

Биологически активные пептиды хлеба: источники, пути образования, свойства (мини-обзор)

Ирина М. Жаркова¹ zharir@mail.ru  0000-0001-8662-4559
Данил С. Иванчиков¹ ivanchikov_99@mail.ru  0000-0001-9814-6005

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Развитие биоинформационных методов исследования способствует глубокому изучению различных биологических объектов, в том числе животного и растительного происхождения, с целью получения из них препаратов, которые могут эффективно применяться в медицине и различных отраслях пищевой промышленности. Можно предположить, что результаты многочисленных исследований, демонстрирующих преимущества хлеба «на закваске» перед «дрожжевым» по ряду показателей (снижение гликемической нагрузки и аллергенных свойств белков, более высокая антиоксидантная активность, лучшая усвояемость минеральных веществ и др.), обусловлены наряду с другими факторами и наличием определенных биологически активных пептидов. Цель исследования – поиск, систематизация и анализ научно-технической информации, связанной с изучением протеолиза в полуфабрикатах хлебопекарного производства и высвобождением пептидов, их биологической активности. Проведенный анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что биологически активные пептиды находятся в центре внимания ученых всего мира. По-прежнему сохраняют актуальность исследования, направленные на способы их извлечения из разнообразного сырья, условия, от которых зависит количество и свойства высвободившихся или синтезированных биологически активных пептидов. Общим в патогенезе большинства хронических воспалительных заболеваний является участие окислительного стресса, связанного с продукцией активных форм кислорода. Поэтому пищевые антиоксиданты, содержащиеся в продуктах питания, в настоящее время представляют собой новую эффективную стратегию противодействия такому состоянию. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление роли пептидов, содержащихся в пищевых продуктах, в том числе хлебобулочных изделиях на закваске, в профилактике ряда социально-значимых заболеваний, в первую очередь, заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, биологически активные пептиды, хлебопекарная закваска, антиоксидантные свойства, противомикробное действие.

Biologically active bread peptides: sources, routes of formation, properties (mini review)

Irina M. Zharkova¹ zharir@mail.ru  0000-0001-8662-4559
Danil S. Ivanchikov¹ ivanchikov_99@mail.ru  0000-0001-9814-6005

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The development of bioinformatics research methods facilitates the in-depth study of various biological objects, including those of animal and plant origin, with the goal of producing products from them that can be effectively used in medicine and various sectors of the food industry. It can be assumed that the results of numerous studies demonstrating the advantages of sourdough bread over yeast bread in a number of respects (reduced glycemic load and allergenic properties of proteins, higher antioxidant activity, better digestibility of minerals, etc.) are due, among other factors, to the presence of certain biologically active peptides. The purpose of this study was to identify, systematize, and analyze scientific and technical information related to the study of proteolysis in semi-finished bakery products, the release of peptides, and their biological activity. The conducted analysis of the scientific and technical literature indicates that biologically active peptides are the focus of attention of scientists worldwide. Research into methods for extracting them from a variety of raw materials and the conditions that determine the quantity and properties of released or synthesized biologically active peptides remains relevant. Oxidative stress, associated with the production of reactive oxygen species, is a common factor in the pathogenesis of most chronic inflammatory diseases. Therefore, dietary antioxidants currently represent a new, effective strategy for counteracting this condition. Therefore, research aimed at identifying the role of peptides contained in food products, including sourdough bakery products, in the prevention of a number of socially significant diseases, primarily cardiovascular diseases, is particularly relevant.

Keywords: lactic acid bacteria, biologically active peptides, bakery sourdough, antioxidant properties, antimicrobial action.

Введение

Развитие биоинформационных методов исследования способствует глубокому изучению различных биологических объектов, в том числе животного и растительного происхождения, с целью получения из них препаратов, которые могут эффективно применяться в медицине и различных отраслях пищевой промышленности. Одной из групп таких препаратов являются биологически активные пептиды, представляющие собой соединения из нескольких остатков α-аминокислот, связанных пептидной связью (–C(O)NH–) и обладающие способностью оказывать положительное влияние на организм человека (рисунок 1) [1, 2]. Пептиды отличаются по

размеру, т. е. по количеству аминокислотных остатков и в зависимости от входящих в них аминокислот, имеют различную полярность и растворимость. Для медицинских целей пептиды выделяют из сырья в «чистом» виде и производят фармацевтические препараты с доказанными свойствами и эффективностью [1]. Биологически активные пептиды обладают и технологической значимостью для производства пищевых продуктов, поскольку способны предотвращать их окислительную порчу, выполнять функцию эмульгатора, антимикробного агента. Пептидам, богатым глутаминовой кислотой приписывают эффект кокуми, когда возникает ощущение более гармоничного вкуса продукта [3].

Для цитирования

Жаркова И.М., Иванчиков Д.С. Биологически активные пептиды хлеба: источники, пути образования, свойства (мини-обзор) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 66–77. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-66-77

For citation

Zharkova I.M., Ivanchikov D.S. Biologically active bread peptides: sources, routes of formation, properties (mini review). Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 66–77. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-66-77

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

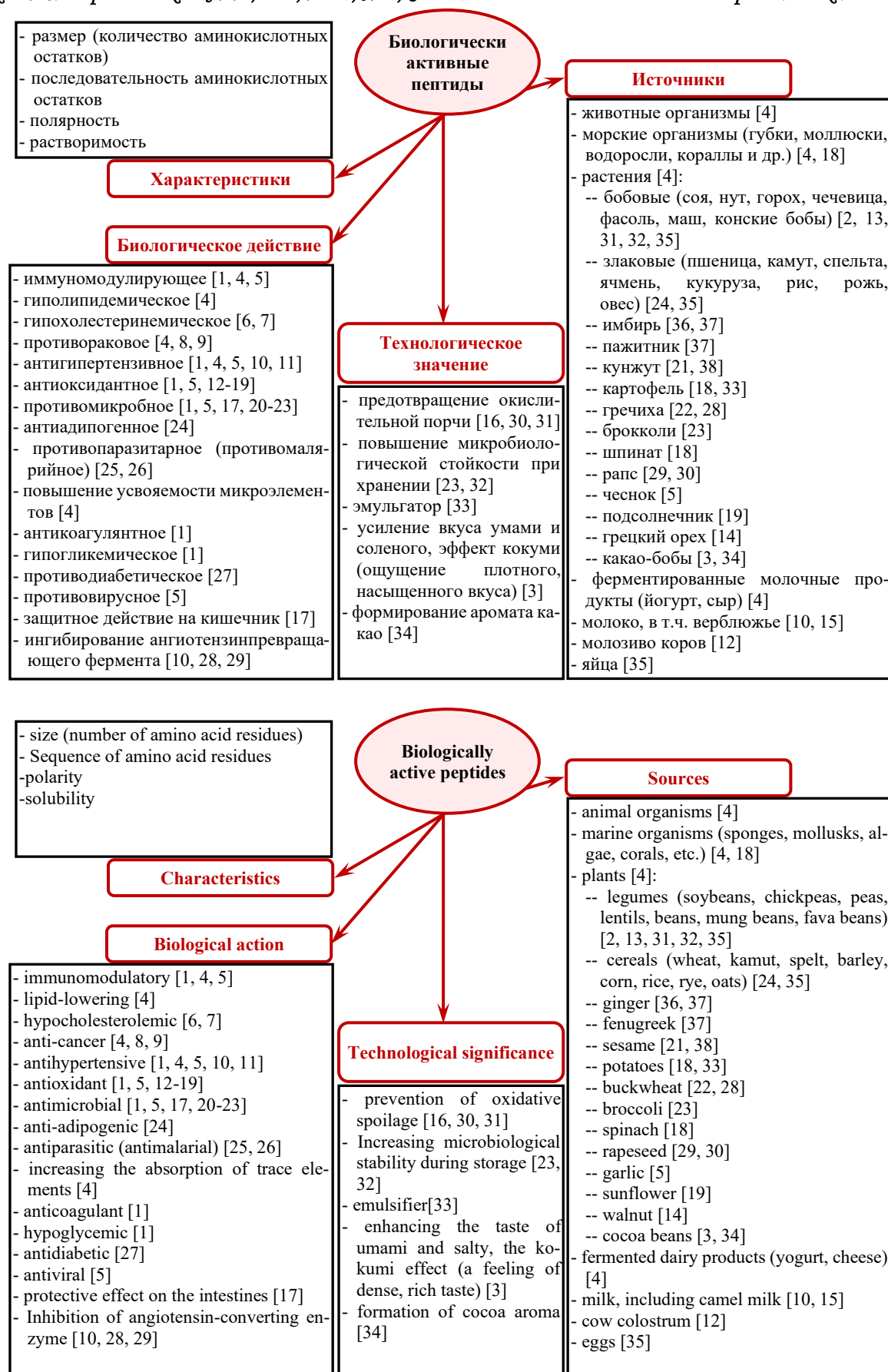


Рисунок 1. Источники и свойства биологически активных пептидов

Figure 1. Sources and properties of biologically active peptides

Биологически активные пептиды защиты в белковой матрице и одним из путей их высвобождения служит ее ферментативный гидролиз под воздействием протеолитических ферментов, содержащихся в исходном сырье или дополнительно вносимых для достижения определенного технологического эффекта. Поэтому можно с уверенностью предположить, что в пищевых продуктах, в технологическом цикле производства которых имеет место протеолиз белковых веществ, будут содержаться разнообразные пептиды, отдельные из которых, вероятно, способны проявлять биологическую активность. Например, в технологии хлеба протеолиз, следовательно, и образование пептидов наблюдаются на этапе брожения полуфабрикатов (закваски, теста). Способов приготовления хлебобулочных изделий, в том числе из пшеничной муки, существует множество. Они отличаются не только перечнем используемого сырья, но и способом биологического разрыхления. Так, в качестве источника технологической микрофлоры могут выступать хлебопекарные дрожжи (прессованные, сушеные), закваски (естественного брожения или приготовленные с помощью «чистых» культур). В зависимости от выбранного источника технологической микрофлоры, режимов и параметров приготовления полуфабрикатов хлебопекарного производства существенно различается длительность технологического процесса и, как следствие, глубина протекающих микробиологических и биохимических процессов, в том числе, и гидролиза белков.

Можно предположить, что результаты многочисленных исследований, демонстрирующих преимущества хлеба «на закваске» перед «дрожжевым» по ряду показателей (снижение гликемической нагрузки и аллергенных свойств белков, более высокая антиоксидантная активность, лучшая усвояемость минеральных веществ и др.), обусловлены наряду с другими факторами и наличием определенных биологических активных пептидов.

В связи с этим, поиск, систематизация и анализ научно-технической информации, связанной с изучением протеолиза в полуфабрикатах хлебопекарного производства и высвобождением пептидов, их биологической активности является актуальным и служит **целью** настоящего исследования.

Объекты и методы

Поиск информации на русском и английском языках вели по базам PubMed и e-library с помощью ключевых слов «пептиды хлеба» и «peptides in bread» без ограничения по году издания.

Результаты и обсуждение

Злаковые и бобовые культуры составляют основу ежедневного рациона питания не только в России, но и практически во всех странах мира. Этим обусловлена их потенциальная важность в качестве источника пептидов, образуемых при ферментации [35].

Приготовление теста на закваске является наиболее традиционным (пришедшим из глубины веков) и эффективным инструментом не только для обеспечения реологических свойств теста и структуры мякиша разнообразных хлебобулочных изделий, богатой вкусо-ароматической палитры, но также для увеличения длительности срока годности и повышения их пищевой ценности [39, 40].

В общем смысле под хлебопекарной закваской понимают полуфабрикат, состоящий из муки и воды, который подвергается ферментативному воздействию молочнокислых бактерий и дрожжей [40, 41]. Распад нативных белков злаков в процессе ферментации закваски зависит от активности нативных ферментов злаков (первичный протеолиз) и метаболической активности бактерий (вторичный протеолиз) [42]. Углубленное изучение протеолиза в заквасках, появление новых знаний о деталях этого процесса позволяет целенаправленно оптимизировать процесс брожения для улучшения качества хлеба. Доказано наличие взаимосвязи между метаболизмом микробиоты закваски и активностью нативных ферментов злаков: увеличение концентрации кислот, продуцируемых молочнокислыми бактериями, вызывает разрушение дисульфидных связей в глютене, повышая растворимость глютеиновых белков и, следовательно, их восприимчивость к ферментативному расщеплению. Снижение pH закваски до значений, оптимальных для нативных протеаз злаков (для эндогенных пшеничных протеиназ оптимум находится в зоне pH 3,0–4,0 [43]), способствует их активизации и, следовательно, высвобождению из белковой матрицы пептидов различных размеров. Пептидазы молочнокислых бактерий закваски осуществляют полный протеолиз (вторичный протеолиз), в результате которого образуются свободные аминокислоты, которые, в свою очередь, подвергаются различным катаболическим реакциям под действием тех же микроорганизмов [42, 44]. В результате в закваске происходит накопление низкомолекулярных соединений, разрушение антипитательных факторов (фитиновой кислоты), образуются пептиды различной молекулярной массы [39, 35]. Пептиды и аминокислоты являются важными предшественниками летучих ароматических соединений, которые формируют характерный вкус хлеба, приготовленного с помощью закваски.

Опубликовано большое количество результатов исследований, доказывающих, что разные лактобациллы не одинаково гидролизуют белки злаковых культур, продуцируя множество разнообразных пептидов. Например, Galli с соавт. изучен 131 штамм гомо- и гетероферментативных бактерий рода *Lactobacillus*, изолированных из итальянских заквасок [42, 45]. Из них только 3 штамма – *L. farciminis* H3 и A11 и *L. sanfranciscensis* I4, накапливали пептиды, обладающие высокой антиоксидантной и противовоспалительной активностью. Luti S. с соавт. исследовали состав, свойства этих пептидов и сохраняемость их биологической активности в хлебе [35]. Они установили, что большинство образовавшихся пептидов состоит из 20–39 аминокислот, присутствуют и более короткие пептиды. Основная часть идентифицированных Luti S. с соавт. пептидов образовалась в результате гидролиза глиадинов, глютелинов, серпинов и β -амилазы пшеницы. Они обнаружили различия в последовательностях и составе аминокислотных остатков, образующих пептиды в тесте и в готовом хлебе, однако биологическая активность пептидов в хлебе сохраняется. Причем пептиды, выделенные из теста и из хлеба обладали практически одинаковой антиоксидантной (обусловлена снижением уровня внутриклеточных активных форм кислорода) и противовоспалительной активностью, подтвержденной на макрофагах. Особый интерес представляет штамм *L. rossiae* Gd40, который был способен снижать уровень активных форм кислорода сильнее, чем аскорбиновая кислота, во всех клеточных линиях, рассмотренных в исследовании [42]. Авторы делают вывод о целесообразности выработки хлеба на закваске, содержащей один или несколько штаммов лактобацилл, активно образующих пептиды, и о необходимости дальнейшего изучения их способности противодействовать воспалению, предотвращать развитие хронических дегенеративных заболеваний, в частности синдрома раздраженного кишечника и диабета 1 типа [35].

Проблема микробиологической порчи хлебобулочных изделий в процессе хранения, обусловленной развитием плесневых грибов, – одна из актуальнейших проблем хлебопекарной отрасли. В связи с появлением неоспоримых результатов исследований, демонстрирующих потенциал негативного воздействия высоких доз консервантов (сорбата и пропионата кальция) на здоровье потребителей, Европейская директива по консервантам снизила допустимые концентрации сорбата до 0,2%, а пропионата до 0,3% [46]. В связи с этим остро стоит задача поиска природных консервантов с выраженной противогрибковой активностью.

В свете все возрастающего стремления потребителей к более здоровому образу жизни, приготовление хлебобулочных изделий на закваске способно заменить традиционно используемые химические консерванты экологически безопасными альтернативами с «чистой этикеткой», поскольку молочнокислые бактерии заквасок способны синтезировать или высвобождать противомикробные вещества *in situ* [47].

На сегодняшний день антимикробное и особенно противогрибковое действие молочнокислых бактерий в заквасках связывают с продукцией ими широкого спектра органических кислот, как алифатических, так и с гидроксильными и фенильными заместителями, а также бензойных кислот, которые часто действуют синергетически и способствуют гидролизу белков муки с образованием противогрибковых пептидов. Более того, такие пептиды были идентифицированы как в пшеничных заквасках, так и в заквасках на основе нетрадиционных субстратов, представляя собой последовательности, встроенные в специфические белки различных видов муки. Однако данные о противогрибковых пептидах заквасок на основе различных видов муки пока крайне ограничены; их изучение является перспективным направлением. Механизмы действия противогрибковых соединений в заквасках до сих пор недостаточно изучены. [43]

Garofalo С. с соавт. протестировали 216 культур молочнокислых бактерий, выделенных из заквасок и теста для хлеба и панеттоне, на ингибирующую активность против *Aspergillus japonicus*, *Eurotium repens* и *Penicillium roseo-purpureum* [48]. Наиболее перспективными штаммами признаны *Lactobacillus rossiae* LD108 и *Lactobacillus paralimentarius* PB127, благодаря их способности гидролизовать α -глиадин пшеницы с высвобождением активных противогрибковых пептидов. То есть функция глютелиновых белков не сводится лишь к образованию сетчатого каркаса теста, формирующего впоследствии структуру мякиша хлеба, но также заключается в способности высвобождать активные ппиды при гидролизе, в том числе обладающие противогрибковой активностью. С учётом вышеизложенного можно предположить, что отсутствие белков, способных гидролизаться до противогрибковых пептидов, может быть одной из возможных причин ускоренной порчи безглютенового хлеба [47], а также недостаточный гидролиз или его отсутствие при ускоренных технологиях приготовления пшеничных хлебобулочных изделий.

Rizzello C.G. с соавт. проанализирована ингибирующая активность пептидов, высвобождаемых при ферментативном гидролизе белков семян сои (*Glycine max*), чечевицы (*Lens culinaris*), гороха (*Pisum sativum*), бобов (*Vicia faba*) и нута (*Cicer arietinum*), в отношении грибов *Penicillium roqueforti* DPPMAF1 (являются одними из наиболее устойчивых к химическим консервантам грибов). Наивысшие уровни ингибирования индикаторного гриба были обнаружены у гидролизатов из чечевичной (22%), гороховой (59%) и бобовой муки (73%). При этом лишь гидролизат гороха был эффективен в отношении 13 из 15 штаммов плесневых грибов, выделенных на хлебопекарных предприятиях (ингибирующая активность от 10 до 95%), тогда как гидролизаты чечевицы и конских бобов препятствовали росту лишь 4 штамма [32]. Была выявлена противогрибковая активность пяти пептидов, содержащихся в гидролизате гороха: введение 1,6% лиофилизированного горохового гидролизата в хлеб, приготовленный с использованием хлебопекарных дрожжей, позволило замедлить плесневение упакованной в полиэтиленовые пакеты продукции до 21 дня, что сравнимо с введением в рецептуру 0,3% пропионата кальция. Авторами показана возможность усиления противомикробного эффекта при введении лиофильно высушенного горохового гидролизата (1,6%) в тесто с закваской, содержащей молочнокислые бактерии штамма *L. plantarum* 1A7 (ранее этот штамм показал свою эффективность для prolongирования срока годности хлеба): в условиях высокой концентрации искусственного заражения рост плесневых грибов задерживался, по крайней мере, до 21 дня хранения при комнатной температуре (ингибирующая активность была выше, чем у пропионата кальция в дозировке 0,3%) [32].

Исследования Hernández-Figueroa R.H. с соавт. подтверждают эффективность закваски с *Lb. plantarum* в качестве альтернативы пропионату натрия, благодаря выраженным противогрибковым свойствам [49]. Ström K. с соавт. показали способность *L. plantarum* MiLAB 393 продуцировать противогрибковые циклические дипептиды цикло(L-Phe-L-Pro) и цикло(LPhe-транс-4-OH-L-Pro) [50], а Dal Bello F. с соавт. идентифицировали среди противогрибковых пептидов *L. plantarum* FST1.7 дипептиды цикло(L-Leu-L-Pro) и цикло(L-Phe-L-Pro) [51]. При этом авторы считают, что противогрибковая активность циклических дипептидов молочнокислых бактерий является вторичным эффектом, а основная причина кроется в чувстве кворума или других неизвестных механизмах [50]. Система чувства кворума молочнокислых бактерий еще полностью не изучена [52].

Молочнокислые бактерии *L. brevis* также исследованы на способность высвобождения противогрибковых пептидов. Так, Axel C. с соавт. исследовали штамм *L. brevis* R2Δ и установили, что он синтезирует дипептиды цикло(Leu-Pro), цикло(ProPro) и цикло(Phe-Pro) [53]. Nionelli L. с соавт. идентифицировали 9 противогрибковых пептидов при гидролизе остатков хлеба *L. brevis* AM7 [54]. Причем, все эти пептиды были зашифрованы в последовательностях белков пшеницы.

Выявлена эффективность сочетания водных экстрактов из фасоли пинто с приготовлением теста на закваске с *Lactobacillus brevis* AM7: рост плесневых грибов на ломтиках хлеба не наблюдался в течение как минимум 14 дней хранения при комнатной температуре (уровень защиты сопоставим с использованием 0,3% пропионата кальция) [55].

Противогрибковые метаболиты *P. pentosaceus*, выделенного из пшеничной закваски, представлены циклическим дипептидом, эфиром жирной кислоты, гидроксильированным эфиром жирной кислоты и 3-изобутил 2,5 – пиперазиндион [56].

Противогрибковые пептиды обнаружены в гидролизате белков зародышей пшеницы [57].

Verni M. с соавт. показали, что в конских бобах противогрибковые пептиды зашифрованы в вицилине и легумине [58]. Wang P. и Ma T. исследовали влияние условий ферментации гречихи татарской бактериями *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 14917 и установили, что максимальное количество пептидов в среде ($22,18 \pm 1,02$ мг/мл) накапливается при 30 °C за 48 ч в водно-мучной смеси влажностью 60% с долей инокулята 12,87% [22].

Установлено, что низкомолекулярные пептиды могут индуцировать определенные защитные реакции в клетке молочнокислых бактерий, в частности, продукцию бактериоцинов [59]. В результате скрининга 34 штаммов молочнокислых бактерий из коллекции НИЦ «Курчатовский институт» Беловой А.М. с соавт. выделены четыре (*Latilactobacillus sakei* B-8952 и *Lactiplantibacillus plantarum* B-5337, B-5002, B-4487), проявляющие антагонизм по отношению к условно-патогенным бактериям *S. aureus* и *E. coli* [60]. Авторы установили, что данный эффект достигается благодаря синтезу бактериоцинов, представляющих собой белки с молекулярной массой 4–14 кДа. Yilmaz B. с соавт. изучена способность бактерий *Lactiplantibacillus plantarum* (ранее их называли *Lactobacillus plantarum*) способствовать образованию двухпептидного бактериоцина – плантарицина, активного в отношении грамположительных бактерий рода *Bacillus* и плесневых грибов родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Mucor* и *Penicillium* [61].

Поскольку, как показано выше, различные соединения, продуцируемые и выделяемые молочнокислыми бактериями в матрице закваски, могут оказывать синергетический эффект, успешное сочетание различных видов и штаммов молочнокислых бактерий является ключом к проявлению противогрибкового эффекта [43].

Cicchi С. с соавт. исследовали водные экстракты, полученных из хлеба, приготовленного из разных видов муки (спельты и пшеницы) с использованием двух вариантов разрыхления теста: с помощью закваски (штаммы *Companilactobacillus farciminis* A11 и H3 и *Fructilactobacillus sanfranciscensis* I4 были отобраны ранее из-за способности усиливать антиоксидантные и противовоспалительные свойства закваски) или хлебопекарных дрожжей (штамм *Saccharomyces cerevisiae* LV8) [17]. Пептиды из пшеничной и спельтовой муки демонстрировали схожие хроматографические профили. Основные различия были обусловлены типом ферментации: ферментация с помощью закваски способствовала накоплению большего количества пептидов. В водном экстракте из спельтового хлеба, приготовленного на закваске, было обнаружено более высокое содержание пептидов, что, вероятно, обусловлено более высоким содержанием белка в спельте по сравнению с пшеницей. Масс-спектрометрическим методом установлено, что ферментация на закваске увеличивает количество уникальных пептидов в пшеничной муке по сравнению с ферментацией на хлебопекарных дрожжах. Напротив, количество пептидов, высвобождаемых из муки спельты, оставалось постоянным независимо от метода разрыхления. Выявлена более высокая биологическая активность пептидов, высвобожденных из белков спельты, независимо от выбранного способа разрыхления (дрожжи или закваска). Эксперименты, проведенные на органоидах кишечника мышей, дополнительно подтвердили повышенную биологическую активность пептидов (антимикробную, антиоксидантную), полученных из спельты, ферментированной молочнокислыми бактериями.

Coda R. с соавт. исследовали активность антиоксидантных пептидов, образованных в заквасках из различных зерновых культур (пшеница, рожь, спельта, полба, овес, рис, камут, ячмень, кукуруза), приготовленных с помощью комбинации молочнокислых бактерий (*Lactobacillus alimentarius* 15 M, *L. brevis* 14G, *L. sanfranciscensis* 7A, LS3, LS10, LS19, LS23, LS38, LS47 и *L. hilgardii* 51B) [16]. Контролем в данной серии экспериментов служил образец теста без бактериального инокулята, который

химически подкисляли до pH 3,5 смесью молочной и уксусной кислот (молярное соотношение 4:1) и выдерживали в тех же условиях, что и опытные образцы. Концентрации пептидов в водном экстракте из химически подкисленного теста были примерно в 2–3 раза ниже, чем в соответствующих заквасках. Несмотря на активацию эндогенных ферментов злаков вследствие подкисления, антиоксидантная активность химически подкисленного теста (контроль) была очень низкой. Активность удаления радикалов в отношении стабильного радикала DPPH у водных экстрактов из химически подкисленного теста находилась в диапазоне от 0,2% до 5,5%. Почти все образцы водных экстрактов из заквасок показали заметное увеличение активности удаления радикалов по сравнению с образцами из химически подкисленного теста. Наибольшая активность удаления радикалов была обнаружена у заквасок из пшеницы ($48,0 \pm 0,4\%$), камута ($39,0 \pm 0,2\%$), спельты ($37,3 \pm 0,4\%$) и ржи ($35,4 \pm 0,5\%$).

В водных экстрактах, полученных из заквасок, идентифицировали 25 пептидов длиной от 8 до 57 аминокислотных остатков: почти все из них имели общие структурные особенности, типичные для антиоксидантных пептидов. Все очищенные фракции пептидов продемонстрировали антиоксидантную активность в условиях *ex vivo* на мышинных фибробластах, искусственно подвергнутых окислительному стрессу [16].

В гидролизате белков нута Гаравири М. с соавт. идентифицировали гидрофобный пептид, способный связываться с радикалами Fe^{3+} –TPTZ, DPPH и ABTS, что обуславливает перспективность его применения в качестве антиоксиданта в пищевой промышленности [31].

В гидролизатах конских бобов Samaci S.P. с соавт. с помощью пептидомного анализа идентифицировали 2031 пептид, среди которых 9 показали 100% гомологию с ранее известными антиоксидантными пептидами [13]. По мнению авторов, перспективно применение таких гидролизатов в качестве функциональных пищевых ингредиентов при производстве продуктов питания.

Заключение

Проведенный анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что биологически активные пептиды находятся в центре внимания ученых всего мира. По-прежнему сохраняют актуальность исследования, направленные на способы их извлечения из разнообразного сырья, условия, от которых зависит количество и свойства высвободившихся или синтезированных биологически активных пептидов.

Общим в патогенезе большинства хронических воспалительных заболеваний является участие окислительного стресса, связанного с продукцией активных форм кислорода. Поэтому пищевые антиоксиданты, содержащиеся в продуктах питания, в настоящее время представляют собой новую эффективную стратегию противодействия такому состоянию [62]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на выявление роли

пептидов, содержащихся в пищевых продуктах, в том числе хлебобулочных изделиях на закваске, в профилактике ряда социально-значимых заболеваний, в первую очередь, заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00275, <https://rscf.ru/project/24-26-00275/>.

Литература

- 1 Nasri M. Protein hydrolysates and biopeptides: production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review // *Advances in Food and Nutrition Research*. 2017. V. 81. P. 109–159. doi: 10.1016/bs.afnr.2016.10.003.
- 2 Ахангаран М., Афанасьев Д.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г., Гаравири М. Биоактивные пептиды и антипитательные вещества нута: характеристика и свойства (обзор) // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. Т. 183. № 1. С. 214–223. doi: 10.30901/2227-8834-2022-1-214-223.
- 3 Salger M., Stark T.D., Hofmann T. Taste modulating peptides from overfermented cocoa beans // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019. V. 67. № 15. P. 4311–4320. doi: 10.1021/acs.jafc.9b00905.
- 4 Cicero A.F.G., Fogacci F., Colletti A. Potential role of bioactive peptides in prevention and treatment of chronic diseases: a narrative review // *British Journal of Pharmacology*. 2017. V. 174. № 11. P. 1378–1394. doi: 10.1111/bph.13608.
- 5 Chidike Ezeorba T.P., Ezugwu A.L., Chukwuma I.F., Anaduaka E.G., Udenigwe C.C. Health-promoting properties of bioactive proteins and peptides of garlic (*Allium sativum*) // *Food Chemistry*. 2024. V. 435. P. 137632. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137632.
- 6 Nagaoka S. Structure–function properties of hypolipidemic peptide // *Journal of Food Biochemistry*. 2019. V. 43. № 1. e12539. doi: 10.1111/jfbc.12539.
- 7 Zhong F., Liu J., Ma J.J., Shoemaker C.F. Preparation of hypocholesterol peptides from soy protein and their hypocholesterolemic effect in mice // *Food Research International*. 2007. V. 40. № 6. P. 661–667. doi: 10.1016/j.foodres.2007.01.005.
- 8 Díaz-Gómez J.L., Castorena-Torres F., Preciado-Ortiz R.E., García-Lara S. Anti-cancer activity of maize bioactive peptides // *Frontiers in Chemistry*. 2017. V. 5. P. 44. doi: 10.3389/fchem.2017.00044.
- 9 Barati M., Javanmardi F., Mousavi Jazayeri S.M.H., Jabbari M., Rahmani J., Barati F. et al. Techniques, perspectives, and challenges of bioactive peptide generation: A comprehensive systematic review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. V. 19. № 4. P. 1488–1520. doi: 10.1111/1541-4337.12578.
- 10 Seppo L., Jauhiainen T., Poussa T., Korpela R. A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects // *American Journal of Clinical Nutrition*. 2003. V. 77. № 2. P. 326–330. doi: 10.1093/ajcn/77.2.326.
- 11 Bhat Z.F., Kumar S., Bhat H.F. Antihypertensive peptides of animal origin: A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. V. 57. № 3. P. 566–578. doi: 10.1080/10408398.2014.898241.
- 12 Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Ожгихина А.С., Пестова И.Г. Новый антиоксидантный пептид и механизм биологической активности // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2023. Т. 17. № 3. С. 148–156. doi: 10.22450/19996837_2023_3_148.
- 13 Samaei S.P., Ghorbani M., Tagliazucchi D., Martini S., Gotti R., Themelis T. et al. Functional, nutritional, antioxidant, sensory properties and comparative peptidomic profile of faba bean (*Vicia faba* L.) seed protein hydrolysates and fortified apple juice // *Food Chemistry*. 2020. V. 330. P. 127120. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127120.
- 14 Wang M., Sun X., Luo W., Božović S., Gong C., Ren J. Characterization and analysis of antioxidant activity of walnut-derived pentapeptide PW5 via nuclear magnetic resonance spectroscopy // *Food Chemistry*. 2021. V. 339. P. 128047. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128047.
- 15 Al-Shamsi K.A., Mudgil P., Hassan H.M., Maqsood S. Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems // *Journal of Dairy Science*. 2018. V. 101. № 1. P. 47–60. doi: 10.3168/jds.2017-13194.
- 16 Coda R., Rizzello C.G., Pinto D., Gobbetti M. Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. V. 78. № 4. P. 1087–1096. doi: 10.1128/AEM.06837-11.
- 17 Cicchi C., Leri M., Bucciantini M., Galli V., Guerrini S., Jiménez-Ortas Á., Ceacero-Heras D. et al. Sourdough Breads Made with Selected *Lactobacillus* Strains and Spelt Flour Contain Peptides That Positively Impact Intestinal Barrier // *Foods*. 2025. V. 14. № 18. P. 3184. doi: 10.3390/foods14183184.
- 18 Yesiltas B., García-Moreno P.J., Gregersen S., Olsen T.H., Jones N.C., Hoffmann S.V., Marcatili P. et al. Antioxidant peptides derived from potato, seaweed, microbial and spinach proteins: Oxidative stability of 5% fish oil-in-water emulsions // *Food Chemistry*. 2022. V. 385. P. 132699. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132699.
- 19 Tonolo F., Coletta S., Fiorese F., Grinzato A., Albanesi M., Folda A., Ferro S. et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model // *Food Chemistry*. 2024. V. 439. P. 138124. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138124.
- 20 Miao J., Liu G., Ke C., Fan W., Li C., Chen Y. et al. Inhibitory effects of a novel antimicrobial peptide from kefir against *Escherichia coli* // *Food Control*. 2016. V. 65. P. 63–72. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.01.023.
- 21 Zhu Z., Pan F., Wang O., Zhao L., Zhao L. Antibacterial Effect of Sesame Protein-Derived Peptides against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*: In Silico and In Vitro Analysis // *Nutrients*. 2024. V. 16. № 1. P. 175. doi: 10.3390/nu16010175.
- 22 Wang P., Ma P. Production of Bioactive Peptides from Tartary Buckwheat by Solid-State Fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 14917 // *Foods (Basel, Switzerland)*. 2024. V. 13. № 19. P. 3204. doi: 10.3390/foods13193204.

- 23 Andrés C.M.C., Pérez de la Lastra J.M., Munguira E.B., Juan C.A., Pérez-Lebeña E. The Multifaceted Health Benefits of Broccoli-A Review of Glucosinolates, Phenolics and Antimicrobial Peptides // *Molecules* (Basel, Switzerland). 2025. V. 30. № 11. P. 2262. doi: 10.3390/molecules30112262.
- 24 Ruiz-López F.J., Espinosa-Rodríguez B.A., Silva-Mares D.A., González-Martínez B.E., López-Cabanillas Lomelí M., Méndez-López L.F., Vázquez-Rodríguez J.A. In Silico Identification of Peptides with PPAR γ Antagonism in Protein Hydrolysate from Rice (*Oryza sativa*) // *Pharmaceuticals* (Basel, Switzerland). 2023. V. 16. № 3. P. 440. doi: 10.3390/ph16030440.
- 25 Zhang D., He X., Cao J. Zhongguo xue xi chong bing fang zhi za zhi // *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*. 2023. V. 35. № 2. P. 191–198. doi: 10.16250/j.32.1374.2023011.
- 26 Lou J., Zhang D., Wu J., Zhu G., Zhang M., Tang J., Fang Y. et al. Antimalarial activity of cecropin antimicrobial peptides derived from *Anopheles* mosquitoes // *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 2024. V. 68. № 7. e0031124. doi: 10.1128/aac.00311-24.
- 27 Admassu H., Gasmalla M.A.A., Yang R., Zhao W. Bioactive peptides derived from seaweed protein and their health benefits: antihypertensive, antioxidant, and antidiabetic properties // *Journal of Food Science*. 2018. V. 83. № 1. P. 6–16. doi: 10.1111/1750-3841.14011.
- 28 Li Y., Yang N., Shi F., Ye F., Huang J. Isolation and identification of angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from Tartary buckwheat albumin // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. V. 103. № 10. P. 5019–5027. doi: 10.1002/jsfa.12573.
- 29 Duan X., Dong Y., Zhang M., Li Z., Bu G., Chen F. Identification and molecular interactions of novel ACE inhibitory peptides from rapeseed protein // *Food Chemistry*. 2023. V. 422. P. 136085. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136085.
- 30 Beaubier S., Durand E., Lenclume C., Fine F., Aymes A., Framboisier X., Kapel R. et al. Chelating peptides from rapeseed meal protein hydrolysates: identification and evaluation of their capacity to inhibit lipid oxidation // *Food Chemistry*. 2023. V. 422. P. 136187. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136187.
- 31 Гаравири М., Дегтярев И.А., Фоменко И.А., Чернуха И.М., Машенцева Н.Г. Структурный анализ и молекулярный докинг нового антиоксидантного пептида из гидролизата белков нута (*Cicer arietinum* L.) // *Пищевая промышленность*. 2025. № 9. С. 153–158. doi: 10.52653/PPI.2025.9.9.026.
- 32 Rizzello C.G., Lavecchia A., Gramaglia V., Gobbetti M. Long-term fungal inhibition by *Pisum sativum* flour hydrolysate during storage of wheat flour bread // *Applied and Environmental Microbiology*. 2015. V. 81. № 12. P. 4195–4206. doi: 10.1128/AEM.04088-14.
- 33 Bashash M., Wang-Pruski G., He Q.S., Sun X. The emulsifying capacity and stability of potato proteins and peptides: A comprehensive review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024. V. 23. № 5. e70007. doi: 10.1111/1541-4337.70007.
- 34 John W.A., Böttcher N.L., Aßkamp M., Bergounhou A., Kumari N., Ho P.W., D'Souza R.N. et al. Forcing fermentation: Profiling proteins, peptides and polyphenols in lab-scale cocoa bean fermentation // *Food Chemistry*. 2019. V. 278. P. 786–794. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.108.
- 35 Luti S., Mazzoli L., Ramazzotti M. et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected *Lactobacilli* strains are retained in breads // *Food Chemistry*. 2020. V. 322. P. 126710. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126710.
- 36 Purohit K., Pathak R., Hayes E., Sunna A. Novel bioactive peptides from ginger rhizome: Integrating in silico and in vitro analysis with mechanistic insights through molecular docking // *Food Chemistry*. 2025. V. 484. P. 144432. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.144432.
- 37 Siddiqui I., Owais M., Husain Q. Antimicrobial effects of peptides from fenugreek and ginger proteins using Fe₃O₄@PDA-MWCNT conjugated trypsin by improving enzyme stability & applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 282. Pt 5. P. 137197. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137197.
- 38 Wang X., Ai X., Zhu Z., Zhang M., Pan F., Yang Z., Wang O. et al. Pancreatic lipase inhibitory effects of peptides derived from sesame proteins: In silico and in vitro analyses // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. V. 222. Pt A. P. 1531–1537. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.09.259.
- 39 Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C.G. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation // *International Journal of Food Microbiology*. 2019. V. 302. P. 103–113. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018.
- 40 Жаркова И.М., Росляков Ю.Ф., Иванчиков Д.С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53. № 3. С. 525–544. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2455.
- 41 De Vuyst L., Van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation // *Advances in Applied Microbiology*. 2017. V. 100. P. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003.
- 42 Galli V., Mazzoli L., Luti S. et al. Effect of selected strains of *Lactobacilli* on the antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdough // *International Journal of Food Microbiology*. 2018. V. 286. P. 55–65. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.018.
- 43 Oleinikova Y., Amangeldi A., Zhaksylyk A., Saubenova M., Sadanov A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies // *Foods*. 2025. V. 14. № 14. P. 2443. doi: 10.3390/foods14142443.
- 44 Gänzle M.G., Laponen J., Gobbetti M. Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality // *Trends in Food Science & Technology*. 2008. V. 19. № 10. P. 513–521. doi: 10.1016/j.tifs.2008.04.002.
- 45 Galli V., Venturi M., Pini N., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Liquid and firm sourdough fermentation: microbial robustness and interactions during consecutive backslappings // *LWT - Food Science and Technology*. 2019. V. 105. P. 9–15. doi: 10.1016/j.lwt.2019.02.004.
- 46 European Parliament and Council Directive No 95/2/EC of 20 February 1995 on food additives other than colours and sweeteners // *Official Journal of the European Communities*. 1995. L 61. P. 1–40.
- 47 Axel C., Zannini E., Arendt E.K. Mold spoilage of bread and its biopreservation: A review of current strategies for bread shelf life extension // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. V. 57. № 16. P. 3528–3542. doi: 10.1080/10408398.2016.1147417.
- 48 Garofalo C., Zannini E., Aquilanti L. et al. Selection of sourdough *Lactobacilli* with antifungal activity for use as biopreservatives in bakery products // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. V. 60. № 31. P. 7719–7728. doi: 10.1021/jf301173u.

- 49 Hernández-Figueroa R.H., Mani-López E., López-Malo A. Antifungal capacity of poolish-type sourdough supplemented with *Lactiplantibacillus plantarum* and its aqueous extracts in vitro and bread // *Antibiotics* (Basel, Switzerland). 2022. V. 11. № 12. P. 1813. doi: 10.3390/antibiotics11121813.
- 50 Ström K., Sjögren J., Broberg A., Schnürer J. *Lactobacillus plantarum* MiLAB 393 produces the antifungal cyclic dipeptides cyclo(L-Phe-L-Pro) and cyclo(L-Phe-trans-4-OH-L-Pro) and 3-phenyllactic acid // *Applied and Environmental Microbiology*. 2002. V. 68. № 9. P. 4322–4327. doi: 10.1128/AEM.68.9.4322-4327.2002.
- 51 Dal Bello F., Clarke C.I., Ryan L.A.M., Ulmer H., Schober T.J., Ström K., Sjögren J. et al. Improvement of the quality and shelf life of wheat bread by fermentation with the antifungal strain *Lactobacillus plantarum* FST 1.7 // *Journal of Cereal Science*. 2007. V. 45. № 3. P. 309–318. doi: 10.1016/j.jcs.2006.09.004.
- 52 Chai Y., Ma Q., Nong X., Mu X., Huang A. Dissecting LuxS/AI-2 quorum sensing system-mediated phenyllactic acid production mechanisms of *Lactiplantibacillus plantarum* L3 // *Food Research International*. 2023. V. 166. P. 112582. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112582.
- 53 Axel C., Zannini E., Arendt E.K., Waters D.M., Czerny M. Quantification of cyclic dipeptides from cultures of *Lactobacillus brevis* R2D by HRGC/MS using stable isotope dilution assay // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2014. V. 406. № 9-10. P. 2433–2444. doi: 10.1007/s00216-014-7620-3.
- 54 Nionelli L., Wang Y., Pontonio E., Immonen M., Rizzello C.G., Maina H.N., Katina K., Coda R. Antifungal effect of bioprocessed surplus bread as ingredient for bread-making: Identification of active compounds and impact on shelf-life // *Food Control*. 2020. V. 118. P. 107437. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107437.
- 55 Coda R., Rizzello C.G., Nigro F., De Angelis M., Arnault P., Gobbetti M. Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of *Phaeoecolus vulgaris* cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage // *Applied and Environmental Microbiology*. 2008. V. 74. № 23. P. 7391–7398. doi: 10.1128/AEM.01420-08.
- 56 Ebrahimi M., Sadeghi A., Mortazavi S.A. The use of cyclic dipeptide producing LAB with potent anti-aflatoxigenic capability to improve techno-functional properties of clean-label bread // *Annals of Microbiology*. 2020. V. 70. № 1. P. 24. doi: 10.1186/s13213-020-01571-y.
- 57 Rizzello C.G., Cassone A., Coda R., Gobbetti M. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making // *Food Chemistry*. 2011. V. 127. № 3. P. 952–959. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.063.
- 58 Verni M., Wang Y., Clement H., Koirala P., Rizzello C.G., Coda R. Antifungal peptides from faba bean flour fermented by *Levilactobacillus brevis* AM7 improve the shelf-life of composite faba-wheat bread // *International Journal of Food Microbiology*. 2023. V. 407. P. 110403. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110403.
- 59 Kareb O., Aider M. Quorum Sensing Circuits in the Communicating Mechanisms of Bacteria and Its Implication in the Biosynthesis of Bacteriocins by Lactic Acid Bacteria: A Review // *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2020. V. 12. № 1. P. 5–17. doi: 10.1007/s12602-019-09555-4.
- 60 Белова А.М., Каниковская А.А., Машенцева Н.Г. Скрининг молочнокислых бактерий – продуцентов антимикробных пептидов // *Поландовские чтения: сборник материалов VI Международной научно-практической молодежной конференции*. Москва, 2024. С. 233–240.
- 61 Yilmaz B., Bangar S.P., Echegaray N. et al. The Impacts of *Lactiplantibacillus plantarum* on the Functional Properties of Fermented Foods: A Review of Current Knowledge // *Microorganisms*. 2022. V. 10. № 4. P. 826. doi: 10.3390/microorganisms10040826.
- 62 Şanlıer N., Gökçen B.B., Sezgin A.C. Health benefits of fermented foods // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. V. 59. № 3. P. 506–527. doi: 10.1080/10408398.2017.1383355.

References

- 1 Nasri M. Protein hydrolysates and biopeptides Production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2017. vol. 81. pp. 109–159. doi:10.1016/bs.afnr.2016.10.003
- 2 Ahangaran M., Afanasev D.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G., Gharaviri M. Bioactive peptides and antinutrients in chickpea: description and properties (a review). *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2022. vol. 183. no. 1. pp. 214–223. doi:10.30901/2227-8834-2022-1-214-223 (in Russian)
- 3 Salger M., Stark T.D., Hofmann T. Taste Modulating Peptides from Overfermented Cocoa Beans. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2019. vol. 67. no. 15. pp. 4311–4320. doi:10.1021/acs.jafc.9b00905
- 4 Cicero A.F.G., Fogacci F., Colletti A. Potential role of bioactive peptides in prevention and treatment of chronic diseases: a narrative review. *British journal of pharmacology*. 2017. vol. 174. no. 11. pp. 1378–1394. doi:10.1111/bph.13608
- 5 Chidike Ezeorba T.P., Ezugwu A.L., Chukwuma I.F., Anaduaka E.G., Udenigwe C.C. Health-promoting properties of bioactive proteins and peptides of garlic (*Allium sativum*). *Food chemistry*. 2024. vol. 435. p. 137632. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137632
- 6 Nagaoka S. Structure–function properties of hypolipidemic peptide. *Journal of Food Biochemistry*. 2019. vol. 43. no. 1. p. e12539. doi:10.1111/jfbc.12539
- 7 Zhong F., Liu J., Ma J.J., Shoemaker C.F. Preparation of hypocholesterol peptides from soy protein and their hypocholesterolemic effect in mice. *Food Research International*. 2007. vol. 40. pp. 661–667. doi:10.1016/j.foodres.2006.11.011
- 8 Díaz-Gómez J.L., Castorena-Torres F., Preciado-Ortiz R.E., GarcíaLara S. Anti-cancer activity of maize bioactive peptides. *Frontiers in Chemistry*. 2017. no. 5. p. 44. doi:10.3389/fchem.2017.00044
- 9 Barati M., Javanmardi F., Mousavi Jazayeri S.M.H., Jabbari M., Rahmani J., Barati F. et al. Techniques, perspectives, and challenges of bioactive peptide generation: A comprehensive systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. no. 19(4). pp. 1488–1520. doi:10.1111/1541-4337.12578
- 10 Seppo L., Jauhiainen T., Poussa T., Korpela R. A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects. *The American journal of clinical nutrition*. 2003. vol. 77. no. 2. pp. 326–330. doi:10.1093/ajcn/77.2.326
- 11 Bhat Z.F., Kumar S., Bhat H.F. Antihypertensive peptides of animal origin: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2017. vol. 57. no. 3. pp. 566–578. doi:10.1080/10408398.2014.898241

- 12 Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Ozhgikhina A.S., Pestova I.G. New antioxidant peptide and mechanism of biological activity. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2023. vol. 17. no. 3. pp. 148–156. doi: 10.22450/19996837_2023_3_148 (in Russian)
- 13 Samaei S.P., Ghorbani M., Tagliazucchi D., Martini S., Gotti R., Themelis T. et al. Functional, nutritional, antioxidant, sensory properties and comparative peptidomic profile of faba bean (*Vicia faba* L.) seed protein hydrolysates and fortified apple juice. *Food Chemistry*. 2020. vol. 330. p. 127120. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127120
- 14 Wang M., Sun X., Luo W., Božović S., Gong C., Ren J. Characterization and analysis of antioxidant activity of walnut-derived pentapeptide PW5 via nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Food Chemistry*. 2021. vol. 339. p. 128047. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128047
- 15 Al-Shamsi K.A., Mudgil P., Hassan H.M., Maqsood S. Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in vitro and in food model systems. *Journal of Dairy Science*. 2018. vol. 101. no. 1. pp. 47–60. doi:10.3168/jds.2017-13194
- 16 Coda R., Rizzello C.G., Pinto D., Gobbetti M. Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. *Applied and environmental microbiology*. 2012. vol. 78. no. 4. pp. 1087–1096. doi:10.1128/AEM.06837-11
- 17 Cicchi C., Leri M., Bucciantini M., Galli V., Guerrini S., Jiménez-Ortas Á., Ceacero-Heras D. et al. Sourdough Breads Made with Selected *Lactobacillus* Strains and Spelt Flour Contain Peptides That Positively Impact Intestinal Barrier. *Foods*. 2025. no. 14. p. 3184. doi:10.3390/foods14183184
- 18 Yesiltas B., García-Moreno P.J., Gregersen S., Olsen T.H., Jones N.C., Hoffmann S.V., Marcatili P. et al. Antioxidant peptides derived from potato, seaweed, microbial and spinach proteins: Oxidative stability of 5% fish oil-in-water emulsions. *Food chemistry*. 2022. vol. 385. p. 132699. doi:10.1016/j.foodchem.2022.132699
- 19 Tonolo F., Coletta S., Fiorese F., Grinzato A., Albanesi M., Folda A., Ferro S. et al. Sunflower seed-derived bioactive peptides show antioxidant and anti-inflammatory activity: From in silico simulation to the animal model. *Food chemistry*. 2024. vol. 439. p. 138124. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.138124
- 20 Miao J., Liu G., Ke C., Fan W., Li C., Chen Y. et al. Inhibitory effects of a novel antimicrobial peptide from kefir against *Escherichia coli*. *Food Control*. 2016. vol. 65. pp. 63–72. doi:10.1016/j.foodcont.2016.01.023
- 21 Zhu Z., Pan F., Wang O., Zhao L., Zhao L. Antibacterial Effect of Sesame Protein-Derived Peptides against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*: In Silico and In Vitro Analysis. *Nutrients*. 2024. vol. 16. no. 1. p. 175. doi:10.3390/nu16010175
- 22 Wang P., Ma T. Production of Bioactive Peptides from Tartary Buckwheat by Solid-State Fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 14917. *Foods (Basel, Switzerland)*. 2024. vol. 13. no. 19. p. 3204. doi:10.3390/foods13193204
- 23 Andrés C.M.C., Pérez de la Lastra J.M., Munguira E.B., Juan C.A., Pérez-Lebeña E. The Multifaceted Health Benefits of Broccoli-A Review of Glucosinolates, Phenolics and Antimicrobial Peptides. *Molecules (Basel, Switzerland)*. 2025. vol. 30. no. 11. p. 2262. doi:10.3390/molecules30112262
- 24 Ruiz-López F.J., Espinosa-Rodríguez B.A., Silva-Mares D.A., González-Martínez B.E., López-Cabanillas Lomeli M., Méndez-López L.F., Vázquez-Rodríguez J.A. In Silico Identification of Peptides with PPAR γ Antagonism in Protein Hydrolysate from Rice (*Oryza sativa*). *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*. 2023. vol. 16. no. 3. p. 440. doi:10.3390/ph16030440
- 25 Zhang D., He X., Cao J. *Zhongguo xue xi chong bing fang zhi za zhi*. Chinese journal of schistosomiasis control. 2023. vol. 35. no. 2. pp. 191–198. doi:10.16250/j.32.1374.2023011
- 26 Lou J., Zhang D., Wu J., Zhu G., Zhang M., Tang J., Fang Y. et al. Antimalarial activity of cecropin antimicrobial peptides derived from *Anopheles* mosquitoes. *Antimicrobial agents and chemotherapy*. 2024. vol. 68. no. 7. p. e0031124. doi:10.1128/aac.00311-24
- 27 Admassu H., Gasmalla M.A.A., Yang R., Zhao W. Bioactive peptides derived from seaweed protein and their health benefits: Antihypertensive, antioxidant, and antidiabetic properties. *Journal of Food Science*. 2018. vol. 83. no. 1. pp. 6–16. doi: 10.1111/1750-3841.14011
- 28 Li Y., Yang N., Shi F., Ye F., Huang J. Isolation and identification of angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides from Tartary buckwheat albumin. *Journal of the science of food and agriculture*. 2023. vol. 103. no. 10. pp. 5019–5027. doi: 10.1002/jsfa.12573
- 29 Duan X., Dong Y., Zhang M., Li Z., Bu G., Chen F. Identification and molecular interactions of novel ACE inhibitory peptides from rapeseed protein. *Food chemistry*. 2023. vol. 422. p. 136085. doi:10.1016/j.foodchem.2023.136085
- 30 Beaubier S., Durand E., Lenclume C., Fine F., Aymes A., Framboisier X., Kapel R. et al. Chelating peptides from rapeseed meal protein hydrolysates: identification and evaluation of their capacity to inhibit lipid oxidation. *Food chemistry*. 2023. vol. 422. p. 136187. doi:10.1016/j.foodchem.2023.136187
- 31 Garaviri M., Degtyarev I.A., Fomenko I.A., Chernukha I.M., Mashentseva N.G. Structural analysis and molecular docking of a new antioxidant peptide from chickpea protein hydrolysate (*Cicer arietinum* L.). *Food processing industry*. 2025. no. 9. pp. 153–158. doi: 10.52653/PPI.2025.9.9.026 (in Russian)
- 32 Rizzello C.G., Lavecchia A., Gramaglia V., Gobbetti M. Long-term fungal inhibition by *Pisum sativum* flour hydrolysate during storage of wheat flour bread. *Applied and environmental microbiology*. 2015. no. 81. pp. 4195–4206. doi:10.1128/AEM.04088-14
- 33 Bashash M., Wang-Pruski G., He Q.S., Sun X. The emulsifying capacity and stability of potato proteins and peptides: A comprehensive review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2024. vol. 23. no. 5. p. e70007. doi:10.1111/1541-4337.70007
- 34 John W.A., Böttcher N.L., Aßkamp M., Bergounhou A., Kumari N., Ho P.W., D'Souza R.N. et al. Forcing fermentation: Profiling proteins, peptides and polyphenols in lab-scale cocoa bean fermentation. *Food chemistry*. 2019. vol. 278. pp. 786–794. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.108
- 35 Luti S., Mazzoli L., Ramazzotti M. et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdoughs containing selected *Lactobacilli* strains are retained in breads. *Food chemistry*. 2020. no. 322. p. 126710. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126710
- 36 Purohit K., Pathak R., Hayes E., Sunna A. Novel bioactive peptides from ginger rhizome: Integrating in silico and in vitro analysis with mechanistic insights through molecular docking. *Food chemistry*. 2025. vol. 484. p. 144432. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.144432
- 37 Siddiqui I., Owais M., Husain Q. Antimicrobial effects of peptides from fenugreek and ginger proteins using Fe₃O₄@PDA-MWCNT conjugated trypsin by improving enzyme stability & applications. *International journal of biological macromolecules*. 2024. vol. 282 (Pt 5). p. 137197. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137197

- 38 Wang X., Ai X., Zhu Z., Zhang M., Pan F., Yang Z., Wang O. et al. Pancreatic lipase inhibitory effects of peptides derived from sesame proteins: In silico and in vitro analyses. *International journal of biological macromolecules*. 2022. vol. 222 (Pt A). pp. 1531–1537. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.09.259
- 39 Gobetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C.G. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International journal of food microbiology*. 2019. no. 302. pp. 103–113. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018
- 40 Zharkova I.M., Roslyakov Yu.F., Ivanchikov D.S. Sourdoughs of Spontaneous (Natural) Fermentation in Modern Bakery Production. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023. vol. 53. no. 3. pp. 525–544. doi:10.21603/2074-9414-2023-3-2455 (in Russian)
- 41 de Vuyst L., van Kerrebroeck S., Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. *Advances in Applied Microbiology*. 2017. no. 100. pp. 49–160. doi: 10.1016/bs.aambs.2017.02.003
- 42 Galli V., Mazzoli L., Luti S. et al. Effect of selected strains of lactobacilli on the antioxidant and anti-inflammatory properties of sourdough. *International Journal of Food Microbiology*. 2018. no. 286. pp. 55–65. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.07.018
- 43 Oleinikova Y., Amangeldi A., Zhaksylyk A., Saubenova M., Sadanov A. Sourdough Microbiota for Improving Bread Preservation and Safety: Main Directions and New Strategies. *Foods*. 2025. no. 14. p. 2443. doi:10.3390/foods14142443
- 44 Gänzle M.G., Lopenen J., Gobetti M. Proteolysis in sourdough fermentations: Mechanisms and potential for improved bread quality. *Trends in Food Science & Technology*. 2008. no. 19. pp. 513–521. doi: 10.1016/j.tifs.2008.04.002
- 45 Galli V., Venturi M., Pini N., Guerrini S., Granchi L., Vincenzini M. Liquid and firm sourdough fermentation: Microbial robustness and interactions during consecutive backslappings. *LWT*. 2019. no. 105. pp. 9–15. doi: 10.1016/j.lwt.2019.02.004
- 46 European Parliament and Council Directive No 95/2/EC of 20 February 1995 on food additives other than colours and sweeteners. *Official Journal of the European Communities L* 61. 1995.
- 47 Axel C., Zannini E., Arendt E.K. Mold spoilage of bread and its biopreservation: A review of current strategies for bread shelf life extension. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2017. vol. 57. no. 16. pp. 3528–3542. doi: 10.1080/10408398.2016.1147417
- 48 Garofalo C., Zannini E., Aquilanti L. et al. Selection of sourdough lactobacilli with antifungal activity for use as biopreservatives in bakery products. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2012. vol. 60. no. 31. pp. 7719–7728. doi:10.1021/jf301173u
- 49 Hernández-Figueroa R.H., Mani-López E., López-Malo A. Antifungal Capacity of Poolish-Type Sourdough Supplemented with *Lactiplantibacillus plantarum* and Its Aqueous Extracts In Vitro and Bread. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*. 2022. no. 11. p. 1813. doi:10.3390/antibiotics11121813
- 50 Ström K., Sjögren J., Broberg A., Schnürer J. *Lactobacillus plantarum* MiLAB 393 Produces the Antifungal Cyclic Dipeptides Cyclo(L-Phe-L-Pro) and Cyclo(L-Phe-trans 4 OH-L-Pro) and 3 Phenyllactic Acid. *Applied and environmental microbiology*. 2002. no. 68. pp. 4322–4327. doi:10.1128/AEM.68.9.4322-4327.2002
- 51 Dal Bello F., Clarke C.I., Ryan L.A.M., Ulmer H., Schober T.J., Ström K., Sjögren J. et al. Improvement of the quality and shelf life of wheat bread by fermentation with the antifungal strain *Lactobacillus plantarum* FST 1.7. *Journal of Cereal Science*. 2007. no. 45. pp. 309–318. doi: 10.1016/j.jcs.2006.09.004
- 52 Chai Y., Ma Q., Nong X., Mu X., Huang A. Dissecting LuxS/AI 2 quorum sensing system-mediated phenyllactic acid production mechanisms of *Lactiplantibacillus plantarum* L3. *Food Research International*. 2023. no. 166. p. 112582. doi: 10.1016/j.foodres.2023.112582
- 53 Axel C., Zannini E., Arendt E.K., Waters D.M., Czerny M. Quantification of cyclic dipeptides from cultures of *Lactobacillus brevis* R2D by HRGC/MS using stable isotope dilution assay. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 2014. no. 406. pp. 2433–2444. doi: 10.1007/s00216-014-7620-3
- 54 Nionelli L., Wang Y., Pontonio E., Immonen M., Rizzello C.G., Maina H.N., Katina K., Coda R. Antifungal effect of bioprocessed surplus bread as ingredient for bread-making: Identification of active compounds and impact on shelf-life. *Food Control*. 2020. no. 118. p. 107437. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107437
- 55 Coda R., Rizzello C.G., Nigro F., De Angelis M., Arnault P., Gobetti M. Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of *Phaseolus vulgaris* cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage. *Applied and environmental microbiology*. 2008. no. 74. pp. 7391–7398. doi: 10.1128/AEM.01420-08
- 56 Ebrahimi M., Sadeghi A., Mortazavi S.A. The use of cyclic dipeptide producing LAB with potent anti-aflatoxigenic capability to improve techno-functional properties of clean-label bread. *Annals of Microbiology*. 2020. no. 70. p. 24. doi: 10.1186/s13213-020-01571-y
- 57 Rizzello C.G., Cassone A., Coda R., Gobetti M. Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making. *Food chemistry*. 2011. vol. 127. pp. 952–959. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.063
- 58 Verni M., Wang Y., Clement H., Koirala P., Rizzello C.G., Coda R. Antifungal peptides from faba bean flour fermented by *Levilactobacillus brevis* AM7 improve the shelf-life of composite faba-wheat bread. *International journal of food microbiology*. 2023. no. 407. p. 110403. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110403
- 59 Kareb O., Aider M. Quorum Sensing Circuits in the Communicating Mechanisms of Bacteria and Its Implication in the Biosynthesis of Bacteriocins by Lactic Acid Bacteria: A Review. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2020. no. 12. pp. 5–17. doi: 10.1007/s12602-019-09555-4
- 60 Belova A.M., Kanikovskaya A.A., Mashentseva N.G. Screening of lactic acid bacteria – producers of antimicrobial peptides. In: *Poland Readings. Collection of Proceedings of the VI International Scientific and Practical Youth Conference*. Moscow, 2024. pp. 233–240. (in Russian)
- 61 Yilmaz B., Bangar S.P., Echegaray N. 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. p. 826. doi:10.3390/microorganisms10040826
- 62 Şanlıer N., Gökçen B.B., Sezgin A.C. Health benefits of fermented foods. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2017. no. 25. pp. 1–22. doi:10.1080/10408398.2017.1383355

Сведения об авторах

Ирина М. Жаркова д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, zharir@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8662-4559>

Данил С. Иванчиков аспирант, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ivanchikov_99@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9814-6005>

Вклад авторов

Ирина М. Жаркова написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Данил С. Иванчиков обзор литературных источников по исследуемой проблеме

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Irina M. Zharkova Dr. Sci. (Engin.), professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, zharir@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8662-4559>

Danil S. Ivanchikov graduate student, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ivanchikov_99@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9814-6005>

Contribution

Irina M. Zharkova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Danil S. Ivanchikov review of the literature on an investigated problem

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 18/08/2025	После редакции 03/09/2025	Принята в печать 18/09/2025
Received 18/08/2025	Accepted in revised 03/09/2025	Accepted 18/09/2025