

Обзорная статья / Review article

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-3-10-27>

УДК 577.115:663.952.14



Обзор получения биологически активных пептидов из растительного сырья методом микробной ферментации

Д.И. Алексаночкин✉, Г.М. Керимова,
С.А. Кореньков, И.А. Фоменко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»;
г. Москва, Российская Федерация,
✉aleksanochkindi@list.ru

Аннотация. Введение. Биологически активные пептиды (БАП) обладают высокой физиологической активностью и представляют ценность для создания функциональных продуктов питания. Микробная ферментация является щадящей и эффективной альтернативой химическому и ферментативному гидролизам для получения БАП из растительного сырья. **Цель исследования.** Проведение систематического обзора современных данных о получении БАП из высокобелкового растительного сырья методом микробной ферментации для их последующего применения в пищевой промышленности. **Объекты и методы исследования.** Объекты – высокобелковое растительное сырье (злаковые, бобовые, масличные культуры) и протеолитические системы молочнокислых бактерий. Методы заключались в систематическом поиске и анализе научных публикаций (2021–2026 гг.) в базах Web of Science, Scopus, PubMed и eLibrary по профилю микробной ферментации растительных белков. **Результаты и обсуждение.** Проанализированы ресурсы и химический состав перспективных масличных, бобовых и злаковых культур. Детально рассмотрена трехкомпонентная протеолитическая система молочнокислых бактерий (клеточно-оболочечные протеиназы, транспортные системы, внутриклеточные пептидазы), обеспечивающая деструкцию устойчивых глобулярных белков. Систематизированы сведения об идентифицированных пептидах, демонстрирующих антиоксидантную, гипотензивную (ингибирование АПФ) и противовоспалительную активность. Показано, что микробная ферментация не только высвобождает целевые пептиды, но и улучшает органолептические свойства, выступая эффективным технологическим приемом модификации растительного сырья без использования жестких химических реагентов. **Заключение.** Микробная ферментация подтверждена как высокоэффективный метод получения БАП с широким спектром физиологического действия. Результаты обзора обосновывают перспективность использования ферментированных растительных субстратов в качестве функциональных ингредиентов и служат теоретической базой для разработки технологии получения БАП из семян и изолята конопли с целью создания новых альтернативных растительных напитков с заданными функциональными свойствами.

Ключевые слова: растительное сырье, биологически активные пептиды, микробная ферментация, молочнокислые микроорганизмы, пищевая промышленность, белковые ингредиенты

Для цитирования: Алексаночкин Д.И., Керимова Г.М., Кореньков С.А., Фоменко И.А. Обзор получения биологически активных пептидов из растительного сырья методом микробной ферментации. *Новые технологии / New technologies*. 2026; 22(3):10-27. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-3-10-27>

Финансирование: исследование проводилось в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ» FSMF-2026-0002. Original article

An overview of the production of biologically active peptides from plant materials using microbial fermentation

D.I. Aleksanochkin✉, G.M. Kerimova, S.A. Korenkov, I.A. Fomenko

*Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH);
Moscow, the Russian Federation,
✉aleksanochkindi@list.ru*

Abstract. Introduction. Biologically active peptides (BAPs) possess high physiological activity and are valuable for the creation of functional foods. Microbial fermentation is a gentle and effective alternative to chemical and enzymatic hydrolysis for obtaining BAPs from plant materials. The goal of the research was to review current data on the production of BAPs from high-protein plant materials using microbial fermentation for their subsequent use in the food industry. **The objective.** The objects of the study were high-protein plant raw materials (cereals, legumes, oilseeds) and the proteolytic systems of lactic acid bacteria. The methods included a systematic search and analysis of scientific publications (2021–2026) in the Web of Science, Scopus, PubMed, and eLibrary databases on the profile of microbial fermentation of plant proteins. **The results and discussion.** The resources and chemical composition of promising oilseeds, legumes, and cereals were analyzed. The three-component proteolytic system of lactic acid bacteria (cell-envelope proteinases, transport systems, intracellular peptidases), which ensured the destruction of stable globular proteins, was considered in detail. Information on the identified peptides demonstrating antioxidant, hypotensive (ACE inhibition), and anti-inflammatory activities was systematized. Microbial fermentation was shown not only to release target peptides but also to improve organoleptic properties, serving as an effective technological method for modifying plant materials without the use of harsh chemical reagents. **Conclusion.** Microbial fermentation was confirmed to be a highly effective method for producing bioactive pharmaceutical ingredients with a broad spectrum of physiological effects. The review results substantiated the potential of using fermented plant substrates as functional ingredients and served as a theoretical basis for developing a technology for producing bioactive pharmaceutical ingredients from hemp seeds and isolates to create new alternative plant-based beverages with targeted functional properties.

Keywords: plant materials, biologically active peptides, microbial fermentation, lactic acid microorganisms, food industry, protein ingredients

For citation: Aleksanochkin D.I., Kerimova G.M., Korenkov S.A., Fomenko I.A. An overview of the production of biologically active peptides from plant materials using microbial fermentation. *Novye tehnologii / New technologies*. 2026; 22(3):10-27. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-3-10-27>

Funding: The research was conducted within the state assignment FSMF-2026-0002 of ROSBIOTEKH. Original article

Введение. Биологически активные пептиды (БАП) – это органические соединения, образующиеся в процессе расщепления белков, они обладают низкой молекулярной массой, легко перевариваются и усваиваются организмом человека [1]. БАП проявляют высокую физиологическую активность, которая определяется их специфической аминокислотной последовательностью. Механизм их действия часто связан с

ингибированием белков-мишеней/рецепторов (например, ангиотензинпревращающего фермента, дипептидилпептидазы-4, ренина, альфа-глюкозидазы и др.). Также БАП способны проявлять антиоксидантные, иммуномодулирующие, антимикробные, противоопухолевые, противотуберкулезные свойства [2-3]. Высокая биодоступность пептидов обусловлена способностью всасываться через кишечник и попадать в

кровеносную систему без разрушения аминокислотных цепей [4]. Это делает их ценными ингредиентами для функциональных пищевых продуктов и фармацевтических препаратов с направленным физиологическим действием.

Наиболее распространенными методами получения пептидов являются химический и ферментативный гидролиз белка, а также микробная ферментация. Химический протеолиз подразделяется на кислотный и щелочной гидролиз, проводимые при высокой температуре в течение длительного времени. Данный подход характеризуется низкой воспроизводимостью и сложностью контроля, что часто приводит к модификации аминокислотных последовательностей пептидов. Кроме того, кислотный гидролиз способен вызывать деградацию молекул триптофана, тогда как щелочная обработка приводит к разрушению цистина, аргинина, треонина, серина, изолейцина и лизина с образованием таких специфических остатков, как лизиноаланин и лантионин [5].

Ферментативный гидролиз проводится в более щадящих условиях. В данном подходе могут использоваться ферментные препараты (ФП) животного, растительного и микробного происхождения, путем подбор для каждого из них оптимальных значений pH и температур. Данный метод позволяет контролировать степень гидролиза белка, которая напрямую зависит от субстратной специфичности (аминокислотного состава, последовательности, длины цепи, гидрофобности и суммарного заряда субстрата) [2]. В связи с этим ключевым этапом оптимизации процесса гидролиза является подбор протеазы с необходимой эндо- и экзопептидазной специфичностью [6]. Так, применение Alcalase 2,4 L, папаина, бромелаина и Flavourzyme 1000 L для расщепления соевого белка приводило к высвобождению пептидов с высокой ингибирующей активностью в отношении ангиотензинпревращающего фермента [7].

Кроме того, в исследовании Osman A. и соавт. при гидролизе белка нута ФП Alcalase 2.4 L были идентифицированы пептиды, обладающие антиоксидантной и антибактериальной активностью [8].

Микробная ферментация также относится к щадящим методам получения БАП. Многие культуры микроорганизмов обладают высоким протеолитическим потенциалом, что позволяет расщеплять молочный, животный и растительный белок до пептидов различной молекулярной массы. Примерами таких протеолитических систем являются лактобактерии (*Lactobacillales*), в частности, *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus helveticus* и *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* [9, 2]. Так, при ферментации соевого молока штаммы *Lactobacillus* продемонстрировали высокую протеолитическую и АПФ-ингибирующую активность [10]. Протеолиз белка нута с использованием *L. bulgaricus* способствует высвобождению пептидов, обладающих ингибирующей активностью в отношении АПФ и альфа-глюкозидазы, антиоксидантными, антитромботическими и нейропептидными свойствами [11]. На рисунке 1 представлена инфографика методов получения БАП с использованием химического, ферментативного и микробного гидролиза.

Цель данной работы заключается в обзоре получения БАП с использованием технологии микробной ферментации растительного сырья для последующего применения в пищевой промышленности.

Объекты и методы исследований. Осуществлялся поиск научной литературы, по ключевым словам: *microbial fermentation*, *high-protein plant raw materials*, *lactic acid microorganisms*, *peptides from plant raw materials* и др. Поиск осуществлялся в международных библиографических базах (Web of Science, Scopus, PubMed) и через академические поисковые системы (Google Scholar, eLibrary). На первом этапе по названию и аннотациям отобрано более 100 публикаций.

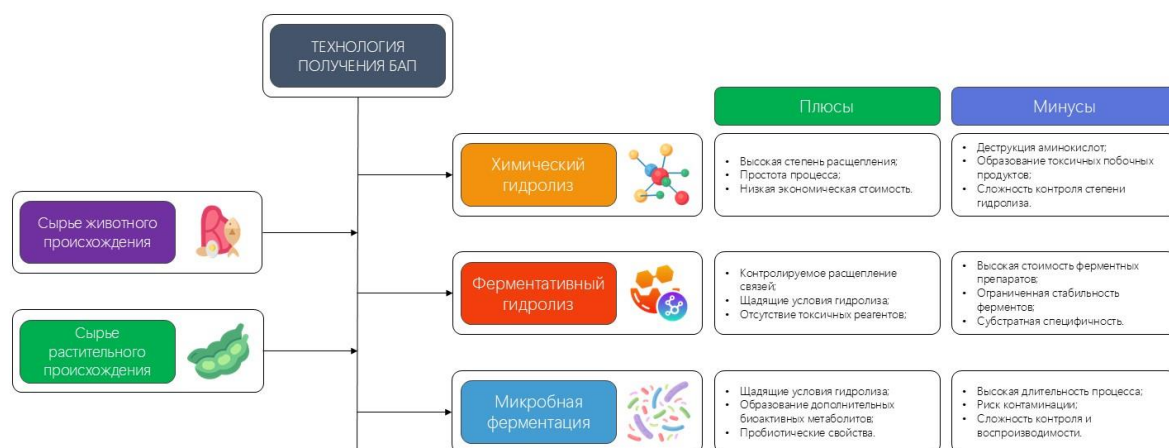


Рис. 1. Методы получения биоактивных пептидов

Fig. 1. Methods for obtaining bioactive peptides

Критерии включения:

- публикации, выпущенные в период 2021-2026 гг., за исключением наиболее значимых работ;
- публикации на русском и английском языках;
- оригинальные исследовательские научные статьи или обзорные статьи, индексируемой в крупнейших научных базах данных (Scopus, Web of Science и т.д.).

Критерии исключения:

- публикации, вышедшие ранее 2005 г.;
- публикации на других языках;
- публикации, не соответствующие тематике настоящего обзора.

Высокобелковое растительное сырье

Растительное сырье является одним из самых перспективных сырьевых ресурсов для получения гидролизатов и БАП. В качестве субстрата могут выступать как семена, так жмыхи и шроты (отходы масло-жировой промышленности) [12]. Растительные белки, в отличие от животных аналогов, не содержат холестерина и насыщенных жиров. Использование отходов производства для получения белка дополнительно снижает экологическую нагрузку и себестоимость конечных продуктов [13]. Злаковые, бобовые и масличные являются основными источниками пептидов растительного происхождения за счет высокого

содержания белка и относительно сбалансированного аминокислотного состава (за исключением лимитирующего содержания лизина). Особое внимание в вопросе получения растительных белков представляют такие культуры, как подсолнечник, соя, рапс, конопля, горох, нут, амарант, кунжут, овес и т.д. Эти культуры отличаются относительной простотой в возделывании и универсальностью применения (в пищевой, текстильной, целлюлозно-бумажной промышленности и сельском хозяйстве), что способствует расширению посевных площадей и росту рынка товаров [14].

Зерновые культуры (рис, пшеница, овес, ячмень и др.) широко применяются в качестве источников растительного белка. Особую пищевую и технологическую ценность представляет овсяный белок. Общее содержание белка в зернах овса варьируется в пределах 12-24%, в его составе преобладают глобулины и альбумины. На долю глобулинов приходится 70-80% от общего количества белка, что обуславливает высокую растворимость и функциональную активность данного сырья. Однако, в отличие от бобовых культур, где лизин присутствует в избытке, в составе злаковых белков он является лимитирующей аминокислотой [15].

Бобовые культуры (горох, нут, соя) являются экономически доступными источ-

никами полноценного белка. Данные культуры характеризуются высоким содержанием лизина и богатым аминокислотным профилем. В семенах гороха преобладают два класса запасных глобулинов: вицилин и легумин. Нут отличается высокой биодоступностью незаменимых аминокислот и низким содержанием антипитательных факторов. Соевые бобы содержат около 36% белка, 15% углеводов (растворимых и нерастворимых) и 18% липидов. Благодаря уникальному биохимическому составу бобовые представляют значительную пищевую и технологическую ценность [16].

Масличные культуры представляют собой растительное сырье с богатым липидным и белковым составом. Наиболее распространенными масличными культурами являются подсолнечник, рапс, кунжут, лен, хлопок и промышленная конопля. Кроме того, побочные продукты переработки масличных культур являются универсальными источниками макронутриентов [17]. Рапс – одна из масличных культур с самым высоким содержанием белка в количестве 25-30%. Основными фракциями белка рапса являются глобулины (70% от общего содержания) и альбумин. Глобулины рапса представлены крцеферинном, а альбумины – напинном. Помимо двух резервных белков в составе рапса присутствует олеозин – структурный белок, ассоциированный с липидными соединениями [18]. Цельные се-

мена подсолнечника содержат от 10 до 27 % белка. Основной белок подсолнечника представлен гелиантинином (11S глобулин) и олигомерным белком, имеющим структуру, схожую с бобовыми. Он состоит из субъединиц, включающих альфа- (крупные) и бета-дисульфидных (малые) полипептидные цепи. За исключением лизина, состав аминокислот белков подсолнечника соответствует критериям ФАО ВОЗ и характеризуется большим содержанием серосодержащих аминокислот (метионин и цистеин) [19]. Семена промышленной конопли содержат около 25% белка, 35% масла и высокий уровень антиоксидантов. Основным белком ядра конопли является эдестин, который составляет около 70% от общего белка. Эдестин представляет собой гексамер из идентичных субъединиц и относится к семейству глобулинов. Каждая субъединица состоит из кислой (34 кДа) и основной (18-20 кДа) полипептидных цепочек. Вторым по значимости белком конопли выступает альбумин, содержащий меньше дисульфидных связей по сравнению с эдестином, поэтому обладает гибкой структурой с большей растворимостью белка [20]. На рисунке 2 представлен анализ химического состава высокобелкового растительного сырья, перспективного для использования в пищевой промышленности с целью получения БАП (приведены средние значения по диапазонам содержания).

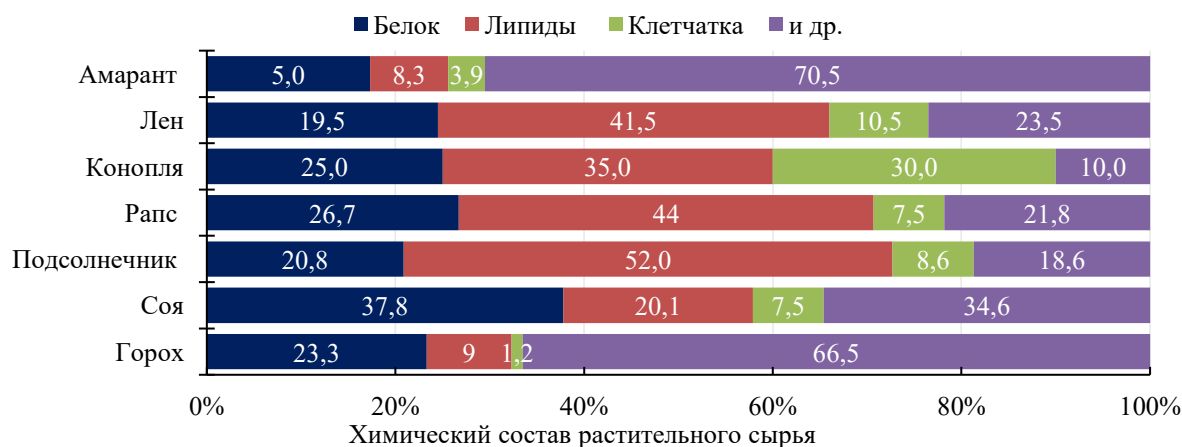


Рис. 2 Химический состав растительного сырья [21, 24-25]

Fig. 2 Chemical composition of plant materials [21, 24-25]

Структура посевных площадей сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в период 2014-2023 годов оставалась неизменной. Доминирующей группой являются зерновые и зернобобовые культуры (около 60% от общей площади посевов) [22]. По данным РОССТАТ в 2025 году посевные площади составляют 80506,0 тыс. Га, из них зерновые и зернобобовые составляют 57,3%, а масличные культуры – 23,6% (рис. 3).

Таким образом, масличные культуры представляют собой стратегически важный ресурс для обеспечения продовольственной безопасности страны и развития высокотехнологичных производств в области переработки растительного сырья в белковые ингредиенты.

Идентифицированные пептиды, полученные микробной ферментацией

Механизм ферментации аналогичен механизму ферментативного гидролиза, однако в данном случае расщепление белков происходит за счет жизнедеятельности микроорганизмов и секретируемых ими протеаз. Выбор штамма-продуцента и уровень его протеолитической активности

определяют эффективность высвобождения целевых биологически активных пептидов. В настоящее время для получения гидролизатов белка чаще всего применяются молочнокислые бактерии (преимущественно виды рода *Lactobacillus*).

Так, в работе Jakubczyk А. и соавт. описан процесс получения пептидов из белка фасоли в процессе микробной ферментации *Lactobacillus plantarum*. После 12 ч замачивания очищенные от оболочки семена бобов измельчали и ферментировали с *L. plantarum* 299v. Через 3 ч после сквашивания сырья высвобождалась низкомолекулярная фракция пептидов с молекулярной массой от 3,5 до 7,0 кДа. После 72 ч ферментации с помощью LC-MS/MS были идентифицированы пептиды INEGSLLLPH, FVVAEQAGNEEGFE, SGSGGGGGVAGAATASR, GSOGGGGGGGFGGPRR, GGYQGGGYGGNSGGGYGNRG, GGSOGGGGGSSGRRP и GDTVTVFEFDTFLSR, обладающие ингибирующей активностью в отношении АПФ и ДПП4 [30].

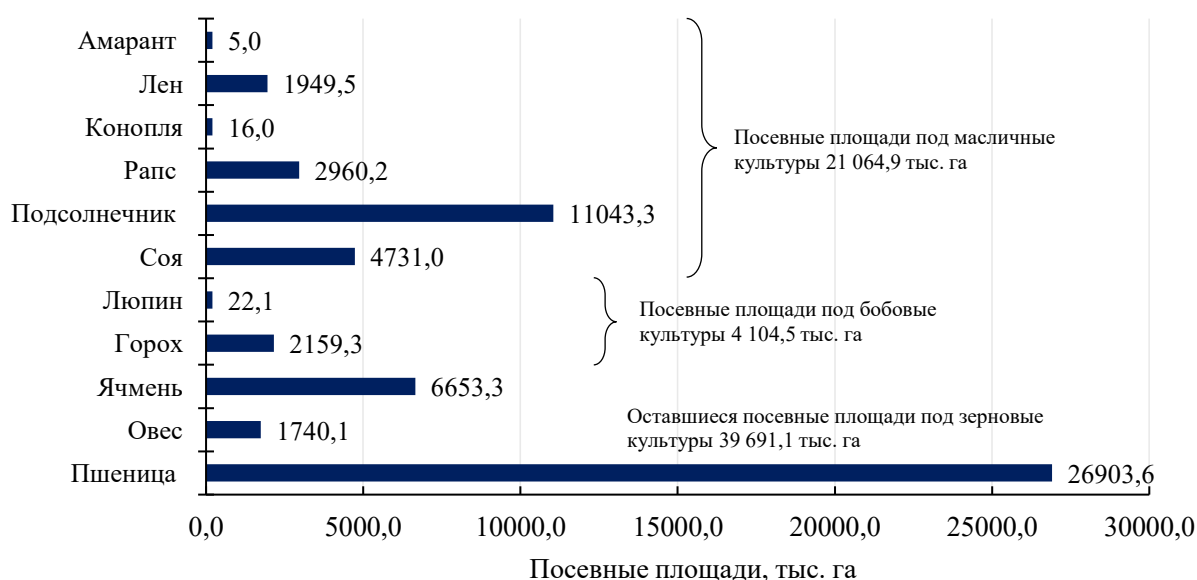


Рис. 3 Анализ посевных площадей высокобелкового растительного сырья за 2025 г. по данным РОССТАТ [23]

Fig. 3 Analysis of areas under high-protein plant materials for 2025 according to ROSSTAT data [23]

Также с помощью микробной ферментации получали пептиды из рапсового шрота. Для этого использовали штамм *Bacillus subtilis*, процесс проводили 72 ч, в результате образовались фракции пептидов с молекулярной массой в диапазоне 180-5500 Да. Данный гидролизат обладал ингибирующей активностью в отношении DPPH-радикала (достигая 80% при концентрации 350 мкг/мл) и восстанавливающей активностью по методу FRAP (80% при концентрации 25 мг/мл) [31].

Уникальные антиоксидантные пептиды (PFGAGRRICAGLSLGLQMVQLLT, HFDSEVVFF, LFGDKPVTIF, MLHIPVSVSTPGKF и VVDMNEGALFLPH) были идентифицированы в ферментированном соевом шроте с помощью LC-MS/MS. Процесс ферментации проводили с использованием *B. subtilis* KN36D, который продемонстрировал наибольшее разнообразие пептидов (1837 последовательностей). Данные пептиды обладали высокой антиоксидантной активностью, определенной методом молекулярного докинга (*in silico*) [32]. В исследовании Liu D. и соавт. описан процесс получения пептидов из соевого шрота путем твердофазной ферментации с использованием *Bacillus subtilis* SBM-1 в течение 12 ч. Выход пептидов в процессе сквашивания увеличился до 220,93 мг/г, что соответствовало 47,74% степени гидролиза белка. Протеолиз способствовал улучшению структурных характеристик ферментированного соевого шрота, включая деградацию соевого глобулина и аллергенных белков [33].

Известно исследование, в котором высушенные и измельченные семена томатов были ферментированы при помощи *B. subtilis* A14h. Ферментацию проводили в условиях глубинного культивирования в течение 24 ч, после чего проводили центрифугирование, а надосадочную жидкость лиофилизировали. Гидролизат фракционировали и идентифицировали пептиды методом tandemной масс-спектрометрии. Было

идентифицировано 13 пептидов, антиоксидантные и антигипертензивные свойства которых изучались отдельно. Особого внимания исследователей заслужили пептид GQVPP, поглощающий 97% радикалов DPPH при 0,4 мМ, и пептид DGVVYY, обладающий ингибирующей активностью в отношении АПФ ($IC_{50} = 2$ мкМ [34].

Известен способ получения ферментированной суспензии семян конопли с использованием штамма *L. plantarum*. В процессе ферментации были идентифицированы пептиды AAELIGVP, AAVPYRQ, VFPEVAR, DVIGVPLG и PVPKVL, обладающие биологической активностью. Так, данный ферментированный продукт проявлял ингибирующее воздействие на цитокины, включая TNF- α (фактора некроза опухолей), IL-1 β (интерлейкина-1 β) и IL-10 (интерлейкин-10). Антиоксидантные и противовоспалительные свойства данных пептидов были подтверждены с использованием базы данных "BioPer-UWM" [35]. В работе Feng X. и соавт. доказана биологическая активность пептидов белка конопли, полученных твердофазной ферментацией с использованием *Aspergillus niger*, *B. subtilis* и *Lactobacillus rhamnosus*. *In silico* прогнозирование и молекулярный докинг выявили ингибирующую активность в отношении АПФ и ДПП4, а также антиоксидантные свойства. Полученные пептиды (LDVSP и LVSP) демонстрировали высокое ингибирование АПФ, при этом значения IC_{50} составляли $107,47 \pm 6,57$ и $127,06 \pm 12,11$ мкМ соответственно, а LVSP также ингибировал ДПП4 ($IC_{50} = 2,21 \pm 0,04$ мМ). Ферментация *B. subtilis* дала наиболее высокую антиоксидантную и ингибиторную активность АПФ, тогда как *A. niger* показал наивысшую ингибиторную активность в отношении ДПП4 [36].

Известно исследование, в котором в пасте из ферментированных бобов мунг идентифицированы антиоксидантные пептиды (VSRRFIYYL, SPAIPLP, PVPPPPGG, KKDGYYWAKFK, LAWY, LGFMQF и LPGCP). Данные аминокислотные последо-

вательности изучены методом молекулярного докинга. Было показано, что они могут образовывать стабильные связи с ключевыми аминокислотными остатками белка Keap1, тем самым потенциально модулируя сигнальный путь Keap1-Nrf2, отвечающий за антиоксидантную защиту организма. Кроме того, пептиды обладали высокой клеточной антиоксидантной активностью и защищали клетки HepG2 от окислительного

повреждения, вызванного алкилирующими агентами за счет снижения активности активных форм кислорода и накопления малонового диальдегида. Наибольший эффект имели пептиды LAWY, LPGCP и VSRRFIYYL [37].

В таблице 1 представлена информация о полученных пептидах из растительного сырья в процессе ферментации молочно-кислыми микроорганизмами.

Таблица 1. Биологически активные пептиды, полученные в процессе микробной ферментации растительного сырья

Table 1. Biologically active peptides obtained during microbial fermentation of plant materials

Растительное сырье	Микроорганизм	Пептиды	Биологическая активность	Ссылка
Соя <i>Glycine max</i>	<i>B. subtilis</i> KN36D	PFGAGRRICAGLSLGLQMVQLLT, HFDSEVVFF, LFGDKPVTIF, MLHIPVSVSTPGKF и VVDMNEGALFLPH	Антиоксидантные свойства	[32]
Папс <i>Brassica napus</i>	<i>B. subtilis</i> YY-112	Пептиды с фракцией 180-5500 Да	Антиоксидантные свойства	[31]
Кунжут <i>Sesamum indicum</i>	<i>L. plantarum</i> NCU116	ALIPSF, ALIPSF, LAPDAPLAP, AYHNAPIL, VAGPFRTF, ITAPHW	Антиоксидантные свойства, ингибирование АПФ	[39]
Конопля <i>Cannabis sativa</i> L.	<i>L. plantarum</i>	AAELIGVP, AAVPYPQ, VFPEVAP, DVGIVPLG, PVPKVL	Антиоксидантные и противовоспалительные свойства	[35]
	<i>A. niger</i> , <i>B. subtilis</i> и <i>L. rhamnosus</i>	SGFDTRL, DLVSP, DDRNSLLR, LDVSP, GVADW, LFNP, GNLF, LVSP	Антиоксидантные свойства, ингибирование АПФ и ДПП4	[36]
Нут <i>Cicer arietinum</i>	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	Пептиды с фракцией от 3 до 10 кДа	Ингибирование альфа-гликозидазы	[40]
	<i>Cordyceps militaris</i> SN-18	—	Антиоксидантные свойства	[1]
Подсолнечник <i>Helianthus annuus</i>	<i>L. lactis</i> B12	DVAMPVPK, VETGVKPG, TTHTNPPEAE, LTHPQQQQQQGPSTG и PADVTPEEKPEEV,	Антиоксидантные и противовоспалительные свойства	[41]
Фасоль <i>Phaseolus vulgaris</i> L.	<i>L. plantarum</i> 299v	INEGSLLLPH, FVVAEQAGNEEGFE, SGGGGGGVAGAATASR, GSGGGGGGFGGPRR, INEGSLLLPH, GGYQGGGYGGNSGGGYGNRG, GSGGGGGSSGRRP и GDTVTFEFDTLR	Ингибирование АПФ и ДПП4	[30]
Фасоль <i>Vicia faba</i> L.	Спонтанная ферментация	VSRRFIYYL, SPAIPLP, PVPPPPGG, KKDGYWWAKFK, LAWY, LGFMQF и LPGCP	Антиоксидантные свойства	[37]
Брокколи <i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>	<i>L. plantarum</i> A3 и <i>L. rhamnosus</i> ATCC7469	SIWYGPDPR, GDRW, ADLAHLPF, ADLAHLPF, FGDFNPGGRL, CKVWPPLH, KASFAFAGL и RFR	Противовоспалительные свойства	[38]

Согласно литературным данным, большинство изученных пептидов обладают

антиоксидантными свойствами, при этом ингибиторы АПФ, ДПП4 и альфа-гликози-

дазы встречались в меньшем количестве. Это свидетельствует о том, что ферментация растительного сырья молочнокислыми бактериями и другими микроорганизмами является эффективным методом получения биоактивных пептидов с широким спектром физиологического действия. Количество исследований по данной тематике ограничено, что открывает перспективы для фундаментальных работ, направленных на получения БАВ микробной ферментацией.

Протеолитическая система молочнокислых бактерий

В процессе ферментации микроорганизмы (в частности, бактерии) культивируют на белковом субстрате. За счет действия их эндогенных ферментов происходит гидролиз белков с образованием коротких пептидов и свободных аминокислот. Эффективность ферментации растительного сырья зависит от выбора штамма-продуцента, температуры культивирования и pH среды. Глобулярные растительные белки обладают плотной третичной и четвертичной структурой, что делает их устойчивыми к действию многих эндогенных ферментов [43].

Современные исследования протеолитических систем молочнокислых бактерий (МКБ) характеризуются присутствием в их геномах предполагаемых протеолитических ферментов (около 40) на каждый вид, однако функциональная роль большинства из них до сих пор не известна [44]. Однако именно протеолитическая система является одним из основных факторов, определяющих эффективность МКБ в процессах ферментации пищевых продуктов [45].

Большинство представителей данной группы бактерий являются ауксотрофными. Они не способны синтезировать некоторые аминокислоты (валин, гистидин, метионин, глутаминовую кислоту, глицин, лейцин, изолейцин). В результате для обеспечения метаболических потребностей им необходимо утилизировать экзогенные белки, используя собственную протеолитическую систему [44, 46].

Примером служит *Lactobacillus helveticus*; при секвенировании штамма DPC 4571 было установлено отсутствие генов, кодирующих биосинтез 16 аминокислот. Аналогичные данные были для *L. acidophilus* и *L. delbrueckii* subsp. *Bulgaricus*, тогда как *L. plantarum* WCFS1 способен синтезировать практически все аминокислоты, за исключением валина, лейцина и изолейцина. Таким образом, рост *L. helveticus* в молоке зависит от наличия сложной протеолитической системы, обеспечивающей гидролиз казеинов молока, которые составляют около 80 % всех белков коровьего молока [47].

В литературе протеолитическая система МКБ традиционно описывается как трехкомпонентная модель, включающая:

- клеточно-оболочечные протеиназы (Cell-Envelope Proteinases, CEPs) – крупные сериновые протеазы подсемейства S8A (субтилизин-подобные), осуществляющие первичное расщепление нативных белков до олигопептидов;
- транспортные системы – мембранные переносчики, обеспечивающие импорт олигопептидов и коротких пептидов внутрь бактериальной клетки;
- внутриклеточные пептидазы – ферменты, катализирующие дальнейший гидролиз пептидов до свободных аминокислот и ди-/трипептидов, доступных для метаболизма [45, 47, 48].

Большинство молочнокислых бактерий обладают, как правило, одним типом CEP протеиназы. На сегодняшний день идентифицировано шесть основных типов: (a) PrtP – охарактеризованный у *Lactobacillus paracasei* subsp. *paracasei*, *L. lactis* subsp. *cremoris* и *L. lactis* subsp. *lactis*; (b) PrtB, обнаруженный у *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*; (c) PrtH, обнаруженный у *L. helveticus*; (d) PrtS, обнаруженный у *Streptococcus thermophilus*; (e) PrtR от *L. rhamnosus*; и (f) PrtL, обнаруженный у *L. delbrueckii* subsp. *lactis* [44, 47, 49]. Кроме них наличие CEP отмечено у штаммов *L. acidophilus*, *L. casei* и *L. plantarum* [49-50].

Гены СЕР демонстрируют разную хромосомную или плазмидную локализацию. Например, PrtP и PrtM у штамма *L. lactis* SK11 локализованы на плазмиде pSK111 (участок 10 т.п.н.), которая может интегрироваться в хромосому, а у большинства лактобацилл гены СЕР закреплены в геноме [51, 52].

Наличие и уровень экспрессии СЕР могут значительно различаться между видами и даже штаммами. У *S. thermophilus* частота встречаемости PrtS разная: по одним данным – лишь у 3 из 97 штаммов, по другим – у 35 из 47 промышленных культур, тогда как масштабный анализ 135 штаммов показал наличие гена у 21 изолята [53-54]. Кроме того, при оценке протеолитической активности необходимо принимать во внимание, что в ряде случаев она может быть обусловлена не СЕР, а внутриклеточными протеазами, попадающими в среду в результате лизиса клеток [45, 55].

Экспрессия СЕР может зависеть от условий окружающей среды, особенно когда соответствующий штамм выращивается в средах, богатых белками или пептидами, как это наблюдается у *L. helveticus* CRL 1062. Ген prtH2 присутствует во всех 29 проанализированных штаммах, тогда как prtH обнаружен только у 18 [44]. В отличие от этого, prtR у *L. rhamnosus* встречается повсеместно (20 из 20 штаммов).

Большинство СЕР сохраняют активность в слабокислой и нейтральной среде с оптимальным диапазоном pH от 5,5 до 7,0. Однако некоторые ферменты, например, из *L. delbrueckii* CRL 581, *L. helveticus* CNRZ303 и *S. thermophilus* CNRZ 385 проявляют активность в слабощелочной зоне (pH 7,0-8,0). При этом оптимум pH может сдвигаться в зависимости от природы гидролизуемого белка-субстрата [50].

Применение пептидов в пищевой промышленности

В ходе жизнедеятельности микроорганизмов образуются аминокислоты, органические кислоты, короткоцепочечные жирные кислоты и биоактивные пептиды.

Именно эти соединения определяют функциональные свойства ферментированных продуктов, их потенциальную биологическую активность и органолептические свойства [26]. Данный способ получения биоактивных пептидов позволяет снизить затраты на этапы выделения и обеспечивает высокую степень чистоты получаемого вещества. Пищевые продукты, такие как йогурт, сыр, кефир, квашенные овощи и ферментированные соевые продукты, например, темпе, тофу и т.д., содержат БАП, накапливающиеся в процессе ферментации. Водорастворимые пептиды, извлеченные из сыра чеддер, а также буйволиного и коровьего молока, обладают антиоксидантной активностью и могут защищать ткани кишечника человека от окислительного повреждения [27].

Гидролизаты и БАП, используемые в составе пищевых продуктов, получают главным образом с помощью ферментативного гидролиза. Микробная ферментация отличается высокой специфичностью, поэтому в пищевой промышленности она применяется не в качестве ингредиента, а как технологический процесс, позволяющий модифицировать свойства готового продукта.

Гидролизаты соевого белка применяли в приготовлении мучных кондитерских изделий. В результате содержание незаменимых аминокислот в продукте увеличилось на 9,8%. Кроме того, гидролизат проявлял значительную антиоксидантную активность, в том числе в тесте ABTS и по способности хелатировать ионы железа [42]. Гидролизат белка красной фасоли добавляли в натуральный йогурт в концентрации 3 г/л. За три дня хранения при комнатной температуре образование продуктов окисления снизилось на 45,8% по сравнению с контрольным образцом. Это позволяет рассматривать такой гидролизат как антиоксидантный функциональный ингредиент для кисломолочных молочных продуктов [28]. В работе Ozón B. и соавт. пшеничный хлеб обогащали гидролизатом семян чиа в кон-

центрации до 10 мг/г муки. Авторы рассматривали данный подход как способ переработки отходов масличного производства и создания функционального продукта с растительными биоактивными пептидами. Полученный гидролизат обладал антиоксидантной активностью (ингибирование на $55,8 \pm 0,4\%$) после 6 ч инкубации при 25 °C [29].

Следует отметить, что пептиды, полученные микробной ферментацией, демонстрируют широкий спектр биологической активности, включая антимикробную, антиоксидантную, гипотензивную и иммуномодулирующую активности. Дополнительным преимуществом ферментированных продуктов является их характерные вкусоароматические и пробиотические свойства, что отличает их от гидролизатов, полученных ферментативным или химическим гидролизом [9].

Заключение. По результатам работы был проанализирован обзор литературных данных по получению биологически активных пептидов из высокобелкового расти-

тельного сырья методом микробной ферментации. В процессе работы были изучены уже идентифицированные пептиды, обладающие биологической активностью, а также протеолитические системы молочнокислых микроорганизмов, способствующих деструкции белка. Данный обзор является частью проекта по получению БАП в процессе микробной ферментации изолята белка и семян конопли. Для получения пептидов планируется: 1) провести скрининг МКБ на белковом изоляте и суспензии семян конопли; 2) подобрать оптимальную концентрацию изолята конопли в молочной основе; 3) разработать технологию получения растительной суспензии из семян конопли; 4) определить протеолитическую активность МКБ; 5) идентифицировать аминокислотные последовательности и оценить их биологическую активность с использованием методов *in silico* и *in vitro*. Планируемый в рамках проекта продукт станет альтернативой уже имеющимся растительным напиткам с высокой биологической активностью.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components / Zhao Y.-S. [et al.] // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10, No 12, Art. 2004. DOI: 10.3390/antiox10122004.
2. Bioactive peptides: synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action / Akbarian M. [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, No. 3. Art. 1445. DOI: 10.3390/ijms23031445.
3. Review on plant-derived bioactive peptides: biological activities, mechanism of action and utilizations in food development / Fan H. [et al.] // *Journal of Future Foods*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 143-159. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2022.03.003.
4. Hong, H., Wu, J., Yan, X. Bioavailability of bioactive peptides derived from food proteins across the intestinal epithelial membrane: a review / Xu Q. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. P. 399-411. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.050.
5. Tavano O.L. Protein hydrolysis using proteases: an important tool for food biotechnology // *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2013. Vol. 90. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.molcatb.2013.01.011.
6. Mora L., Toldrá F. Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides // *Current Opinion in Food Science*. 2023. Vol. 49. Art. 100973. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100973.

7. High angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory activity of Alcalase-digested green soybean (*Glycine max*) hydrolysates / Hanafi M.A. [et al.] // *Food Research International*. 2018. Vol. 106. P. 589-597. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.01.030.
8. Antibacterial peptides produced by Alcalase from cowpea seed proteins / Osman A. [et al.] // *Antibiotics*. 2021. Vol. 10, No. 7. Art. 870. DOI: 10.3390/antibiotics10070870.
9. Research progress on fermentation-produced plant-derived bioactive peptides / Zhao L. [et al.] // *Frontiers in Pharmacology*. 2024. Vol. 15. Art. 1438947. DOI: 10.3389/fphar.2024.1438947.
10. Bioactivities and ACE-inhibitory peptides releasing potential of lactic acid bacteria in fermented soy milk / Undhad Trupti J. [et al.] // *Food Production, Processing and Nutrition*. 2021. Vol. 3, No. 1. Art. 10. DOI: 10.1186/s43014-021-00056-y.
11. Investigating structure, biological activity, peptide composition and emulsifying properties of pea protein hydrolysates obtained by cell envelope proteinase from *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* / Zhang X. [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 24. Art. 125375. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125375.
12. Красноштанова А.А., Шульц Л.В. Получение и оценка функциональных свойств белковых изолятов и гидролизатов из растительного сырья // *Химия растительного сырья*. 2022. № 4. С. 299-309. DOI: 10.14258/jcpim.20220410952.
13. The rise of processed meat alternatives: a narrative review of the manufacturing, composition, nutritional profile and health effects of newer sources of protein, and their place in healthier diets / Gastaldello A. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 127. P. 263-271. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.07.005.
14. Biopeptides from vegetable proteins: new scientific evidences / Montesano D. [et al.] // *Current Opinion in Food Science*. 2020. Vol. 31. P. 31-37. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.10.008.
15. Protein from oat: structure, processes, functionality, and nutrition / Mäkinen O.E. [et al.] // *Sustainable Protein Sources*. Academic Press. 2024. P. 121-141. DOI: 10.1016/B978-0-323-91652-3.00006-X.
16. Chandran A.S., Suri S., Choudhary P. Sustainable plant protein: an up-to-date overview of sources, extraction techniques and utilization // *Sustainable Food Technology*. 2023. Vol. 1, No. 4. P. 466-483. DOI: 10.1039/D3FB00003F.
17. Oilseed proteins: properties and application as a food ingredient / Kotecka-Majchrzak K. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 106. P. 160-170. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.004.
18. Rodrigues I.M., Coelho J.F., Carvalho M.G.V. Isolation and valorisation of vegetable proteins from oilseed plants: methods, limitations and potential // *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 109, No. 3. P. 337-346. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.027.
19. Kaur R., Ghoshal G. Sunflower protein isolates: composition, extraction and functional properties // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 306. Art. 102725. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102725.
20. Yano H., Fu W. Hemp: a sustainable plant with high industrial value in food processing // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 3, Art. 651. DOI: 10.3390/foods12030651.
21. Oilseeds beyond oil: press cakes and meals supplying global protein requirements / Arrutia F. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 100. P. 88-102. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.044.
22. Антонов Е. В. Посевные площади в России в 2014-2023 гг.: структура и факторы динамики // *Региональные исследования*. 2025. № 1 (87). С. 29-51. DOI: 10.5922/1994-5280-2025-1-3.
23. Сельское хозяйство в России. 2025: статистический сборник [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. URL: [https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226] (https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226) (дата обращения: 31.05.2026).
24. Amaranth seed oil composition / Nasirpour-Tabrizi P. [et al.] // *Nutritional Value of Amaranth*. London: IntechOpen, 2020. P. 131-164. DOI: 10.5772/intechopen.91381.
25. Production of plant protein from seeds and cake of industrial hemp: overview of processing methods for food industry / Aleksanochkin D.I. [et al.] // *Food Systems*. 2024. Vol. 7, No. 2. P. 188-197. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197.

26. Bioactive peptides from fermented foods: production approaches, sources, and potential health benefits / Peres Fabbri L. [et al.] // *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 21. Art. 3369. DOI: 10.3390/foods13213369.
27. Guo Q., Chen P., Chen X. Bioactive peptides derived from fermented foods: preparation and biological activities // *Journal of Functional Foods*. 2023. Vol. 101. Art. 105422. DOI: 10.1016/j.jff.2023.105422.
28. Sarker A., Chakraborty S., Roy M. Dark red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein hydrolysates inhibit the growth of oxidizing substances in plain yogurt // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2020. Vol. 2. Art. 100062. DOI: 10.1016/j.jafr.2020.100062.
29. Development of fortified breads enriched with plant-based bioactive peptides derived from the chia (*Salvia hispanica* L.) expeller / Ozón B. [et al.] // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 18. Art. 3382. DOI: 10.3390/foods12183382.
30. Identification of potential inhibitory peptides of enzymes involved in the metabolic syndrome obtained by simulated gastrointestinal digestion of fermented bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds / Jakubczyk A. [et al.] // *Food Research International*. 2017. Vol. 100. P. 489-496. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.07.046.
31. Antioxidant activities of rapeseed peptides produced by solid state fermentation / He R. [et al.] // *Food Research International*. 2012. Vol. 49, No. 1. P. 432-438. DOI: 10.1016/j.foodres.2012.08.023.
32. Production and characterization of bioactive peptides in fermented soybean meal produced using proteolytic *Bacillus* species isolated from kinema / Kumari R. [et al.] // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 421. Art. 136130. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136130.
33. Peptide production through enhanced solid-state fermentation of soybean meal with *Bacillus subtilis* SBM_1: fermentation process and product characteristics / Liu D. [et al.] // *Industrial Crops and Products*. 2024. Vol. 219. Art. 119184. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119184.
34. Peptidomic analysis of antioxidant and ACE-inhibitory peptides obtained from tomato waste proteins fermented using *Bacillus subtilis* / Moayed A. [et al.] // *Food Chemistry*. 2018. Vol. 250. P. 180-187. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.033.
35. Biopeptide-rich fermented hemp seeds: boosting anti-inflammatory and immune responses through *Lactiplantibacillus plantarum* probiotic fermentation / Shan L [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 290. Art. 138782. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.138782.
36. Peptidomics reveals enhanced bioactivities of hempseed cake induced by solid-state fermentation / Feng X. [et al.] // *Food Chemistry*. 2026. Art. 149243. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.149243.
37. Identification and molecular mechanisms of novel antioxidant peptides from fermented broad bean paste: a combined in silico and in vitro study / Lin H. [et al.] // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 450. Art. 139297. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139297.
38. Identification and virtual screening of novel anti-inflammatory peptides from broccoli fermented by *Lactobacillus* strains / Li Y. [et al.] // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 9. Art. 1118900. DOI: 10.3389/fnut.2022.1118900.
39. Effects of fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* NCU116 on the antihypertensive activity and protein structure of black sesame seed / Du T. [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 262. Art. 129811. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129811.
40. Study on preparation of chickpea peptide and its effect on blood glucose / Ma X. [et al.] // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Art. 988628. DOI: 10.3389/fnut.2022.988628.
41. Fermented blend from sunflower seed press-cake and bovine sweet whey: protein breakdown during in vitro gastrointestinal digestion / Mendo S. [et al.] // *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. Art. 101745. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101745.
42. Impact of different enzymatic processes on antioxidant, nutritional and functional properties of soy protein hydrolysates incorporated into novel cookies / Knežević-Jugović Z. [et al.] // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 1. Art. 24. DOI: 10.3390/foods12010024.
43. Bioactive peptides / Daliri E.B.-M. [et al.] // *Foods*. 2017. Vol. 6, No. 5. Art. 32. DOI: 10.3390/foods6050032.
44. Juillard V., Lopez-Kleine L., Monnet V. Proteolytic systems of lactic acid bacteria (LAB) // *Reference Module in Food Science*. Amsterdam: Elsevier, 2021.

45. Ma, J., Xu, M., Agyei, D. Cell-envelope proteinases from lactic acid bacteria: biochemical features and biotechnological applications / Ji D. [et al.] // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021. Vol. 20, No. 1. P. 369-400. DOI: 10.1111/1541-4337.12676.
46. Comparative genomics of the lactic acid bacteria / Makarova K. [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006. Vol. 103, No. 42. P. 15611-15616. DOI: 10.1073/pnas.0607117103.
47. Original features of cell-envelope proteinases of *Lactobacillus helveticus*: a review / Sadat-Mekmene L. [et al.] // *International Journal of Food Microbiology*. 2011. Vol. 146, No. 1. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.039.
48. Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria / Harper A.R. [et al.] // *Microbial Biotechnology*. 2022. Vol. 15, No. 5. P. 1404-1421. DOI: 10.1111/1751-7915.14008.
49. Prevalence, genetic diversity, and technological functions of the *Lactobacillus sanfranciscensis* in sourdough: a review / Zhang G. [et al.] // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019. Vol. 18, No. 4. P. 1209-1226. DOI: 10.1111/1541-4337.12459.
50. Study of extraction and enzymatic properties of cell-envelope proteinases from a novel wild *Lactobacillus plantarum* LP69 / Chen H. [et al.] // *Catalysts*. 2018. Vol. 8, No. 8. Art. 325. DOI: 10.3390/catal8080325.
51. The proteolytic system of lactic acid bacteria revisited: a genomic comparison / Liu M. [et al.] // *BMC Genomics*. 2010. Vol. 11. Art. 36. DOI: 10.1186/1471-2164-11-36.
52. Complete sequences of four plasmids of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* SK11 reveal extensive adaptation to the dairy environment / Siezen R. J. [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. 2005. Vol. 71, No. 12. P. 8371-8382. DOI: 10.1128/AEM.71.12.8371-8382.2005.
53. Technological and genomic analysis of roles of the cell-envelope protease PrtS in yoghurt starter development / Tian H. [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2018. Vol. 19, No. 4. Art. 1068. DOI: 10.3390/ijms19041068.
54. Emergence of a cell wall protease in the *Streptococcus thermophilus* population / Delorme C. [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. 2010. Vol. 76, No. 2. P. 451-460. DOI: 10.1128/AEM.01018-09.
55. Survey on proteolytic activity and diversity of proteinase genes in mesophilic lactobacilli / Vukotić G. [et al.] // *Microbiology*. 2016. Vol. 85, No. 1. P. 33-41. DOI: 10.1134/S002626171601015X.
56. *prtH2*, not *prtH*, is the ubiquitous cell wall proteinase gene in *Lactobacillus helveticus* / Genay M. [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. Vol. 75, No. 10. P. 3238-3249. DOI: 10.1128/AEM.02395-08.

REFERENCES

1. Fermentation affects the antioxidant activity of plant-based food material through the release and production of bioactive components / Zhao Y.-S. [et al.] // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10, No 12. Art. 2004. DOI: 10.3390/antiox10122004.
2. Bioactive peptides: synthesis, sources, applications, and proposed mechanisms of action / Akbarian M. [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, No 3. Art. 1445. DOI: 10.3390/ijms23031445.
3. Review on plant-derived bioactive peptides: biological activities, mechanism of action and utilizations in food development / Fan H. [et al.] // *Journal of Future Foods*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 143-159. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2022.03.003.
4. Hong, H., Wu, J., Yan, X. Bioavailability of bioactive peptides derived from food proteins across the intestinal epithelial membrane: a review / Xu Q. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. P. 399-411. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.050.
5. Tavano O.L. Protein hydrolysis using proteases: an important tool for food biotechnology // *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 2013. Vol. 90. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.molcatb.2013.01.011.
6. Mora L., Toldrá F. Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides // *Current Opinion in Food Science*. 2023. Vol. 49. Art. 100973. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100973.

7. High angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory activity of Alcalase-digested green soybean (*Glycine max*) hydrolysates / Hanafi M.A. [et al.] // *Food Research International*. 2018. Vol. 106. P. 589-597. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.01.030.
8. Antibacterial peptides produced by Alcalase from cowpea seed proteins / Osman A. [et al.] // *Antibiotics*. 2021. Vol. 10, No. 7. Art. 870. DOI: 10.3390/antibiotics10070870.
9. Research progress on fermentation-produced plant-derived bioactive peptides / Zhao L. [et al.] // *Frontiers in Pharmacology*. 2024. Vol. 15. Art. 1438947. DOI: 10.3389/fphar.2024.1438947.
10. Bioactivities and ACE-inhibitory peptides releasing potential of lactic acid bacteria in fermented soy milk / Undhad Trupti J. [et al.] // *Food Production, Processing and Nutrition*. 2021. Vol. 3, No. 1. Art. 10. DOI: 10.1186/s43014-021-00056-y.
11. Investigating structure, biological activity, peptide composition and emulsifying properties of pea protein hydrolysates obtained. Art. 125375. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125375.
12. Krasnoshtanova A.A., Shults L.V. Obtaining and evaluating functional properties of protein isolates and hydrolysates from plant raw materials // *Chemistry of plant raw materials*. 2022. No. 4. P. 299-309. DOI: 10.14258/jcpim.20220410952. [In Russ.]
13. The rise of processed meat alternatives: a narrative review of the manufacturing, composition, nutritional profile and health effects of newer sources of protein, and their place in healthier diets / Gastaldello A. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 127. P. 263-271. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.07.005.
14. Biopeptides from vegetable proteins: new scientific evidences / Montesano D. [et al.] // *Current Opinion in Food Science*. 2020. Vol. 31. P. 31-37. DOI: 10.1016/j.cofs.2019.10.008.
15. Protein from oat: structure, processes, functionality, and nutrition / Mäkinen O.E. [et al.] // *Sustainable Protein Sources*. Academic Press. 2024. P. 121-141. DOI: 10.1016/B978-0-323-91652-3.00006-X.
16. Chandran A.S., Suri S., Choudhary P. Sustainable plant protein: an up-to-date overview of sources, extraction techniques and utilization // *Sustainable Food Technology*. 2023. Vol. 1, No. 4. P. 466-483. DOI: 10.1039/D3FB00003F.
17. Oilseed proteins: properties and application as a food ingredient / Kotecka-Majchrzak K. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 106. P. 160-170. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.004.
18. Rodrigues I.M., Coelho J.F., Carvalho M.G.V. Isolation and valorisation of vegetable proteins from oilseed plants: methods, limitations and potential // *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 109, No. 3. P. 337-346. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.027.
19. Kaur R., Ghoshal G. Sunflower protein isolates: composition, extraction and functional properties // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 306. Art. 102725. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102725.
20. Yano H., Fu W. Hemp: a sustainable plant with high industrial value in food processing // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 3, Art. 651. DOI: 10.3390/foods12030651.
21. Oilseeds beyond oil: press cakes and meals supplying global protein requirements / Arrutia F. [et al.] // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 100. P. 88-102. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.044.
22. Антонов Е. В. Посевные площади в России в 2014-2023 гг.: структура и факторы динамики // *Региональные исследования*. 2025. № 1 (87). С. 29-51. DOI: 10.5922/1994-5280-2025-1-3.
23. Agriculture in Russia. 2025: statistical digest [Electronic resource] / Federal State Statistics Service. URL: [<https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226>] (<https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226>) (date of access: 31.05.2026). [In Russ.]
24. Amaranth seed oil composition / Nasirpour-Tabrizi P. [et al.] // *Nutritional Value of Amaranth*. London: IntechOpen, 2020. P. 131-164. DOI: 10.5772/intechopen.91381.
25. Production of plant protein from seeds and cake of industrial hemp: overview of processing methods for food industry / Aleksanochkin D.I. [et al.] // *Food Systems*. 2024. Vol. 7, No. 2. P. 188-197. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197.
26. Bioactive peptides from fermented foods: production approaches, sources, and potential health benefits / Peres Fabbri L. [et al.] // *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 21. Art. 3369. DOI: 10.3390/foods13213369.

27. Guo Q., Chen P., Chen X. Bioactive peptides derived from fermented foods: preparation and biological activities // *Journal of Functional Foods*. 2023. Vol. 101, Art. 105422. DOI: 10.1016/j.jff.2023.105422.
28. Sarker A., Chakraborty S., Roy M. Dark red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein hydrolysates inhibit the growth of oxidizing substances in plain yogurt // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2020. Vol. 2. Art. 100062. DOI: 10.1016/j.jafr.2020.100062.
29. Development of fortified breads enriched with plant-based bioactive peptides derived from the chia (*Salvia hispanica* L.) expeller / Ozón B. [et al.] // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 18. Art. 3382. DOI: 10.3390/foods12183382.
30. Identification of potential inhibitory peptides of enzymes involved in the metabolic syndrome obtained by simulated gastrointestinal digestion of fermented bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds / Jakubczyk A. [et al.] // *Food Research International*. 2017. Vol. 100. P. 489-496. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.07.046.
31. Antioxidant activities of rapeseed peptides produced by solid state fermentation / He R. [et al.] // *Food Research International*. 2012. Vol. 49, No. 1. P. 432-438. DOI: 10.1016/j.foodres.2012.08.023.
32. Production and characterization of bioactive peptides in fermented soybean meal produced using proteolytic *Bacillus* species isolated from kinema / Kumari R. [et al.] // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 421. Art. 136130. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136130.
33. Peptide production through enhanced solid-state fermentation of soybean meal with *Bacillus subtilis* SBM_1: fermentation process and product characteristics / Liu D. [et al.] // *Industrial Crops and Products*. 2024. Vol. 219. Art. 119184. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119184.
34. Peptidomic analysis of antioxidant and ACE-inhibitory peptides obtained from tomato waste proteins fermented using *Bacillus subtilis* / Moayed A. [et al.] // *Food Chemistry*. 2018. Vol. 250. P. 180-187. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.033.
35. Biopeptide-rich fermented hemp seeds: boosting anti-inflammatory and immune responses through *Lactiplantibacillus plantarum* probiotic fermentation / Shan L [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 290. Art. 138782. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.138782.
36. Peptidomics reveals enhanced bioactivities of hempseed cake induced by solid-state fermentation / Feng X. [et al.] // *Food Chemistry*. 2026. Art. 149243. DOI: 10.1016/j.foodchem.2026.149243.
37. Identification and molecular mechanisms of novel antioxidant peptides from fermented broad bean paste: a combined in silico and in vitro study / Lin H. [et al.] // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 450. Art. 139297. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139297.
38. Identification and virtual screening of novel anti-inflammatory peptides from broccoli fermented by *Lactobacillus* strains / Li Y. [et al.] // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 9. Art. 1118900. DOI: 10.3389/fnut.2022.1118900.
39. Effects of fermentation with *Lactiplantibacillus plantarum* NCU116 on the antihypertensive activity and protein structure of black sesame seed / Du T. [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 262. Art. 129811. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129811.
40. Study on preparation of chickpea peptide and its effect on blood glucose / Ma X. [et al.] // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Art. 988628. DOI: 10.3389/fnut.2022.988628.
41. Fermented blend from sunflower seed press-cake and bovine sweet whey: protein breakdown during in vitro gastrointestinal digestion / Mendo S. [et al.] // *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. Art. 101745. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.101745.
42. Impact of different enzymatic processes on antioxidant, nutritional and functional properties of soy protein hydrolysates incorporated into novel cookies / Knežević-Jugović Z. [et al.] // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 1. Art. 24. DOI: 10.3390/foods12010024.
43. Bioactive peptides / Daliri E.B.-M. [et al.] // *Foods*. 2017. Vol. 6, No. 5. Art. 32. DOI: 10.3390/foods6050032.
44. Juillard V., Lopez-Kleine L., Monnet V. Proteolytic systems of lactic acid bacteria (LAB) // *Reference Module in Food Science*. Amsterdam: Elsevier, 2021.

45. Ma, J., Xu, M., Agyei, D. Cell-envelope proteinases from lactic acid bacteria: biochemical features and biotechnological applications / Ji D. [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2021. Vol. 20, No. 1. P. 369-400. DOI: 10.1111/1541-4337.12676.
46. Comparative genomics of the lactic acid bacteria / Makarova K. [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006. Vol. 103, No. 42. P. 15611-15616. DOI: 10.1073/pnas.0607117103.
47. Original features of cell-envelope proteinases of *Lactobacillus helveticus*: a review / Sadat-Mekmene L. [et al.] // International Journal of Food Microbiology. 2011. Vol. 146, No. 1. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.039.
48. Fermentation of plant-based dairy alternatives by lactic acid bacteria / Harper A.R. [et al.] // Microbial Biotechnology. 2022. Vol. 15, No. 5. P. 1404-1421. DOI: 10.1111/1751-7915.14008.
49. Prevalence, genetic diversity, and technological functions of the *Lactobacillus sanfranciscensis* in sourdough: a review / Zhang G. [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2019. Vol. 18, No. 4. P. 1209-1226. DOI: 10.1111/1541-4337.12459.
50. Study of extraction and enzymatic properties of cell-envelope proteinases from a novel wild *Lactobacillus plantarum* LP69 / Chen H. [et al.] // Catalysts. 2018. Vol. 8, No. 8. Art. 325. DOI: 10.3390/catal8080325.
51. The proteolytic system of lactic acid bacteria revisited: a genomic comparison / Liu M. [et al.] // BMC Genomics. 2010. Vol. 11. Art. 36. DOI: 10.1186/1471-2164-11-36.
52. Complete sequences of four plasmids of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* SK11 reveal extensive adaptation to the dairy environment / Siezen R. J. [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. 2005. Vol. 71, No. 12. P. 8371-8382. DOI: 10.1128/AEM.71.12.8371-8382.2005.
53. Technological and genomic analysis of roles of the cell-envelope protease PrtS in yoghurt starter development / Tian H. [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2018. Vol. 19, No. 4. Art. 1068. DOI: 10.3390/ijms19041068.
54. Emergence of a cell wall protease in the *Streptococcus thermophilus* population / Delorme C. [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. 2010. Vol. 76, No. 2. P. 451-460. DOI: 10.1128/AEM.01018-09.
55. Survey on proteolytic activity and diversity of proteinase genes in mesophilic lactobacilli / Vukotić G. [et al.] // Microbiology. 2016. Vol. 85, No. 1. P. 33-41. DOI: 10.1134/S002626171601015X.
56. *prtH2*, not *prtH*, is the ubiquitous cell wall proteinase gene in *Lactobacillus helveticus* / Genay M. [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. 2009. Vol. 75, No. 10. P. 3238-3249. DOI: 10.1128/AEM.02395-08.

Информация об авторах / Information about the authors

Алексаночкин Денис Игоревич, аспирант кафедры «Биотехнологии и биоорганического синтеза», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); 125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7677-6583>, e-mail: aleksanochkindi@list.ru

Керимова Гюльяр Мехмановна, аспирант кафедры «Биотехнологии и биоорганического синтеза», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); 125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4362-3657>

Кореньков Сергей Алексеевич, магистр кафедры «Биотехнологии и биоорганического синтеза», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); 125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8457-4230>

Фоменко Иван Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза», Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ); 125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2478-1705>

Denis I. Aleksanochkin, PhD student, Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH); 125080, the Russian Federation, Moscow, 11 Volokolamskoe Shosse, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7677-6583>, e-mail: aleksanochkindi@list.ru

Gyullyar M. Kerimova, PhD student, Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH); 125080, the Russian Federation, Moscow, 11 Volokolamskoe shosse, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4362-3657>

Sergey A. Koren'kov, Master of Science, Department of Biotechnology and Bioorganic Synthesis, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH); 125080, the Russian Federation, Moscow, 11 Volokolamskoe shosse, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8457-4230>

Ivan A. Fomenko, PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH); 125080, the Russian Federation, Moscow, 11 Volokolamskoe shosse, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2478-1705>

Заявленный вклад авторов

Алексаночкин Денис Игоревич – написание и редактирование рукописи, подбор литературных источников.

Керимова Гюльяр Мехмановна – подбор литературных источников, работа над черновиком рукописи.

Кореньков Сергей Алексеевич – оформление статьи по требованиям журнала и подбор литературных источников.

Фоменко Иван Андреевич – разработка дизайна исследования, критическая редакция текста работы.

Claimed contribution of the authors

Denis I. Aleksanochkin – manuscript writing and editing, selection of literary sources.

Gyullyar M. Kerimova – selection of literary sources, drafting of the manuscript.

Sergey A. Koren'kov – article formatting according to the Journal requirements and selection of literary sources.

Ivan A. Fomenko – research design development, critical editing of the manuscript.

Поступила в редакцию 01.07.2026

Поступила после рецензирования 11.08.2026

Принята к публикации 13.08.2026

Received 01.07.2026

Revised 11.08.2026

Accepted 13.08.2026