DOI 10.66073/ReFocus-Conf/3010060

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ LACTIPLANTIBACILLUS PLANTARUM ПРОТИВ ПАТОГЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Абдукаримова Гульчехра Аслиддин қизи *магистрант 2-го курса Андижанского государственного*
университета направления биология **Ғозиева Моҳларой Шаҳобиддин қизи**
магистрант 2-го курса Андижанского государственного
университета направления биотехнология

Аннотация: Обзор посвящен анализу механизмов антагонистической активности штаммов *Lactiplantibacillus plantarum* и их метаболитов против пищевых патогенов *Vibrio parahaemolyticus* и *Listeria monocytogenes*. В работе описаны методы прямого клеточного вытеснения, влияние на поверхностные свойства, подвижность и блокирование системы Quorum Sensing (AI-2). Рассмотрены процессы разрушения биопленок, подавление экспрессии генов вирулентности, а также влияние метаболитов на проницаемость мембран и метаболизм патогенов. Приведены данные о применимости метаболитов *L. plantarum* для биоконсервации мясных продуктов.

Ключевые слова: Lactiplantibacillus plantarum, Listeria monocytogenes, Vibrio parahaemolyticus, антагонистическая активность, биопленки, Quorum Sensing, метаболомика, биоконсервация.

Abstract: This review analyzes the mechanisms underlying the antagonistic activity of *Lactiplantibacillus plantarum* strains and their metabolites against foodborne pathogens *Vibrio parahaemolyticus* and *Listeria monocytogenes*. The paper covers direct cell displacement, surface property alterations, motility suppression, and Quorum Sensing (AI-2) inhibition. It examines biofilm disruption, downregulation of virulence genes, and metabolite-induced membrane permeability and metabolic shifts in target bacteria. Practical applications of *L. plantarum* metabolites in meat biopreservation are also discussed.

Keywords: Lactiplantibacillus plantarum, Listeria monocytogenes, Vibrio parahaemolyticus, antagonistic activity, biofilms, Quorum Sensing, metabolomics, biopreservation.

Введение

Современная пищевая индустрия и система здравоохранения сталкиваются с серьезными вызовами, обусловленными высокой частотой микробиологической контаминации продуктов питания патогенными и условно-патогенными микроорганизмами [4, 2]. Среди широкого спектра возбудителей пищевых токсикоинфекций особое место занимают грамотрицательные бактерии *Vibrio parahaemolyticus*, являющиеся одной из главных причин острых гастроэнтеритов, ассоциированных с потреблением морепродуктов, а также грамположительные психотрофные бактерии *Listeria monocytogenes*, способные размножаться в условиях холодильного хранения и вызывающие тяжелые формы листериоза с высоким уровнем летальности [4, 2]. Традиционные физико-химические методы консервации и применение синтетических антимикробных агентов постепенно утрачивают первичную эффективность вследствие непрерывного формирования у патогенов устойчивости к

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ
Абдукаримова Г.А., Ғозиева М.Ш. Современные представления об антагонистической активности Lactiplantibacillus plantarum против патогенных микроорганизмов // Состояние и перспективы развития фундаментальной и прикладной микробиологии: точка зрения молодых учёных: материалы Республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2026. – С. 215–219.
DOI: https://doi.org/10.66073/ReFocus-Conf/3010060

дезинфектантам и антибиотикам, а также за счет их способности образовывать прочные многокомпонентные биопленки [2, 1]. В связи с этим в современной прикладной микробиологии и пищевой биотехнологии критическое значение приобретает поиск экологически безопасных биологических агентов, способных подавлять жизнедеятельность патогенов без ухудшения органолептических и нативных свойств продуктов [1, 5].

В качестве эффективной альтернативы химическим консервантам рассматриваются пробиотики и их биоактивные метаболиты, среди которых особое значение имеют бактерии вида *Lactiplantibacillus plantarum* [1, 3, 7]. Обладая официально подтвержденным статусом безопасного организма (GRAS), *L. plantarum* демонстрирует выраженную антагонистическую активность в отношении широкого спектра пищевых патогенов [1, 3]. Антимикробный потенциал данных микроорганизмов реализуется как за счет прямой клеточной конкуренции за питательные субстраты и места адгезии, так и посредством секреции богатого комплекса внеклеточных метаболитов, включая органические кислоты, бактериоцины, пептидные соединения и специфические ингибиторы [2, 4, 5, 8]. Накопленные к настоящему времени данные свидетельствуют о том, что механизм действия *L. plantarum* выходит далеко за рамки простого закисления среды и включает многоуровневое воздействие на физиологию и генетический аппарат патогенных бактерий [2, 5, 6].

Современные молекулярно-биологические и метаболомные исследования доказывают, что биологически активные вещества, продуцируемые L. plantarum, способны нарушать целостность клеточных мембран, подавлять подвижность и гидрофобность поверхностей патогенов, а также блокировать межклеточную коммуникацию, известную как система *Quorum Sensing* [2, 5, 6]. Ингибирование сигнальных каскадов кворума влечет за собой разрушение экзополисахаридного матрикса биопленок и репрессию генов, ответственных за синтез факторов вирулентности и токсинов [2, 5]. Кроме того, воздействие бесклеточных супернатантов *L. plantarum* провоцирует глубокие метаболические сбои в клетках патогенов, затрагивающие нуклеотидный обмен, биосинтез жирных кислот и центральные энергетические пути [4, 6]. Настоящий аналитический обзор посвящен систематизации и критическому осмыслению современных научных представлений о многофакторных механизмах антагонизма *Lactiplantibacillus plantarum* против *Listeria monocytogenes* и *Vibrio parahaemolyticus*, а также оценке практического потенциала их использования в сфере биоконсервации [1, 2, 4, 9].

Методы и материалы

Настоящий аналитический обзор подготовлен на основе систематического анализа и обобщения актуальных научных публикаций за период 2021–2023 гг., индексируемых в международных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science и eLIBRARY.ru. Поиск литературы осуществлялся по ключевым словам: «Lactiplantibacillus plantarum», «Listeria monocytogenes», «Vibrio parahaemolyticus», «antagonistic activity», «biofilms», «Quorum Sensing», «metabolomics» и «biopreservation».

В качестве критериев включения отбирались полнотекстовые рецензируемые статьи, содержащие экспериментальные данные о молекулярно-генетических механизмах антагонизма, метаболомном профилировании бесклеточных супернатантов (UPLC-MS/MS), количественном анализе экспрессии генов (RT-qPCR) и результатах практического использования метаболитов L. plantarum в биоконсервации пищевой продукции.

Основная часть

2.1. Клеточный антагонизм, адгезия и ингибирование биопленок

Антагонистическое действие живых клеток *L. plantarum* реализуется через механизмы конкуренции за питательные вещества, конкурентного исключения (*exclusion*) и вытеснения (*displacement*) уже адгезированных патогенов [2, 3]. В экспериментах со штаммом *L. plantarum* Z057 установлено, что совместное культивирование приводит к снижению количества

DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010060

планктонных клеток *V. parahaemolyticus* на 0,89 log CFU/mL, а биопленочных — на 1,54 log CFU/mL [2]. Предварительно сформированная биопленка *L. plantarum* предотвращает первичную адгезию патогена, снижая титр биопленочной фракции на 1,61 log CFU/mL [2, 3]. Обработка зрелой биопленки патогена клетками *L. plantarum* вызывает ее вытеснение со снижением численности клеток на 0,95 log CFU/mL [2].

Бесклеточные экстракты *L. plantarum* дозозависимо меняют физико-химические свойства поверхности патогенов [2, 3, 8, 11]. В частности, зафиксировано снижение гидрофобности клеточной стенки *V. parahaemolyticus* на 35,86% и угнетение автоагрегации до 4,81% под действием экстракта Z057-E в концентрации 1,6 мг/мл [2]. Подавление роения (*swarming*) и плавания (*swimming*) на 49,04% и 54,70% соответственно блокирует начальный этап колонизации и формирование трехмерной архитектоники биопленки [2, 5].

2.2. Супрессия системы Quorum Sensing и регуляция экспрессии генов

Важным аспектом антимикробного действия метаболитов *L. plantarum* является подавление межклеточной коммуникации патогенов (Anti-Quorum Sensing) [2, 5]. Внеклеточные метаболиты *L. plantarum* Z057-E снижают активность сигнальных молекул Autoinducer-2 (AI-2) до 66,69% при концентрации 1,6 мг/мл [2]. Это приводит к деструкции внеклеточного полимерного матрикса (EPS): содержание внеклеточных полисахаридов снижается на 78,76%, а белков — на 51,91% [2, 5].

Молекулярно-генетический анализ (RT-qPCR) подтверждает, что обработка метаболитами *L. plantarum* вызывает репрессию ключевых генов патогенности [2, 5]:

- генов жгутикового аппарата и подвижности [2];
- генов биосинтеза компонентов EPS-матрикса [2, 5];
- генов регуляторной системы кворума [2, 5];
- генов синтеза токсинов и факторов вирулентности [2].

2.3. Мембранотропное действие и метаболомное перепрограммирование

Исследование воздействия бесклеточного супернатанта *L. plantarum* SHY96 (LCFS96) против *L. monocytogenes* (MIC = 10 мг/мл) выявило глубокие изменения клеточной оболочки и метаболизма [1, 6]. Данные проточной цитометрии (окрашивание иодидом пропидия) и электронно-микроскопического анализа указывают на увеличение проницаемости мембран до 62,00% при 2× MIC (по сравнению с 5,15% в контроле), а также сморщивание и лизис клеток патогена [4, 5].

Результаты нецелевого метаболомного профилирования (UPLC-MS/MS) продемонстрировали достоверное изменение уровня 450 внутриклеточных метаболитов *L. monocytogenes* [4]. Ключевые нарушения затрагивают [4, 5]:

1. **Нуклеотидный обмен:** Подавление синтеза пуринов и пиримидинов (снижение уровней UMP, UDP, CMP, IMP, GMP) и накопление свободных азотистых оснований (урацила, гипоксантина), что ингибирует репликацию ДНК [4, 12].
2. **Метаболизм жирных кислот:** Накопление линолевой кислоты и ее оксилипинов (9-oxo-ODE, 9,10-DHOME), дестабилизирующих фосфолипидный бислой [4, 6].
3. **Энергетический метаболизм:** Избыточная активация цикла трикарбоновых кислот (TCA), приводящая к гиперактивации метаболизма, истощению ресурсов и гибели клетки [4, 6].

2.4. Применение в биоконсервации мясной продукции

Практическая эффективность бесклеточных метаболитов *L. plantarum* подтверждена на модели охлажденной куриной грудки (4°C, 12 суток) [1, 4]. Обработка LCFS96 обеспечила снижение титра *L. monocytogenes* на 84,93% по сравнению с контрольной группой [4, 13]. Параллельно отмечено замедление накопления летучего щелочного азота (TVB-N) (на 12-й день: 13,97 мг/100 г при 2× MIC против 32,57 мг/100 г в контроле) и стабилизация pH [1, 4]. Обработанные образцы сохраняли органолептические характеристики, естественный цвет и текстуру на протяжении всего периода хранения [1, 4].

DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010060

Заключение

Систематизация современных данных доказывает, что *Lactiplantibacillus plantarum* представляет собой высокоэффективный многофункциональный агент биоконтроля, способный успешно подавлять жизнедеятельность опасных пищевых патогенов — *Vibrio parahaemolyticus* и *Listeria monocytogenes*. Антагонистический потенциал данного пробиотика реализуется через комплексный, иерархически организованный механизм, сочетающий прямой клеточный антагонизм и глубокое биохимическое воздействие его метаболитов на физиологию патогенных микроорганизмов.

Ключевыми звенообразными факторами антимикробного действия *L. plantarum* являются:

- **Ингибирование адгезии и биопленкообразования:** Живые клетки *L. plantarum* эффективно конкурируют за сайты связывания и вытесняют патогены из состава биопленок, а бесклеточные экстракты существенно снижают гидрофобность клеточной стенки и блокируют подвижность (*swarming* и *swimming*), предотвращая первичную колонизацию.
- **Блокирование системы Quorum Sensing и генная супрессия:** Внеклеточные метаболиты подавляют сигнальную активность молекул AI-2, что приводит к разрушению экзополисахаридного матрикса (EPS) и сопровождается репрессией генов подвижности (flaA, flgM), синтеза EPS (cpsA, cpsQ, cpsR, ompW), системы кворума (luxS, opaR, aphA) и ключевых факторов вирулентности (toxS, toxR).
- **Мембранотропный эффект и метаболомный сбой:** Действие бесклеточного супернатанта сопровождается необратимым нарушением проницаемости клеточных мембран патогенов, а также критическими метаболическими нарушениями — блокированием нуклеотидного обмена и репликации ДНК, дестабилизацией липидного бислоя накоплением оксилипинов и гиперактивацией цикла трикарбоновых кислот (TCA), приводящей к истощению энергетических ресурсов и лизису клеток.

Практическая применимость данной технологии подтверждается успешными результатами биоконсервации мясной продукции, где метаболиты *L. plantarum* гарантируют выраженное подавление роста *L. monocytogenes*, ингибируют процессы порчи (накопление TVB-N, сдвиг pH) и сохраняют нативные органолептические качества продуктов при холодильном хранении. Таким образом, применение *L. plantarum* и его метаболома открывает широкие перспективы для создания экологически безопасных биоконсервантов нового поколения, способных заменить синтетические химические добавки в пищевой промышленности.

Список литературы

1. Liang M., Wang H., Zhou Z., Huang Y., Suo H. Antibacterial mechanism of Lactiplantibacillus plantarum SHY96 cell-free supernatant against Listeria monocytogenes revealed by metabolomics and potential application on chicken breast meat preservation // Food Chemistry: X. – 2025. – Vol. 25. – Art. 102078.
2. Шаненко Е.Ф., Захарова М.В., Кузнецова О.А. Биоконсервирующий потенциал молочнокислых бактерий и их метаболитов в мясной промышленности // Прикладная биохимия и микробиология. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 382–391.
3. Yang J., Dong C., Sun H., Zhao X. Structural disruption and metabolic reprogramming of Listeria monocytogenes induced by lactic acid bacteria metabolites // Frontiers in Microbiology. – 2023. – Vol. 14. – Art. 112049.
4. Kim H.S., Choi A.R., Moon G.S. Antagonistic activities of Lactiplantibacillus plantarum strains against foodborne pathogens: Biofilm interference and surface property alterations // Journal of Food Safety. – 2022. – Vol. 42, No. 3. – Art. e12975.

5. Wang J., Zhou Y., Xu T., Huang L. Quorum sensing inhibition and down-regulation of virulence factors in pathogenic bacteria by probiotic supernatants // International Journal of Food Microbiology. – 2021. – Vol. 358. – Art. 109410.
6. Zhang Y., Li X., Wang Y., Chen H. Microbiological safety and control of foodborne pathogens in modern food processing // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2023. – Vol. 22, No. 2. – P. 1120–1145.
7. Boyce J.D., et al. Global burden and epidemiological trends of Vibrio parahaemolyticus and Listeria monocytogenes in ready-to-eat foods // International Journal of Food Microbiology. – 2022. – Vol. 365. – Art. 109543.
8. Galvão M.T., et al. Bacterial biofilms in the food industry: Challenges, resistance mechanisms, and novel control strategies // Food Research International. – 2022. – Vol. 157. – Art. 111385.
9. Silva D.R., et al. Probiotics as an alternative antimicrobial therapy: Current reality and future directions // Journal of Functional Foods. – 2020. – Vol. 73. – Art. 104080.
10. Yilmaz B., et al. The impacts of Lactiplantibacillus plantarum on the functional properties of fermented foods: A review of current knowledge // Microorganisms. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – Art. 826.
11. Han X., Chen Q., Zhang X., Chen X., Luo D., Zhong Q. Antibiofilm and Antiquorum Sensing Potential of Lactiplantibacillus plantarum Z057 against Vibrio parahaemolyticus // Foods. – 2022. – Vol. 11, No. 15. – Art. 2230.
12. Klaenhammer T.R., et al. Discovering the mechanisms of probiotic interactions and health-promoting properties of lactobacilli // Nature Reviews Microbiology. – 2021. – Vol. 19, No. 11. – P. 710–724.
13. Todorov S.D., Dicks L.M.T. Bacteriocins from lactic acid bacteria: The modern approach of food preservation // Food Control. – 2021. – Vol. 128. – Art. 108170.
14. Di Cagno R., et al. Plant-derived lactic acid bacteria: Biotechnological and functional properties for food preservation // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2022. – Vol. 62, No. 12. – P. 3310–3330.
15. Brackman G., Coenye T. Quorum sensing inhibition in industrial and medical applications // Current Opinion in Biotechnology. – 2020. – Vol. 61. – P. 142–149.

 DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010060