

УДК 636.087.8:639.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БАКТЕРИОЦИНОВ В АКВАКУЛЬТУРЕ

И. В. Ткачева, Ю. Б. Коханов, Н. Д. Недина*

Донской государственный технический университет (пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, Россия, 344000), *nadyhka1514@gmail.com

В работе представлен краткий обзор современных сведений о применении бактериоцинов в аквакультурной отрасли. В последние годы с развитием аквакультурного сектора становится актуальной проблема антибиотикорезистентности гидробионтов. Задача замены антибиотиков на более безопасные и действенные вещества стоит перед многими странами. В качестве решения данной проблемы используются бактериоцины – природоподобные антимикробные пептиды. Изучение строения пептидов происходит при помощи метагеномного секвенирования, которое позволяет определить точную аминокислотную последовательность. Проведенный литературный поиск выявил примеры использования в России микробного ила из системы биофлор для объектов аквакультуры в качестве не только очистки воды, но и борьбы с различными заболеваниями. В основном использование бактериоцинов распространено в зарубежных странах, таких как Китай, Япония, Канада, Норвегия; применяются штаммы рода *Bacillus*, *Lactobacillus plantarum* 42, *Lactobacillus plantarum* YRL45, *Lactobacillus plantarum* W3-2, *Lactococcus* spp., Педиоцин PA-1 (*Pediococcus acidilactici*), *Pediococcus acidilactici* DSM 10313. Выявленные пептиды способствуют улучшению роста и выживаемости рыб, а также качества воды за счет разложения органических веществ; эффективно подавляют патогенную микрофлору, снижают риск заболеваний в аквакультуре; активны против *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus* и *Clostridium botulinum*. Добавляя бактериоцины в корма для аквакультуры, можно эффективно снизить зависимость от традиционных методов лечения. Таким образом, бактериоцины представляют собой перспективные антимикробные препараты, которые могут улучшить качество аквакультурной продукции, повысить ее безопасность для потребителей, а также расширить лекарственный рынок для объектов аквакультуры.

Ключевые слова: антибиотики; бактерии; антибиотикорезистентность; аквакультура; гидробионты; корма; бактериоцины

Для цитирования: Ткачева И. В., Коханов Ю. Б., Недина Н. Д. Перспективы применения бактериоцинов в аквакультуре // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. doi: 10.17076/eb2108

Финансирование. Работа проведена в рамках выполнения проекта «Разработка персонализированных кормов нового поколения с растительными и пробиотическими добавками для повышения выживаемости и улучшения здоровья рыб» (FZNE-2023-0003) и субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

I. V. Tkacheva, Y. B. Kokhanov, N. D. Nedina*. PROSPECTS FOR USING BACTERIOCINS IN AQUACULTURE

Don State Technical University (1 Gagarin Sq., 344000 Rostov-on-Don, Russia),
*nadyhka1514@gmail.com

This paper provides an overview of the recent information on the use of bacteriocins in aquaculture. The development of the aquaculture sector in recent years brings the problem of antibiotic resistance in aquatic organisms to the foreground. Many countries are facing the challenge of replacing antibiotics with safer and more effective substances. Bacteriocins, nature-like antimicrobial peptides, are used as a solution to this problem. The structure of peptides is studied using metagenomic sequencing, which pinpoints the exact amino acid sequence. A literature search has revealed cases in Russia of microbial sludge from the biofloc system being used in aquaculture facilities not only for water purification but also to combat various diseases. Bacteriocins are more widely applied abroad, e.g. in China, Japan, Canada, or Norway, where strains of the genus *Bacillus*, *Lactobacillus plantarum* 42, *Lactobacillus plantarum* YRL45, *Lactobacillus plantarum* W3-2, *Lactococcus* spp., Pediocin PA-1 (*Pediococcus acidilactici*), *Pediococcus acidilactici* DSM 10313 are used. The identified peptides help enhance fish growth and survival; improve water quality through decomposition of organic substances; are effective in suppressing pathogenic microflora, reduce the risk of diseases in aquaculture; are active against *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus* and *Clostridium botulinum*. By adding bacteriocins to feeds, fish farmers can reduce dependence on traditional treatments. Thus, bacteriocins are an emerging group of antimicrobial drugs which can improve the quality of aquaculture produce, make it safer for consumers, and expand the drug market for aquaculture facilities.

Keywords: antibiotics; bacteria; antibiotic resistance; aquaculture; aquatic organisms; feeds; bacteriocins

For citation: Tkacheva I. V., Kokhanov Yu. B., Nedina N. D. Prospects for using bacteriocins in aquaculture. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. doi: 10.17076/eb2108

Funding. The work was carried out within the project "Development of customized new-generation feeds with plant-based and probiotic additives to augment survival and enhance health in fish" (FZNE-2023-0003) and subsidized by federal budgetary allocations to higher education institutions for actions to support student scientific communities.

Введение

Аквакультура стала одним из важнейших направлений в обеспечении продовольственной безопасности человечества. С начала 2000-х годов наблюдается стремительный рост производства гидробионтов, что привело к необходимости совершенствования методов контроля заболеваний и использования противомикробных препаратов.

Применение антибиотиков в аквакультуре – сложная и неоднозначная тема, вызывающая серьезные опасения. С одной стороны, антибиотики необходимы для борьбы с бактериальными инфекциями, которые могут привести к массовой гибели рыбы и серьезным экономическим потерям. С другой стороны, их применение сопряжено с рисками, влияющими на здоровье человека и окружающую среду. Чрезмерное или нерациональное применение антибиотиков приводит к появлению устойчивых штаммов бактерий, которые становятся

невосприимчивыми к лечению. Эти устойчивые бактерии могут передаваться людям через потребление зараженной рыбы или через контакт с водой, загрязненной антибиотиками, что представляет серьезную угрозу для здоровья населения, поскольку лечение инфекций, вызванных такими бактериями, становится крайне сложным. Для решения этих проблем активно исследуются и внедряются альтернативные подходы, например, улучшение санитарных условий (создание более гигиеничных условий выращивания, профилактика заболеваний, использование вакцин и иммуностимуляторов), разработка новых лекарственных препаратов.

Все чаще в качестве замены антибиотикам используются пробиотические препараты, представляющие собой живые микроорганизмы, которые при введении в рацион или водную среду аквакультуры способствуют улучшению здоровья и роста гидробионтов. Одним из ключевых механизмов их действия является выработка бактериоцинов. Эти природные

антимикробные пептиды, продуцируемые различными бактериями, могут подавлять рост патогенных микроорганизмов без использования традиционных антибиотиков. Применение бактериоцинов в аквакультуре способствует снижению зависимости от антибиотиков, что, в свою очередь, уменьшает риск развития устойчивых штаммов бактерий. Их использование способствует созданию более здоровой экосистемы в замкнутых водоемах, улучшая общий иммунитет рыб и снижая заболеваемость [Dagbandi, 2022]. Именно поэтому бактериоцины считаются перспективным направлением в разработке альтернативных методов борьбы с бактериальными инфекциями в аквакультуре. Активно ведутся исследования с целью поиска

новых бактериоцинов с улучшенными свойствами, разработки методов их стабилизации и оптимизации способов применения. В настоящей работе представлен обзор применения бактериоцинов в аквакультурной отрасли.

Проведенный литературный поиск выявил наиболее распространенные и применяемые бактериоцины (таб.).

В целом исследования подтверждают, что бактериоцины обладают значительным потенциалом в борьбе с патогенными микроорганизмами и могут быть использованы в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Однако необходимы дальнейшие исследования для оценки безопасности и эффективности их применения в различных условиях.

Применение бактериоцинов, выделенных из пробиотических штаммов Application of bacteriocins isolated from probiotic strains

Штаммы рода <i>Bacillus</i> Strains of the genus <i>Bacillus</i>	<ul style="list-style-type: none"> - улучшение роста и выживаемости рыб; - улучшение качества воды за счет разложения органических веществ; - эффективное подавление патогенной микрофлоры, снижение риска заболеваний в аквакультуре [Похиленко и др., 2022] - improvement of fish growth and survival; - improvement of water quality due to the decomposition of organic substances; - effective suppression of pathogenic microflora, reducing the risk of diseases in aquaculture [Pokhilenko et al., 2022]
Штамм <i>Lactobacillus plantarum</i> 42 Lactobacillus plantarum strain 42	активен против <i>Enterococcus faecalis</i> [Миралимова и др., 2016] active against <i>Enterococcus faecalis</i> [Miralimova et al., 2016]
Штамм <i>Lactobacillus plantarum</i> YRL45 Lactobacillus plantarum YRL45 strain	<ul style="list-style-type: none"> - применение у мышей увеличивало относительное количество полезных бактерий (Muribaculaceae, Akkermansia); - снижение количества патогенных бактерий (<i>Lachnoclostridium</i>); - выработка короткоцепочечных жирных кислот в кишечнике [Bu et al., 2023] - in mice, the use increased the relative number of beneficial bacteria (Muribaculaceae, Akkermansia); - reduction in the number of pathogenic bacteria (<i>Lachnoclostridium</i>); - production of short-chain fatty acids in the intestine [Bu et al., 2023]
Штамм <i>Lactobacillus plantarum</i> W3-2 Lactobacillus plantarum strain W3-2	<ul style="list-style-type: none"> - значительная антимикробная активность против <i>Staphylococcus aureus</i>, <i>Listeria monocytogenes</i> и <i>Bacillus cereus</i>; - перспектива для применения в пищевой промышленности и медицине [Wang et al., 2023] - significant antimicrobial activity against <i>Staphylococcus aureus</i>, <i>Listeria monocytogenes</i>, and <i>Bacillus cereus</i>; - potential for use in the food industry and medicine [Wang et al., 2023]
Штаммы <i>Lactococcus</i> spp. Strains of <i>Lactococcus</i> spp.	выраженная антагонистическая активность против <i>Listeria monocytogenes</i> и <i>Staphylococcus aureus</i> [Батаева и др., 2018] pronounced antagonistic activity against <i>Listeria monocytogenes</i> and <i>Staphylococcus aureus</i> [Bataeva et al., 2018]
Педиоцин PA-1 (штаммы <i>Pediococcus acidilactici</i>) Pediocin PA-1 (strains of <i>Pediococcus acidilactici</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - активность против широкого спектра грамположительных бактерий, включая <i>Listeria monocytogenes</i>, <i>Bacillus cereus</i> и некоторые штаммы <i>Clostridium botulinum</i>; - улучшение микробиоты кишечника у гидробионтов [Porto et al., 2017] - activity against a wide range of gram-positive bacteria, including <i>Listeria monocytogenes</i>, <i>Bacillus cereus</i>, and some strains of <i>Clostridium botulinum</i>; - improvement of the intestinal microbiota in hydrobionts [Porto et al., 2017]
Штамм <i>Pediococcus acidilactici</i> DSM 10313 Strain <i>Pediococcus acidilactici</i> DSM 10313	продуцирование педиоцина, эффективно ингибирующего рост патогенных микроорганизмов, таких как <i>Listeria monocytogenes</i> [Skariyachan, Govindarian, 2019] production of pediocin, which effectively inhibits the growth of pathogenic microorganisms such as <i>Listeria monocytogenes</i> [Skariyachan, Govindarian, 2019]

Роль бактериоцинов в системе биофлор

Изучение роли бактериоцинов в биофлоре является перспективным направлением исследований в области аквакультуры. Понимание того, как бактериоцины влияют на состав и функционирование биофлоры, может привести к разработке более эффективных и устойчивых систем выращивания водных организмов. Необходимо определить, какие именно виды бактерий, присутствующие в биофлоре, продуцируют бактериоцины. Это включает в себя выделение и культивирование бактерий из биофлоры, а также анализ их способности продуцировать антимикробные вещества. Современные методы молекулярной биологии, такие как секвенирование генома и метагеномика, значительно облегчают этот процесс.

Секвенирование микробного ила из системы биофлоры вызывает большой интерес среди ученых, так как, зная состав флоры, их можно использовать не только в качестве биологического фильтра для очищения воды, но и в других отраслях аквакультуры и сельского хозяйства.

Для получения подробной информации о микробном сообществе используют метод метагеномного секвенирования генов 16S рРНК. Это метод для изучения микроорганизмов, который позволяет «посчитать» сотни видов бактерий, в том числе и некультивируемых. Суть метода заключается в выделении гена 16S рРНК – уникального и высококонсервативного участка нуклеотидной цепи всех бактерий, по которому принято идентифицировать микробные организмы [Брындина, Корчагина, 2022; Огаркова и др., 2022].

Так, ученые из ФГБОУ «Воронежский государственный лесотехнический университет» провели исследования микробиома активного ила из сточных вод левобережных городских очистных сооружений г. Воронежа и микробиома кишечника свиньи. Получение ДНК осуществлялось с помощью коммерческого набора ZymoBIOMICS DNA Microprep Kit. Эксперимент проводился на платформе IonTorrentPGM. Исследование секвенирования 16S рРНК бактерий продемонстрировало изменения в структуре микробиома желудочно-кишечного тракта свиньи, исходного активного ила и их смеси. Наблюдалось увеличение численности *Bacteroidetes* в 1,7 раза, *Verrucomicrobiota* – в 18,5 раза, численность *Firmicutes* снизилась в 1,1 раза, *Actinobacteria* – в 5,5 раза. Кроме того, происходит подавление роста *Fusobacteriota* и *Campilobacterota*. Обнаружены различия в составе бактерий на

уровне класса, семейства и рода в пределах каждого типа исходного активного ила и его модификации с микробиомом желудочно-кишечного тракта свиньи [Abanoz, Kunduhoglu, 2018]. Добавление микробиома ЖКТ способствовало образованию популяций микроорганизмов, которые могут успешно подавлять рост нитевидных бактерий. Изменение состава активного ила привело к формированию у его представителей ферментных систем, адаптированных к специфическим загрязнителям сточных вод.

Еще одно исследование по секвенированию активного ила провели ученые из г. Перми. Они рассматривали бактериальные сообщества активного ила на коммунальных биологических очистных сооружениях. Препараты хромосомной ДНК были получены с помощью фенольного метода. Секвенирование проводили на платформе MiSeq и IonTorrentPGM (Roche Kara Library Prep Kit Illumina 50 Rxn / Набор КАРА).

Результаты исследования биоразнообразия активных илов коммунальных и промышленных очистных сооружений с использованием метода метагеномного секвенирования показали, что основные филумы во всех изученных образцах – это *Proteobacteria*, *Firmicutes* и *Bacteroidetes*. Протеобактерии занимают главное место во всех образцах, кроме активного ила нефтехимического предприятия, где преобладают *Firmicutes*. Типичный представитель водной микрофлоры *Acinetobacter* sp. доминирует в активном иле коммунального предприятия, а *Sulfuricurvum* sp. и *Romboutsia* sp. – в образцах из очистных сооружений целлюлозно-бумажного и нефтеперерабатывающего предприятий соответственно. Эпифлуоресцентная микроскопия подтвердила, что смешанные бактериальные культуры активных илов из разных источников после выращивания на среде с ограниченным содержанием азота и избытком источника углерода – бутирата натрия – накапливают ПГА в клетках. Это можно рассматривать как вариант использования избытков активного ила [Сибиева и др., 2019].

Использование бактериоцинов в кормах для объектов аквакультуры

В последние годы мировая индустрия аквакультуры все больше внимания уделяет использованию бактериоцинов в качестве средства борьбы с устойчивостью к антибиотикам. Их биологическая природа коренится в белковой структуре, которая варьируется у разных типов бактериоцинов, что позволяет им

воздействовать на конкретные бактерии. Можно предположить, что бактериоцины воздействуют на жизненно важные функции чувствительных клеток, но большинство действуют, образуя в мембране поры или каналы, способствующие нарушению мембранного потенциала чувствительных клеток. Анионные липиды цитоплазматической мембраны являются основными рецепторами бактериоцинов для стимуляции порообразования [Абдуллаева, 2024]. Механизм действия заключается в связывании с мембраной клетки-мишени, что приводит к образованию пор или ферментативному разрушению основных компонентов клетки [Arakawa, 2019; El-Gendy et al., 2021]. Это влечет нарушение клеточных процессов, таких как усвоение питательных веществ, что в конечном итоге приводит к гибели клеток. Бактериоцины предлагают целенаправленный подход к контролю популяций бактерий, что делает их многообещающей альтернативой традиционным антибиотикам и снижает риск развития устойчивости к антибиотикам в аквакультуре.

Страны с передовой практикой аквакультуры первыми начали добавлять бактериоцины в корма для рыб в качестве природных антимикробных средств. Например, исследования, проведенные в Норвегии, показали, что бактериоцины могут эффективно уничтожать патогенные бактерии в популяциях рыб, улучшая общее состояние их здоровья и темпы роста [Todorov et al., 2019; Mokoena et al., 2021].

Добавляя бактериоцины в рацион рыб, можно снизить зависимость от антибиотиков, которые способствуют развитию антибиотикорезистентности. Кроме того, использование бактериоцинов помогает стимулировать иммунную систему рыб, укрепляя их здоровье и повышая устойчивость к инфекциям. Такой подход не только поддерживает устойчивые методы аквакультуры, но и обеспечивает более здоровую популяцию рыб. В свою очередь, укрепление иммунитета приводит к улучшению темпов роста рыб и повышению устойчивости к экологическим стрессорам [Kumariya et al., 2019; Naskar, Kim, 2021]. Положительное влияние на здоровье и рост не только повышает эффективность методов аквакультуры, но и соответствует растущему спросу на устойчивые и экологически чистые методы разведения рыбы.

Заключение

Снижение устойчивости рыбы к антибиотикам является актуальной проблемой, которую можно существенно решить благодаря инновационному использованию бактериоцинов

в кормах для аквакультуры. Антибиотики уже давно используются в рыбоводстве, помогая бороться с бактериальными инфекциями и стимулируя рост. Однако их чрезмерное использование привело к тревожному уровню устойчивости водных бактерий к антибиотикам, что создает серьезную угрозу для здоровья не только рыбы, но и людей. Применение антимикробных пептидов, выделенных из пробиотических препаратов, в том числе системы биофлок, является перспективным для улучшения здоровья рыб и поддержания устойчивых методов аквакультуры.

Литература

- Абдуллаева Н. Ф. Современные представления о механизме действия бактериоцинов молочнокислых бактерий (обзор) // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 10. С. 23–27.
- Батаева Д. С., Соколова О. В., Зайко Е. В., Пашкова В. В. Оценка бактериоциногенности индигенных молочнокислых бактерий, полученных с туш крупного рогатого скота // Теория и практика переработки мяса. 2018. № 2. С. 22–32. doi: 10.21323/2414-438X-2018-3-2-22-32
- Брындина Л. В., Корчагина А. Ю. Исследование микробиома активного ила и оптимизация его метаболической активности // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2022. Т. 8, № 1. С. 25–42.
- Миралимова Ш. М., Огай Д. К., Кутлиева Г. Д., Ибрагимова А., Сохибназарова Х. Синтез бактериоциноподобного вещества штаммом *Lactobacillus plantarum* 42, выделенным из квашеной капусты // Научный результат. Медицина и фармация. 2016. Т. 2, № 3. С. 56–63. doi: 10.18413/2313-8955-2016-2-3-56-63
- Огарков О. Б., Жданова С. Н., Орлова Е. А., Хромова П. А., Белькова Н. Л., Синьков В. В., Кондратов И. Г. Секвенирование 16S-ITS-23S фрагмента рибосомального оперона обеспечивает необходимые и достаточные условия для идентификации микобактерий // Инфекция и иммунитет. 2022. № 5. С. 976–980. doi: 10.15789/2220-7619-ROS-1871
- Похиленко В. Д., Калмантаев Т. А., Дунайцев И. А., Детушев К. В., Кисличкина А. А., Мухина Т. Н., Чукина И. А. Выделение и характеристика бактериоцина штамма *Bacillus subtilis*, изолированного из пассивной флоры // Бактериология. 2022. Т. 7, № 1. С. 9–17. doi: 10.20953/2500-1027-2022-1-9-17
- Сибиева Л. М., Дегтярева И. А., Сироткин А. С., Бабынин Э. В. Состав микробного сообщества активного ила в процессах совместной биологической и реагентной очистки сточных вод // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, № 2(29). С. 302–312. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-302-312
- Abanoz H. S., Kunduhoglu B. Antimicrobial activity of a bacteriocin produced by *Enterococcus faecalis* KT11 against some pathogens and antibiotic-resistant bacteria // Korean J. Food Sci. Anim. Resour. 2018. Vol. 38(5). P. 1064–1079. doi: 10.5851/kosfa.2018.e40

Arakawa K. Basic antibacterial assay to screen for bacteriocinogenic lactic acid bacteria and to elementarily characterize their bacteriocins // *Methods Mol. Biol.* 2019. Vol. 1887. P. 15–22. doi: 10.1007/978-1-4939-8907-2_2

Bu Y., Liu Y., Zhang T., Liu Y., Zhang Z., Yi H. Bacteriocin-producing *Lactiplantibacillus plantarum* YRL45 enhances intestinal immunity and regulates gut microbiota in mice // *Nutrients*. 2023. Vol. 15(15). P. 3437. doi: 10.3390/nu15153437

Darbandi A., Asadi A., Ari M. M., Ohadi E., Talebi M., Zadeh M. H., Emamie A. D., Ghanavati R., Kakanj M. Bacteriocins: properties and potential use as antimicrobials // *J. Clin. Lab. Anal.* 2022. Vol. 36(1). e24093. doi: 10.1002/jcla.24093

El-Gendy A. O., Brede D. A., Essam T. M., Amin M. A., Ahmed S. H., Holo H., Nes I. F., Shamiikh Y. I. Purification and characterization of bacteriocins-like inhibitory substances from food isolated *Enterococcus faecalis* OS13 with activity against nosocomial enterococci // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11(1). Art. 3795. doi: 10.1038/s41598-021-83357-z

Kumariya R., Garsa A. K., Rajput Y. S., Sood S. K., Akhtar N., Patel S. Bacteriocins: classification, synthesis, mechanism of action and resistance development in food spoilage causing bacteria // *Microb. Pathog.* 2019. Vol. 128. P. 171–177. doi: 10.1016/j.micpath.2019.01.002

Mokoena M. P., Omatola C. A., Olaniran A. O. Applications of lactic acid bacteria and their bacteriocins against food spoilage microorganisms and foodborne pathogens // *Molecules*. 2021. Vol. 26(22). Art. 7055. doi: 10.3390/molecules26227055

Naskar A., Kim K. S. Potential novel food-related and biomedical applications of nanomaterials combined with bacteriocins // *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13(1). Art. 86. doi: 10.3390/pharmaceutics13010086

Porto M. C., Kuniyoshi T. M., Azevedo P. O., Vitolo M., Oliveira R. P. *Pediococcus* spp.: An important genus of lactic acid bacteria and pediocin producers // *Biotechnol. Adv.* 2017. Vol. 35(3). P. 361–374. doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.03.004

Skariyachan S., Govindarajan S. Biopreservation potential of antimicrobial protein producing *Pediococcus* spp. towards selected food samples in comparison with chemical preservatives // *Int. J. Food Microbiol.* 2019. Vol. 291. P. 189–196. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.12.002

Todorov S. D., Franco B. D. G. M., Tagg J. R. Bacteriocins of Gram-positive bacteria having activity spectra extending beyond closely-related species // *Benef. Microbes*. 2019. Vol. 10(3). P. 315–328. doi: 10.3920/BM2018.0126

Wang Z., Zhang Y., Chen C., Fan S., Deng F., Zhao L. A novel bacteriocin isolated from *Lactobacillus plantarum* W3-2 and its biological characteristics // *Front. Nutr.* 2023. Vol. 9. Art. 1111880. doi: 10.3389/fnut.2022.1111880

References

Abanoz H. S., Kunduhoglu B. Antimicrobial activity of a bacteriocin produced by *Enterococcus faecalis* KT11 against some pathogens and antibiotic-resistant

bacteria. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 2018;38(5): 1064–1079. doi: 10.5851/kosfa.2018.e40

Abdullaeva N. F. Modern Concepts of the Mechanism of Action of Lactic Acid Bacteria's Bacteriocins (Review). *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2014;10:23–27. (In Russ.)

Arakawa K. Basic antibacterial assay to screen for bacteriocinogenic lactic acid bacteria and to elementarily characterize their bacteriocins. *Methods Mol. Biol.* 2019;1887:15–22. doi: 10.1007/978-1-4939-8907-2_2

Bataeva D. S., Sokolova O. V., Zayko E. V., Pashkova V. V. Assessment of the bacteriocinogenicity of indigen lactobacillus onto cattle carcasses. *Teoriâ i praktika pererabotki mâsa = Theory and Practice of Meat Processing*. 2018;2: 22–32. (In Russ.). doi: 10.21323/2414-438X-2018-3-2-22-32

Bryndina L. V., Korchagina A. Yu. Investigation of the microbiome of activated sludge and optimization of its metabolic activity. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya = Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2022;8(1):25–42. (In Russ.)

Bu Y., Liu Y., Zhang T., Liu Y., Zhang Z., Yi H. Bacteriocin-producing *Lactiplantibacillus plantarum* YRL45 enhances intestinal immunity and regulates gut microbiota in mice. *Nutrients*. 2023;15(15):3437. doi: 10.3390/nu15153437

Darbandi A., Asadi A., Ari M. M., Ohadi E., Talebi M., Zadeh M. H., Emamie A. D., Ghanavati R., Kakanj M. Bacteriocins: properties and potential use as antimicrobials. *J. Clin. Lab. Anal.* 2022;36(1):e24093. doi: 10.1002/jcla.24093

El-Gendy A. O., Brede D. A., Essam T. M., Amin M. A., Ahmed S. H., Holo H., Nes I. F., Shamiikh Y. I. Purification and characterization of bacteriocins-like inhibitory substances from food isolated *Enterococcus faecalis* OS13 with activity against nosocomial enterococci. *Scientific Reports*. 2021;11(1): 3795. doi: 10.1038/s41598-021-83357-z

Kumariya R., Garsa A. K., Rajput Y. S., Sood S. K., Akhtar N., Patel S. Bacteriocins: classification, synthesis, mechanism of action and resistance development in food spoilage causing bacteria. *Microb. Pathog.* 2019;128:171–177. doi: 10.1016/j.micpath.2019.01.002

Miralimova Sh. M., Ogai D. K., Kutlieva G. D., Ibragimova A., Sokhibnazarova Kh. Synthesis of bacteriocin-like substance by *Lactobacillus plantarum* 42 strain isolated from sour cabbage. *Nauchnyi rezul'tat. Meditsina i farmatsiya = Research Result. Medicine and Pharmacy*. 2016;2(3):56–63. (In Russ.). doi: 10.18413/2313-8955-2016-2-3-56-63

Mokoena M. P., Omatola C. A., Olaniran A. O. Applications of lactic acid bacteria and their bacteriocins against food spoilage microorganisms and foodborne pathogens. *Molecules*. 2021;26(22):7055. doi: 10.3390/molecules26227055

Naskar A., Kim K. S. Potential novel food-related and biomedical applications of nanomaterials combined with bacteriocins. *Pharmaceutics*. 2021;13(1):86. doi: 10.3390/pharmaceutics13010086

Ogarkov O. B., Zhdanova S. N., Orlova E. A., Khromova P. A., Belkova N. L., Sinkov V. V., Kondratov I. G. 16S-ITS-23S rRNA operon segment sequencing provides necessary and sufficient conditions for bacterial species-specific identification. *Infektsiya i immunitet = Infection and immunity*. 2022;5:976–980. (In Russ.). doi: 10.15789/2220-7619-ROS-1871

Pokhilenko V. D., Kalmantaev T. A., Dunaitsev I. A., Detushev K. V., Kislichkina A. A., Mukhina T. N., Chukina I. A. Isolation and characteristics of bacteriocin from *Bacillus subtilis* strain, isolated from *Passiflora*. *Bakteriologiya = Bacteriology*. 2022;7(1): 9–17. (In Russ.). doi: 10.20953/2500-1027-2022-1-9-17

Porto M. C., Kuniyoshi T. M., Azevedo P. O., Vitolo M., Oliveira R. P. *Pediococcus* spp.: An important genus of lactic acid bacteria and pediocin producers. *Biotechnol. Adv.* 2017;35(3):361–374. doi: 10.1016/j.biotechadv.2017.03.004

Sibieva L. M., Degtyareva I. A., Sirotkin A. S., Babynin E. V. Composition of activated sludge microbial community used in the combined biological and

chemical wastewater treatment. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology*. 2019;9(2-29):302–312. (In Russ.). doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-302-312

Skariyachan S., Govindarajan S. Biopreservation potential of antimicrobial protein producing *Pediococcus* spp. towards selected food samples in comparison with chemical preservatives. *Int. J. Food Microbiol.* 2019;291:189–196. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.12.002

Todorov S. D., Franco B. D. G. M., Tagg J. R. Bacteriocins of Gram-positive bacteria having activity spectra extending beyond closely-related species. *Benef. Microbes*. 2019;10(3):315–328. doi: 10.3920/BM2018.0126

Wang Z., Zhang Y., Chen C., Fan S., Deng F., Zhao L. A novel bacteriocin isolated from *Lactobacillus plantarum* W3-2 and its biological characteristics. *Front. Nutr.* 2023;9:1111880. doi: 10.3389/fnut.2022.1111880

Поступила в редакцию / received: 22.05.2025; принята к публикации / accepted: 07.10.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ткачева Ирина Васильевна

д-р биол. наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Центр агробиотехнологии»; профессор кафедры «Технические средства аквакультуры»

e-mail: tkacheva-irina85@mail.ru

Коханов Юрий Борисович

старший преподаватель кафедры «Технические средства аквакультуры»

e-mail: ykohanov@donstu.ru

Недина Надежда Дмитриевна

магистр

e-mail: nadyhka1514@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Tkacheva, Irina

Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, Chief Researcher of Agrobiotechnology Research Laboratory, Professor of Department of Technical Facilities in Aquaculture

Kokhanov, Yuri

Senior Lecturer

Nedina, Nadezhda

Master's Student