, no. 18. – P. 241–287.
2. Oliveira, J.M. Polysaccharides of Microbial Origin / J.M. Oliveira, H. Radhouani, R.L. Reis. – Springer, 2022. – 1292 p.
3. Ревин, В.В. Биотехнология бактериальных экзополисахаридов / В.В. Ревин, Е.В. Лияськина. – Саранск: Изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 2019. – 192 с.
4. Аюрова, О.Ж. Высокомолекулярные соединения и материалы для пищевой промышленности / О.Ж. Аюрова, Л.А. Максанова. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2019. – 218 с.
5. Применение природных полисахаридов в фармацевтике / М.В. Хвостов, Т.Г. Толстикова, С.А. Борисов, А.В. Душкин // Биоорганическая химия. – 2019. – Т. 45, № 6. – С. 563–575.
6. Barcelos, C.S. Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides / C.S. Barcelos, A.C. Vespermann, F.M. Pellissari // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 60, no. 9. – P. 1475–1495.
7. Хусаинов, И.А. Тенденции развития производства бактериальных полисахаридов / И.А. Хусаинов, З.А. Канарская // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 6. – С. 208–212.

8. Screening of local wild-type *Xanthomonas* spp. for xanthan biosynthesis using media with different carbon sources / I. Zahović, J. Dodić, S. Markov, J. Grahovac, M. Grahovac, Z. Trivunović // *Romanian Biotechnological Letters*. – 2021. – Vol. 26, no. 4. – P. 2800–2807.
9. Goszczynska, T. Introduction to Practical Phytobacteriology: A Manual for Phytobacteriology / T. Goszczynska, S. Serfontein, J.J. Serfontein // ARC – Plant Protection Research Institute, 1999. – 83 p.
10. Выделение и характеристика штамма *Pantoea cyripedii* 4A, продуцирующего высокомолекулярный экзополисахарид / О.И. Сазонова, А.А. Ветрова, А.Б. Гафаров, М.В. Шарова, С.Л. Соколов // *Health, Food & Biotechnology*. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 70–80.
11. Демьяновский, В.Б. Определение вязкости на вискозиметрах свободного истечения в нефтегазодобыче [Электронный ресурс] / В.Б. Демьяновский // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2018. – Т. 20, № 1. – URL: <https://clck.ru/3M4twT> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Стасенко, А.И. Изучение влияния адаптации бактерий *Xanthomonas campestris* к окислительному стрессу на биосинтез ксантановой камеди / А.И. Стасенко, М.В. Романова, А.В. Белодед // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2022. – № 12. – С. 118–121.
13. Стельмах, К.К. Оптимизация состава питательной среды и условий культивирования экзополисахарида бактерий рода *Pantoea* / К.К. Стельмах, Ф.А. Прищепов // *Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии: материалы XVIII Всерос. науч. интернет-конф.* – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024. – 79 с.
14. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант, Р. Данц, Б. Киммер, Р. Шмольке. – М.: Химия, 1976. – 472 с.
15. Bioactive Levan-Type Exopolysaccharide Produced by *Pantoea agglomerans* ZMR7: Characterization and Optimization for Enhanced Production / S.A.S. Al-Qaysi, H. Al-Haideri, S.M. Al-Shimmary, J.M. Abdulhameed, O.I. Alajrawy, M.M. Al-Halbosiy, T.A. Moussa, M.G. Farahat // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 31, no. 5. – P. 696–704.
16. Physiologic and metabolic characterization of a new marine isolate (BM39) of *Pantoea* sp. producing high levels of exopolysaccharide / S. Silvia, P. Barghini, A. Aquilanti, B. Juarez-Jimenez, M. Fenice // *Microbial Cell Factories*. – 2013. – Vol. 12, no. 1. DOI: 10.1186/1475-2859-12-10
17. Sahana, T.A. Novel exopolysaccharide from marine bacterium *Pantoea* sp. YU16-S3 accelerates cutaneous wound healing through Wnt/ β -catenin pathway / T.A. Sahana, R.D. Rekha // *Carbohydrate Polymers*. – 2020. – Vol. 238, no. 3. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116191
18. Structure characterization, antioxidant and emulsifying capacities of exopolysaccharide derived from *Pantoea alhagi* NX-11 / L. Sun, Y. Yang, P. Lei, Sh. Li, H. Xu, R. Wang, Y. Qiu, W. Zhang // *Carbohydrate Polymers*. – 2021. – Vol. 261, no. 1. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.117872

19. Biosynthesis of exopolysaccharide from waste molasses using *Pantoea* sp. BCCS 001 GH: a kinetic and optimization study / S.V. Niknezhad, S. Kianpour, S. Jafarzadeh, M. Alishahi, G.N. Darzi, M.H. Morowvat, Y. Ghasemi, A. Shavandi // *Scientific Reports* – 2022. – Vol. 12, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-022-14417-1

20. Structure and protective effect of exopolysaccharide from *P. Agglomerans* strain KFS-9 against UV radiation / H. Wang, X. Jiang, H. Mu, X. Liang, H. Guan // *Microbiological Research*. – 2007. – Vol. 162, no. 2. – P. 124–129.

References

1. Mouro C., Gomes A.P., Gouveia I.C. Microbial Exopolysaccharides: Structure, Diversity, Applications, and Future Frontiers in Sustainable Functional Materials. *Polysaccharides*, 2024, vol. 5, no. 18, pp. 241–287.

2. Oliveira J.M., Radhouani H., Reis R. L. Polysaccharides of Microbial Origin. Springer, 2022, 1292 p.

3. Revin V.V., Lijas'kina E.V. Biotehnologija bakterial'nyh jekzopolisaharidov [Biotechnology of bacterial exopolysaccharides]. Saransk: MGU im. N.P. Ogareva, 2019, 192 p.

4. Ajurova O.Zh., Maksanova L.A. Vysokomolekuljarnye soedinenija i materialy dlja pishhevoj promyshlennosti [High-molecular compounds and materials for the food industry]. Izdatel'stvo Jurajt, 2019, 218 p.

5. Khvostov M.V., Tolstikova T.G., Borisov S.A., Dushkin A.V. [Prime-nenie prirodnykh polisakharidov v farmatsevtike] Application of natural polysaccharides in pharmaceuticals. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2019, vol. 45, no. 6, pp. 438–450.

6. Barcelos, C.S., Vespermann A.C., Pelissari F.M. Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, vol. 60, no.9, pp. 1475–1495.

7. Husainov I.A., Kanarskaja Z.A. Tendencii razvitiya proizvodstva bakterial'nyh polisaharidov [Trends in the development of bacterial polysaccharide production]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 6, pp. 208–212.

8. Zahović I., Dodić J., Markov S., Grahovac J., Grahovac M., Trivunović Z. Screening of local wild-type *Xanthomonas* spp. for xanthan biosynthesis using media with different carbon sources. *Romanian Biotechnological Letters*, 2021, vol. 26, no. 4, pp. 2800–2807.

9. Goszczynska T., Serfontein S., Serfontein J.J. Introduction to Practical Phytobacteriology: A Manual for Phytobacteriology – ARC - Plant Protection Research Institute, 1999, 83 p.

10. Sazonova O.I., Vetrova A.A., Gafarov A.B., Sharova M.V., Sokolov S.L. Vydelenie i harakteristika shtamma *Pantoea cypripedii* 4A, producirujushhego vysokomolekuljarnyj jekzopolisaharid [Isolation and characterization of *Pantoea cypripedii* strain 4A producing high molecular weight exopolysaccharide]. *Health, Food & Biotechnology*, 2020, vol.2, no. 4, pp. 70–80.

11. Dem'janovskij, V.B. Opredelenie vjazkosti na viskozimetrah svobodnogo istechenija v neftegazodobyche [Determination of viscosity on free-flow vis-

cometers in oil and gas production]. *Aktual'nye problemy nefti i gaza*, 2018, vol. 20, no. 1 URL: <https://clck.ru/3M4twT>

12. Stasenko A.I., Romanova M.V., Beloded A.V. Izuchenie vlijanija adaptacii bakterij *Xanthomonas campestris* k okislitel'nomu stressu na biosintez ksantanol'noj kamedy [Study of the effect of adaptation of *Xanthomonas campestris* bacteria to oxidative stress on the biosynthesis of xanthan gum]. *Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii*, 2022, no.12, pp. 118–121.

13. Stel'makh K. K., Prishhepov F. A. Optimizacija sostava pitatel'noj sredy i uslovij kul'tivirovanija jekzopolisaharida bakterij roda *Pantoea* [Optimization of the composition of the nutrient medium and conditions for culturing exopolysaccharide of bacteria of the genus *Pantoea*]. Integracija nauki i vysshego obrazovanija v oblasti bio- i organicheskoj himii i biotehnologii; materialy XVIII Vserossijskoj nauchnoj internet-konferencii. Ufa: UNPC «Izd-vo UGNTU», 2024, pp. 79.

14. Dehant I., Danc R., Kimmer B., Schmolke R. Infrared Spectroscopy of Polymers. [Russian translation] . Moscow, Himija, 1976, 472 p.

15. Al-Qaysi S.A.S., Al-Haideri H., Al-Shimmary S.M., Abdulhameed J.M., Alajrawy O.I., Al-Halbosi M.M., Moussa T.A., Farahat M.G. Bioactive Levan-Type Exopolysaccharide Produced by *Pantoea* agglomerans ZMR7: Characterization and Optimization for Enhanced Production. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 696–704.

16. Silvia S., Barghini P., Aquilanti A., Juarez-Jimenez B., Fenice M. Physiologic and metabolic characterization of a new marine isolate (BM39) of *Pantoea* sp. producing high levels of exopolysaccharide. *Microbial Cell Factories*, 2013, vol. 12, no. 1. DOI: <http://doi.org/10.1186/1475-2859-12-10>

17. Sahana T.A., Rekha R.D. Novel exopolysaccharide from marine bacterium *Pantoea* sp. YU16-S3 accelerates cutaneous wound healing through Wnt/ β -catenin pathway // *Carbohydrate Polymers*, 2020, vol. 238, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116191>

18. Sun L., Yang Y., Lei P., Li Sh., Xu H., Wang R., Qiu Y., Zhang W. Structure characterization, antioxidant and emulsifying capacities of exopolysaccharide derived from *Pantoea alhagi* NX-11. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 261, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117872>

19. Niknezhad S. V., Kianpour S., Jafarzadeh S., Alishahi M., Darzi G. N., Morowvat M. H., Ghasemi Y., Shavandi A. Biosynthesis of exopolysaccharide from waste molasses using *Pantoea* sp. BCCS 001 GH: a kinetic and optimization study. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14417-1>

20. Wang H., Jiang X., Mu H., Liang X., Guan H. Structure and protective effect of exopolysaccharide from *P. Agglomerans* strain KFS-9 against UV radiation. *Microbiological Research*, 2007, vol. 162, no. 2, pp. 124–129.

Об авторах

Стельмах Кирилл Константинович (Уфа, Российская Федерация) – аспирант кафедры биохимии и технологии микробиологических производств Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: kstelmakh02@mail.ru).

Прищепов Федор Александрович (Уфа, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры биохимии и технологии микробиологических производств Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, e-mail: prifer-al@yandex.ru).

Мильман Полина Юрьевна (Уфа, Российская Федерация) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной микробиологии Уфимского института биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН (450054, г. Уфа, пр. Октября, 69; e-mail: millinariya@yandex.ru).

About the authors

Kirill K. Stelmakh (Ufa, Russian Federation) – Postgraduate student of the Department of Biochemistry and Technology of Microbiological Production of the Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064; e-mail: kstelmakh02@mail.ru).

Fedor A. Prishchepov (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate professor of the Department of Biochemistry and Technology of Microbiological Production of the Ufa State Petroleum Technological University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064; e-mail: priferal@yandex.ru).

Polina Yu. Milman (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Applied Microbiology of the Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (69, Ave. Oktyabrya, Ufa, 450054; e-mail: millinariya@yandex.ru).

Поступила: 19.06.2025

Одобрена: 25.06.2025

Принята к публикации: 25.07.2025

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Стельмах, К.К. Бактерии рода *Pantoea*, способные синтезировать экзополисахарид галактоанового типа / К.К. Стельмах, Ф.А. Прищепов, П.Ю. Мильман // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2025. – № 3. – С. 5–16.

Please cite this article in English as:

Stelmakh K.K., Prishchepov F.A., Milman P.Yu. Bacteria of the genus *Pantoea* capable of synthesizing galactan-type exopolysaccharide. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2025, no. 3, pp. 5-16 (*In Russ*).