

**АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ МОЛЕКУЛ
БАКТЕРИЙ РОДА *LACTOBACILLUS* (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**© Байракова А.Л.¹, Зубкова Е.С.¹, Миронов А.Ю.^{1,2}¹ **Московский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии имени
Г.Н. Габричевского (МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского)**

Россия, 125212, г. Москва, ул. Адмирала Макарова, д. 10

² **Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи
и медицинских технологий (ФНКЦ)**

Россия, 115682, г. Москва, Ореховый бул., д. 28

Данный обзор посвящен анализу биологической роли и терапевтического потенциала трех ключевых компонентов клеточной стенки и метаболитов микроорганизмов рода *Lactobacillus*: экзополисахаридов (EPS), биосурфактантов (BS) и липотейхоевых кислот (LTA). Род *Lactobacillus*, обладающий статусом GRAS (общепризнанной безопасностью), широко применяется в медицине и пищевой промышленности благодаря своим пробиотическим свойствам, однако механизмы его защитного действия до сих пор активно изучаются.

В работе систематизированы данные о функциональных свойствах EPS, которые демонстрируют широкий спектр активности: от антиоксидантной и противоопухолевой до иммуномодулирующей и антибиопленочной. Показано, что EPS различных штаммов эффективны против *Helicobacter pylori*, ротавирусов и ряда грамотрицательных патогенов, подавляют факторы вирулентности, такие как виолацеин и пиоцианин. Особо подчеркивается, что функциональность EPS критически зависит от условий культивирования и молекулярной массы.

Второй компонент – биосурфактанты – представляют собой амфифильные соединения, обладающие выраженной антиадгезивной и антимикробной активностью. Согласно приведенным данным, BS эффективно снижают биопленкообразование таких патогенов, как *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus* и *Streptococcus mutans*, а также проявляют противовирусную активность в отношении вируса Эпштейна-Барр. Третий компонент, липотейхоевая кислота, играет ключевую роль в иммуномодуляции, подавляя провоспалительные цитокины, и препятствует адгезии кариесогенных бактерий и энтеротоксигенной *E. coli*.

В заключение сделан вывод, что EPS, BS и LTA являются перспективными агентами для создания новых антибиопленочных и терапевтических средств. Однако отмечается, что многие исследования проведены *in vitro* и не полностью отражают условия *in vivo*, что требует дальнейшего изучения для расширения сфер применения лактобацилл в медицине и биотехнологии.

Ключевые слова: *Lactobacillus*; поверхностно-активные молекулы; экзополисахариды (EPS); биосурфактанты (BS); липотейхоевые кислоты (LTA).

Байракова Александра Львовна – вед. науч. сотрудник Исследовательского центра по изучению бактериальной инфекции, МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского, г. Москва. ORCID iD: 0000-0001-9289-0765. E-mail: alexandrabl@mail.ru

Зубкова Екатерина Сергеевна – науч. сотрудник, руководитель Исследовательского центра пробиотических препаратов, МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского, г. Москва. ORCID iD: 0009-0007-1843-4754. E-mail: zubkova@gabrlich.ru (автор, ответственный за переписку).

Миронов Андрей Юрьевич – д-р мед. наук, профессор, гл. науч. сотрудник Исследовательского центра по изучению дифтерии, коклюша и столбняка, МНИИЭМ им. Г.Н. Габричевского, г. Москва; профессор кафедры клинической лабораторной диагностики и патологической анатомии Академии постдипломного образования, ФНКЦ, г. Москва. ORCID iD: 0000-0002-8544-5230. E-mail: andy.60@mail.ru

Род *Lactobacillus* представляет неоднородную группу грамположительных бактерий, включающую более 135 видов и 27 подвидов, классификация которых постоянно пересматривается [1]. Данные литературы указывают на то, что использование *Lactobacillus* безопасно, поскольку нежелательная реакция встречается крайне редко и только у предрасположенных к ней лиц [2]. Благодаря статусу «общепризнанной безопасности» (Generally Recognized as Safe), установленному управлением по контролю за продуктами питания и лекарственной продукцией (Food and Drug Administration – FDA), лактобациллы широко используются в медицине, пищевой, фармацевтической промышленности, имеют особый

статус применения в клинической медицине [3]. Их фенотипические свойства, как облигатная и факультативная способность к гомо- и гетероферментации, играют решающую роль в производстве кисломолочных продуктов [4]. Примером может служить использование *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* вместо *Streptococcus thermophilus* в качестве закваски при производстве йогуртов, сыров [5, 6]. В последние годы все больше внимания уделяется роли *Lactobacillus* spp. в предотвращении колонизации и развития оппортунистических инфекций [7]. Подтверждено, что прием пробиотических препаратов в достаточном количестве приносит пользу за счет восстановления микробиоценоза [8]. Наряду с лекарствен-

ным подтверждено пробиотическое действие фармацевтических препаратов, содержащих в составе *Lactobacillus*, в отношении УПМ, присутствующей в желудочно-кишечном тракте, полости рта, влагалище, на эпидермисе и других локусах организма [9-12].

Сформулировано множество гипотез о механизмах, лежащих в основе пробиотического действия *Lactobacillus*. К ним относятся конкуренция за колонизацию, модуляция иммунного ответа хозяина, выработка и секреция лактазы, гидролазы желчных солей, органических кислот и антимикробных соединений [13, 14]. Считается, что свойства *Lactobacillus* обусловлены поверхностно-активными молекулами [15] – к ним относится разнообразная группа поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые классифицируются по химическому составу и микробному происхождению: гликолипиды, липопептиды, полисахарид-белковые комплексы, белковоподобные вещества, липополисахариды, фосфолипиды, жирные кислоты, нейтральные липиды. Предполагается, что различные группы обладают разными свойствами, выполняя разные физиологические функции в организмах-продуцентах. Во многом защитная роль *Lactobacillus* обусловлена такими компонентами, как экзополисахариды (EPS), биосурфактанты (BS), липотейхоевые кислоты (LTA).

1. *Экзопполисахариды*. К EPS относятся высокомолекулярные биоразлагаемые углеводные полимеры – гетерополисахариды, которым уделяется все большее внимание из-за способности оказывать положительное влияние на здоровье человека [16]. EPS различных видов *Lactobacillus* обладают многочисленными доказанными свойствами – антиоксидантным, противоопухолевым, противоязвенным и другими действиями. Сообщается об антиатеросклеротическом, противораковом, противовирусном, противогрибковом, иммуномодулирующем и пребиотических свойствах [17-19]. Очищенный внеклеточный EPS *L. fermentum* UCO-979C *in vivo* повышает устойчивость к *Helicobacter pylori* за счет модуляции врожденного иммунного ответа [20]. Изучение моделирующего действия EPS *L. rhamnosus* ZFM231 на кишечную микрофлору мышей с воспалительным заболеванием кишечника подтвердило восстановление видового разнообразия кишечной микробиоты [22]. EPS *L. acidophilus* способен подавлять биопленки грамотрицательных бактерий, влиять на факторы патогенности: при различных субминимальных концентрациях наблюдается дозозависимое снижение виолацеина у *Chromobacterium violaceum*, нарушение выработки продигиоцины у *Serratia marcescens*, в том числе пиоцианина, протеазы, эластазы у *Pseudomonas aeruginosa* [23]. EPS *L. curvatus* SJTUF

62116 демонстрирует приемлемую бактериостатическую эффективность в отношении *Serratia enteritidis*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, подавляет образование и рост биопленки у тех же микроорганизмов [24]. EPS *L. plantarum* T10 обладает лечебными свойствами при колите, снижая воспаление и улучшая барьерную функцию кишечника у мышей [25]. *In vitro* исследование демонстрирует, что EPS *L. pentosus* снижает выработку кишечных газов и способствует выработке короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК), особенно пропионовой [26]. Исследование EPS, выделенного из *L. plantarum* LRCC5310, показало, что он может быть применим для эффективной борьбы с ротавирусной инфекцией [27] и с комменсальными бактериями кишечной микробиоты. Не все EPS имеют положительное действие, такие параметры, как химическая структура и молекулярная масса, являются одной из его важных характеристик – их выработка регулируется условиями культивирования, зависит от состава питательных веществ и времени ферментации [28, 29], в связи с чем функциональные свойства EPS *Lactobacillus* активно изучаются до сих пор.

2. *Биосурфактанты*. BS, относящиеся к ПАВ, представляют амфифильные соединения, синтезируемые бактериями рода *Lactobacillus* [30], обладающие типичными свойствами глико- или липопептидов. Выработка BS зависит от вида *Lactobacillus* и, в зависимости от природы происхождения (штамма), способны проявлять эмульгирующие свойства, предотвращать образование биопленок, могут обладать антибактериальной активностью [31]. Показано, что BS *L. crispatus* BC1 вызывают изменения в морфологии клеток, способствуя снижению адгезии, уменьшения образования биопленок за счет конкуренции за питательные вещества, выработки органических кислот и антимикробных веществ, таких как бактериоцины, уксусная кислота, перекись водорода и др. Помимо важной роли в сельском хозяйстве, производстве кормов для животных, косметической и пищевой промышленности BS *Lactobacillus* привлекают внимание за счет антимикробного потенциала [32]. *L. acidophilus* ATCC4356, *L. debrueckii* ATCC9645, *L. paracasei* 11 снижают на 40-50% образование биопленки вагинального патогена *Candida albicans* [33]. BS *L. gasseri* BC12 препятствуют адгезии *Candida spp.* на клетках *HeLa* [34]. BS *L. crispatus* BC1 проявляют антиадгезионную активность *in vitro* и иммуномодулирующую активность у мышей, колонизированных *Candida albicans* [35]. BS *L. jensenii* P_{6A} и *L. gasseri* P₆₅ проявляют антимикробную активность и антибиопленочное действие в отношении многих патогенов урогенитального и желудочно-кишечного трактов, кожи [36]. BS *L. paracasei* ингибирует рост *Streptococcus pyogenes*,

Streptococcus agalactiae, *Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* [37]. BS *L. rhamnosus* ATCC7469 оказывает ингибирующее действие на способность *Streptococcus mutans* образовывать биопленку [38]. *L. crispatus* BC1 BS проявляет высокую антицитотоксическую активность, снижая титр вируса Эпштейна-Барр (ВЭБ) в культуре клеток *HeLa* примерно на 50% [39]. Сообщается, что механизм антиадгезивной активности BS *L. helveticus* 27170 в отношении *Staphylococcus aureus* связан с нарушением передачи сигналов аутоиндуктора-2 системы QS [40]. BS *L. brevis* CV8LAC эффективно подавляет биопленкообразование *C. albicans* на силиконовых эластомерных дисках; в то время как BS *L. acidophilus* снижает биопленкообразование *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida* на поверхности медицинских имплантатов из полидиметилсилоксана [41, 42]. Необходимо учитывать, что в данном случае антиадгезивные свойства часто определяют на моделях *in vitro* на полистироловых пластинах, а их использование не имитирует условия *in vivo*.

3. *Липотейхоевая кислота*. LTA – компонент клеточной стенки бактерий рода *Lactobacillus* обеспечивает пробиотическое, антибактериальное действие [43], в том числе препятствует биопленкообразованию, т.е. основными стратегиями, используемыми для снижения вирулентности. Исследования *in vivo* показали, что определенные LTA снижают заболеваемость у животных. LTA в виде маннанполигосахаридов в рационе поросят способствуют росту, хитинсодержащие олигосахариды ускоряют рост и снижают частоту диареи. Ограниченное количество исследований затрудняет оценочную роль влияния LTA на здоровье животных. LTA *L. reuteri* TMW1656 и LTH5794 предотвращают гемагглютинацию, вызванную энтеротоксином *Escherichia coli* K88 [44]. LTA *L. plantarum* препятствуют образованию биопленки *Streptococcus mutans* на дисках из гидроксипатита [45], способны подавлять рост биопленкообразующего штамма *Enterococcus faecalis*, в том числе уже сформировавшиеся биопленки на дентине зубов. Данный факт позволяет предположить возможность его применения как профилактического и терапевтического средства при инфицировании биопленкообразующими кариесогенными бактериями [46]. LTA обладают иммуномодулирующей активностью: LTA *L. johnsonii* La1 и *L. acidophilus* La10 подавляют избыточную продукцию провоспалительных цитокинов – ФНО- α , IL-8, IL-5, IL-10 и др. [47].

Таким образом, EPS, BS, LTA представляют сложные биологические компоненты, обладающие антибактериальным действием в отношении различных патогенов, определяемое видо-

вой принадлежностью штамма *Lactobacillus*. К не менее важным функциональным свойствам относят их способность препятствовать адгезии патогенов на биотических и абиотических поверхностях. Данный факт указывает на возможность их применения как антибиопленочного средства при обработке медицинских изделий, так и терапевтического средства. Изучение функциональных свойств различных штаммов лактобактерий позволит расширить возможность их использования в медицине, пищевой промышленности и других сферах, открывая новые перспективы для их применения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Роспотребнадзора

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Байракова А.Л. – разработка концепции и дизайна исследования, сбор материала, анализ полученных данных, подготовка текста; Зубкова Е.С. – сбор материала, анализ полученных данных, подготовка текста; Миронов А.Ю. – редактирование и доработка текста; критический пересмотр и окончательное утверждение для публикации рукописи.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bernardeau M., Vernoux J.P., Henri-Dubernet S., Guéguen M. Safety assessment of dairy microorganisms: the *Lactobacillus* genus. *Int J Food Microbiol.* 2008;126(3):278-285. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2007.08.015.
- Liu X., Zhao H., Wong A. Accounting for the health risk of probiotics. *Heliyon.* 2024;10(6):e27908. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27908.
- Gao H., Li X., Chen X., Hai D., Wei C., Zhang L., Li P. The functional roles of *Lactobacillus acidophilus* in different physiological and pathological processes. *J Microbiol Biotechnol.* 2022;32(10):1226-1233. DOI: 10.4014/jmb.2205.05041.
- Sharma H., Ozogul F., Bartkiene E., Rocha J. M. Impact of lactic acid bacteria and their metabolites on the techno-functional properties and health benefits of fermented dairy products. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2023;63(21):4819-4841. DOI: 10.1080/10408398.2021.2007844.
- Iyer R., Tomar S.K., Uma Maheswari T., Singh R. *Streptococcus thermophilus* strains: multifunctional lactic acid bacteria. *Int Dairy J.* 2010;20:133-141. DOI: 10.1016/j.idairyj.2009.10.005.
- Cui Y., Xu T., Qu X., Hu T., Jiang X., Zhao C. New insights into various production characteristics of *Streptococcus thermophilus* strains. *Int J Mol Sci.* 2016;17(10):1701. DOI: 10.3390/ijms17101701.

7. Piqué N., Berlanga M., Miñana-Galbis D. Health benefits of heat-killed (Tyndallized) probiotics: an overview. *Int J Mol Sci.* 2019;20(10):2534. DOI: 10.3390/ijms20102534.
8. Shah A.B., Baiseitova A., Zahoor M., Ahmad I., Ikram M., Bakhsh A., Shah M. A., Ali I. et al. Probiotic significance of *Lactobacillus* strains: a comprehensive review on health impacts, research gaps, and future prospects. *Gut Microbes.* 2024;16(1):2431643. DOI: 10.1080/19490976.2024.2431643.
9. Prabhurajeshwar C., Chandrakanth R.K. Probiotic potential of lactobacilli with antagonistic activity against pathogenic strains: an in vitro validation for the production of inhibitory substances. *Biomed J.* 2017;40:270-283. DOI: 10.1016/j.bj.2017.06.008.
10. Chew S.Y., Cheah Y.K., Seow H.F., Sandai D., Than L.T. Probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GR-1 and *Lactobacillus reuteri* RC-14 exhibit strong antifungal effects against vulvovaginal candidiasis-causing *Candida glabrata* isolates. *J Appl Microbiol.* 2015;118(5):1180-1190. DOI: 10.1111/jam.12772.
11. Bădăluță V.A., Curuțiu C., Dițu L.M., Holban A.M., Lazăr V. Probiotics in wound healing. *Int J Mol Sci.* 2024;25(11):5723. DOI: 10.3390/ijms25115723.
12. Humphreys G.J., McBain A.J. Antagonistic effects of *Streptococcus* and *Lactobacillus* probiotics in pharyngeal biofilms. *Lett Appl Microbiol.* 2019;68(4):303-312. DOI: 10.1111/lam.13133.
13. Halloran K., Underwood M.A. Probiotic mechanisms of action. *Early Hum Dev.* 2019;135:58-65. DOI: 10.1016/j.earlhumdev.2019.05.010.
14. Ferreira R.L.P.S., Nova B.G.V., Carmo M.S., Abreu A.G. Mechanisms of action of *Lactobacillus spp.* in the treatment of oral candidiasis. *Braz J Biol.* 2024;84:e282609. DOI: 10.1590/1519-6984.282609.
15. Gudiña E.J., Teixeira J.A., Rodrigues L.R. Isolation and functional characterization of a biosurfactant produced by *Lactobacillus paracasei*. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2010;76(1):298-304. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2009.11.008.
16. Oleksy M., Klewicka E. Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus sp.*: biosynthesis and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2018;58(3):450-462. DOI: 10.1080/10408398.2016.1187112.
17. Meade K.G., O'Farrelly C. β -Defensins: farming the microbiome for homeostasis and health. *Front Immunol.* 2019;9:3072. DOI: 10.3389/fimmu.2018.03072.
18. Rahbar Saadat Y., Yari Khosroushahi A., Pourghassem Gargari B. A comprehensive review of anticancer, immunomodulatory and health beneficial effects of the lactic acid bacteria exopolysaccharides. *Carbohydr Polym.* 2019;217:79-89. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.025.
19. El-Deeb N.M., Yassin A.M., Al-Madboly L.A., El-Hawiet A. A novel purified *Lactobacillus acidophilus* 20079 exopolysaccharide, LA-EPS-20079, molecularly regulates both apoptotic and NF- κ B inflammatory pathways in human colon cancer. *Microb Cell Fact.* 2018;17(1):29. DOI: 10.1186/s12934-018-0877-z.
20. Garcia-Castillo V., Marcial G., Albarracín L., Tomokiyoy M., Clua P., Takahashi H., Kitazawa H., Garcia-Cancino A. et al. The exopolysaccharide of *Lactobacillus fermentum* UCO-979C is partially involved in its immunomodulatory effect and its ability to improve the resistance against *Helicobacter pylori* infection. *Microorganisms.* 2020;8(4):479. DOI: 10.3390/microorganisms8040479.
21. Kawanabe-Matsuda H., Takeda K., Nakamura M., Makino S., Karasaki T., Kakimi K., Nishimukai M., Ohno T. et al. Dietary *Lactobacillus*-derived exopolysaccharide enhances immune-checkpoint blockade therapy. *Cancer Discov.* 2022;12(5):1336-1355. DOI: 10.1158/2159-8290.CD-21-0929.
22. Wan C., Qian W.W., Liu W., Pi X., Tang M. T., Wang X.L., Gu Q., Li P. et al. Exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* ZFM231 alleviates DSS-induced colitis in mice by regulating gut microbiota. *J Sci Food Agric.* 2022;102(15):7087-97. DOI: 10.1002/jsfa.12070.
23. Adnan M., Siddiqui A.J., Noumi E., Ashraf S.A., Awadelkareem A.M., Hadi S., Snoussi M., Badraoui R. et al. Biosurfactant derived from probiotic *Lactobacillus acidophilus* exhibits broad-spectrum antibiofilm activity and inhibits the quorum sensing-regulated virulence. *Biomol Biomed.* 2023;23(6):1051-1068. DOI: 10.17305/bb.2023.9324.
24. Zhu J., Tan Z., Zhang Z., Shi X. Characterization on structure and bioactivities of an exopolysaccharide from *Lactobacillus curvatus* SJTUF 62116. *Int J Biol Macromol.* 2022;210:504-517. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.04.203.
25. Tao T., Zhang L., Yu T., Ma J., Lu S., Ren J., Li X., Guo X. Exopolysaccharide production by *Lactobacillus plantarum* T10 is responsible for the probiotic activity in enhancing intestinal barrier function *in vitro* and *in vivo*. *Food Funct.* 2024;15(7):3583-3599. DOI: 10.1039/d4fo00526k.
26. Yang Y., Wang M., Zhang H., Zhou W., Liu W., Pi X., Xing J. An exopolysaccharide from *Lactobacillus pentosus* YY-112: structure and effect on the human intestinal microbiota. *Food Funct.* 2023;14(16):7718-7726. DOI: 10.1039/d3fo01739g.
27. Kim K., Lee G., Thanh H.D., Kim J.H., Konkit M., Yoon S., Park M., Yang S. et al. Exopolysaccharide from *Lactobacillus plantarum* LRCC5310 offers protection against rotavirus-induced diarrhea and regulates inflammatory response. *J Dairy Sci.* 2018;101(7):5702-5712. DOI: 10.3168/jds.2017-14151.
28. Gamar-Nourani L, Blondeau K, Simonet J-M. Influence of culture conditions on exopolysaccharide production by *Lactobacillus rhamnosus* strain C83. *J Appl Microbiol.* 1998;85:664-72. DOI: 10.1111/j.1365-2672.1998.00574.x.
29. Lin T., Chen C., Chen B., Shaw J., Chen Y. Optimal economic productivity of exopolysaccharides from lactic acid bacteria with production possibility curves. *Food Sci Nutr.* 2019; 7(7): 2336-2344. DOI: 10.1002/fsn3.1079.
30. De Gregorio P.R., Parolin C., Abruzzo A., Luppi B., Protti M., Mercolini L., Silva J.A., Giordani B. et al. Biosurfactant from vaginal *Lactobacillus crispatus* BC1 as a promising agent to interfere with *Candida* adhesion. *Microb Cell Fact.* 2020;19(1):133. DOI: 10.1186/s12934-020-01390-5.
31. Mouafo T.H., Mbawala A., Ndjouenkeu R. Effect of different carbon sources on biosurfactants' produc-

- tion by three strains of *Lactobacillus* spp. *Biomed Res Int.* 2018;2018:5034783. DOI: 10.1155/2018/5034783.
32. Sepehr A., Miri S.T., Aghamohammad S., Rahimirad N., Milani M., Pourshafie M.R., Rohani M. Health benefits, antimicrobial activities, and potential applications of probiotics: A review. *Medicine* (Baltimore). 2024;103(52):e32412. DOI: 10.1097/MD.00000000000032412.
 33. Ceresa C., Tessarolo F., Caola I., Nollo G., Cavallo M., Rinaldi M., Fracchia L. Inhibition of *Candida albicans* adhesion on medical-grade silicone by a *Lactobacillus*-derived biosurfactant. *J Appl Microbiol.* 2015;118(5):1116-1125. DOI: 10.1111/jam.12760.
 34. Monti F., Giordani B., Fedi S., Ghezzi D., Galletti P., Micolini L., Mandrioli R., Parolin C., et al. Vaginal *Lactobacillus gasseri* biosurfactant: a novel bio- and eco-compatible anti-*Candida* agent. *Biofilm.* 2025;10:100299. DOI: 10.1016/j.biofilm.2025.100299.
 35. Abruzzo A., Giordani B., Parolin C., De Gregorio P.R., Foschi C., Cerchiara T., Bigucci F., Vitali B. et al. *Lactobacillus crispatus* BC1 biosurfactant delivered by hyalurosomes: an advanced strategy to counteract *Candida* *Biofilm. Antibiotics* (Basel). 2021;10(1):33. DOI: 10.3390/antibiotics10010033.
 36. Morais I.M.C., Cordeiro A.L., Teixeira G.S., Domingues V.S., Nardi R.M.D., Monteiro A.S., Alves R.J., Siqueira E.P. et al. Biological and physicochemical properties of biosurfactants produced by *Lactobacillus jensenii* P_{6A} and *Lactobacillus gasseri* P₆₅. *Microb Cell Fact.* 2017;16(1):155. DOI: 10.1186/s12934-017-0769-7.
 37. Ferreira A., Vecino X., Ferreira D., Cruz J. M., Moldes A.B., Rodrigues L.R. Novel cosmetic formulations containing a biosurfactant from *Lactobacillus paracasei*. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2017;155: 522-529. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.04.026.
 38. Tahmourespour A., Kasra-Kermanshahi R., Salehi R. *Lactobacillus rhamnosus* biosurfactant inhibits biofilm formation and gene expression of caries-inducing *Streptococcus mutans*. *Dent Res J* (Isfahan). 2019;16(2):87-94.
 39. Foschi C., Parolin C., Giordani B., Morselli S., Luppi B., Vitali B., Marangoni A. *Lactobacillus crispatus* BC1 biosurfactant counteracts the infectivity of *Chlamydia trachomatis* elementary bodies. *Microorganisms.* 2021;9(5):975. DOI: 10.3390/microorganisms9050975.
 40. Jiang X., Yan X., Gu S., Yang Y., Zhao L., He X., Chen H., Ge J., Liu D. Biosurfactants of *Lactobacillus helveticus* for biodiversity inhibit the biofilm formation of *Staphylococcus aureus* and cell invasion. *Future Microbiol.* 2019;14:1133-1146. DOI: 10.2217/fmb-2018-0354.
 41. Satpute S.K., Mone N.S., Das P., Banat I.M., Banpurkar A.G. Inhibition of pathogenic bacterial biofilms on PDMS based implants by *L. acidophilus* derived biosurfactant. *BMC Microbiol.* 2019;19(1):39. DOI: 10.1186/s12866-019-1412-z.
 42. Danilova T.A., Adzhieva A.A., Danilina G.A., Minko A.G., Dmitrenko O.A., Zhukhovitsky V.G. Antimicrobial effect of *Lactobacillus* supernatant on polyresistant bacteria of the ESKAPE group. *Bull Exp Biol Med.* 2025;178(5):615-18. DOI: 10.1007/s10517-025-06385-z.
 43. Matsuguchi T., Takagi A., Matsuzaki T., Nagaoka M., Ishikawa K., Yokokura T., Yoshikai Y. Lipoteichoic acids from *Lactobacillus* strains elicit strong tumor necrosis factor alpha-inducing activities in macrophages through Toll-like receptor 2. *Clin Diagn Lab Immunol.* 2003;10(2):259-266. DOI: 10.1128/cdli.10.2.259-266.2003
 44. Chen X. Y., Woodward A., Zijlstra R. T., Gänzle M. G. Exopolysaccharides synthesized by *Lactobacillus reuteri* protect against enterotoxigenic *Escherichia coli* in piglets. *Appl Environ Microbiol.* 2014; 80(18): 5752-60. DOI: 10.1128/AEM.01782-14.
 45. Wasfi R., Abd El-Rahman O.A., Zafer M.M., Ashour H.M. Probiotic *Lactobacillus* sp. inhibit growth, biofilm formation and gene expression of caries-inducing *Streptococcus mutans*. *J Cell Mol Med.* 2018;22(3):1972-1983. DOI: 10.1111/jcmm.13496.
 46. Kim A.R., Kang M., Yoo Y.J., Yun C.H., Perinpanayagam H., Kum K. Y., Han S.H. *Lactobacillus plantarum* lipoteichoic acid disrupts mature *Enterococcus faecalis* biofilm. *J Microbiol.* 2020;58(4):314-319. DOI: 10.1007/s12275-020-9518-4.
 47. Granato D., Perotti F., Masserey I., Rouvet M., Golliard M., Servin A., Brassart D. Cell surface-associated lipoteichoic acid acts as an adhesion factor for attachment of *Lactobacillus johnsonii* La1 to human enterocyte-like Caco-2 cells. *Appl Environ Microbiol.* 1999;65(3):1071-1077. DOI: 10.1128/AEM.65.3.1071-1077.1999.

Поступила в редакцию 03.04.2026

Подписана в печать 25.06.2026

Для цитирования: Байракова А.Л., Зубкова Е.С., Миронов А.Ю. Антибактериальные свойства поверхностно-активных молекул бактерий рода *Lactobacillus* (обзор литературы). *Человек и его здоровье.* 2026;29(2):68–73. DOI: 10.21626/vestnik/2026-2/09. EDN: TYUCQV.

ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF SURFACE-ACTIVE MOLECULES OF MICROORGANISMS OF THE GENUS *LACTOBACILLUS* (LITERATURE REVIEW)

© Bayrakova A.L.¹, Zubkova E.S.¹, Mironov A.Yu.^{1, 2}

¹ G.N. Gabrichevsky Moscow research institute for epidemiology and microbiology
(G.N. Gabrichevsky MRIEM)

10, Admiral Makarov Str., Moscow, 125212, Russian Federation

² Federal Scientific and Clinical Center (FSCC)

28, Orekhovy blvd., Moscow, 115682, Russian Federation

This review analyzes the biological role and therapeutic potential of three key cell wall components and metabolites of *Lactobacillus* bacteria: exopolysaccharides (EPS), biosurfactants (BS), and lipoteichoic acids (LTA). The *Lactobacillus* genus, which has GRAS (generally recognized as safe) status, is widely used in medicine and the food industry for its probiotic properties, but the mechanisms of its protective action are still being actively studied.

This paper systematizes data on the functional properties of EPS, which demonstrate a wide range of activity: from antioxidant and antitumor to immunomodulatory and antibiofilm. EPS from various strains is shown to be effective against *Helicobacter pylori*, rotaviruses, and a number of Gram-negative pathogens, suppressing virulence factors such as violacein and pyocyanin. It is emphasized that EPS functionality is critically dependent on culture conditions and molecular weight. The second component, biosurfactants, are amphiphilic compounds with pronounced anti-adhesive and antimicrobial activity. According to the presented data, BS effectively reduce the biofilm formation of pathogens such as *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*, and *Streptococcus mutans*, and also exhibit antiviral activity against the Epstein-Barr virus. The third component, lipoteichoic acid, plays a key role in immunomodulation by suppressing proinflammatory cytokines and inhibiting the adhesion of cariogenic bacteria and enterotoxigenic *E. coli*.

In conclusion, EPS, BS, and LTA are promising agents for the development of new anti-biofilm and therapeutic agents. However, it is noted that many studies were conducted in vitro and do not fully reflect in vivo conditions, requiring further investigation to expand the applications of lactobacilli in medicine and biotechnology.

Keywords: *Lactobacillus*; surface-active molecules; exopolysaccharides (EPS); biosurfactants (BS); and lipoteichoic acids (LTA).

Bayrakova Alexandra L. – Leading research scientist, research center for the study of bacterial infection, G.N. Gabrichevsky MRIEM, Moscow, Russia. ORCID ID: 0000-0001-9289-0765. E-mail: alexandrabl@mail.ru

Zubkova Ekaterina S. – Research scientist, Head of the Research Center for Probiotic Preparations, G.N. Gabrichevsky MRIEM, Moscow, Russia. ORCID ID: 0009-0007-1843-4754. E-mail: zubkova@gabrich.ru (corresponding author).

Mironov Andrey Yu. – Dr. Sci. (Med.), professor, chief research scientist at the research center for the study of diphtheria, whooping cough, and tetanus, G.N. Gabrichevsky MRIEM, Moscow, Russia; Professor at the Department of Clinical Laboratory Diagnostics and Pathological Anatomy, Academy of Postgraduate Education, FSCC, Moscow, Russia. ORCID ID: 0000-0002-8544-5230. E-mail: andy.60@mail.ru

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

SOURCE OF FINANCING

The authors state that there is no funding for the study.

AUTHORS CONTRIBUTION

Bayrakova A.L. – development of the research concept and design, collection of material, analysis of the data obtained, preparation of the text; Zubkova E. S. – collection of material, analysis of the data obtained, preparation of the text; Mironov A. Yu. – editing and revision, critical revision and final approval for publication of the manuscript.

Received 03.04.2026

Accepted 25.06.2026

For citation: Bayrakova A.L., Zubkova E.S., Mironov A.Yu. Antibacterial properties of surface-active molecules of microorganisms of the genus *Lactobacillus* (literature review). *Humans and their health*. 2026;29(2):68–73. DOI: 10.21626/vestnik/2026-2/09. EDN: TYUCQV.