

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28>

Поступила 07.11.2024

Поступила после рецензирования 14.02.2025

Принята в печать 19.02.2025

© Куликов Д. С., Королев А. А., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

АСПЕКТЫ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ МОДИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ

Куликов Д. С.*, Королев А. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Московская область

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

растительные белки, ферменты, микроорганизмы, модификация, белковые гидролизаты, биоактивные пептиды

В связи с постоянным увеличением населения и растущим спросом на продукты питания с повышенным содержанием биологически ценного белка возрастает интерес к получению таких продуктов из источников, альтернативных животному сырью. Производство протеинов из растительного сырья с высокой биологической ценностью является перспективным направлением для исследований. Растительные белки обладают сравнительно низкой усвояемостью и имеют функционально-технологические свойства, ограничивающие их применение в продуктах питания. Для повышения усвояемости и изменения функционально-технологических свойств растительные белки модифицируют химическими, физико-химическими и биотехнологическими способами. Наиболее экологичной и экономически выгодной является биотехнологическая обработка сырья как исходными микроорганизмами (молочнокислые бактерии родов *Lactobacillus*, *Staphylococcus*, *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus* и *Leuconostoc*, бактерии рода *Bacillus*, грибы родов *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Saccharomyces* и *Candida* spp.), так и получаемыми из них ферментными препаратами протеолитического действия. Ферментативная модификация позволяет решить проблему низкой усвояемости растительных белков, улучшить их функционально-технологические свойства, снизить аллергенность и нейтрализовать специфический вкус. Кроме того, биотехнологический метод модификации микроорганизмами и ферментными препаратами используется и для гидролиза белков до биоактивных пептидов, предназначенных для функционального питания: с высокой антиоксидантной, противоопухолевой, противодиабетической и минералосвязывающей активностью. В процессе модификации следует учитывать тип используемого фермента или микроорганизма, его концентрацию, степень гидролиза, тип сырья, молекулярную массу его белков и другие факторы, влияющие на качество получаемых гидролизатов и пептидов. В противном случае ферментативная модификация вызывает нежелательные изменения: снижение функционально-технологических свойств и питательной ценности, а также ухудшение органолептических показателей, в частности усиление горечи гидролизатов. В данном обзоре представлен анализ широкого спектра результатов исследований российских и зарубежных ученых за последние годы в области ферментативной модификации растительных белков. Основное внимание уделено получению белковых гидролизатов и биоактивных пептидов высокого качества, способных конкурировать с белками животного происхождения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0006 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 07.11.2024

Accepted in revised 14.02.2025

Accepted for publication 19.02.2025

© Kulikov D. S., Korolev A. A., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

ASPECTS OF ENZYMATIC MODIFICATION OF PLANT PROTEINS

Denis S. Kulikov*, Aleksey A. Korolev

Russian Research Institute of Canning Technology, Vidnoe, Moscow region, Russia

KEY WORDS:

plant proteins, enzymes, microorganisms, modification, protein hydrolysates, bioactive peptides

ABSTRACT

Due to the constant increase in population and the growing demand for food products with a high content of biologically valuable protein, there is a growing interest in obtaining such products from sources alternative to animal raw materials. The production of proteins from plant raw materials with high biological value is a promising area for research. Plant proteins have relatively low digestibility and have functional and technological properties that limit their use in food products. To increase digestibility and change the functional and technological properties, plant proteins are modified by chemical, physicochemical and biotechnological methods. The most environmentally friendly and cost-effective is biotechnological processing of raw materials with both the original microorganisms (lactic acid bacteria of the genera *Lactobacillus*, *Staphylococcus*, *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus* and *Leuconostoc*, bacteria of the genus *Bacillus*, fungi of the genera *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Saccharomyces* and *Candida* spp.) and proteolytic enzyme preparations obtained from them. Enzymatic modification makes it possible to solve the problem of low digestibility of plant proteins, improve their functional and technological properties, reduce allergenicity and neutralize specific taste. Enzymatic modification allows us to solve the problem of low digestibility of plant proteins, their functional and technological properties, reduce allergenicity and neutralize specific taste. In addition, the biotechnological method of modification with microorganisms and enzyme preparations is also used for hydrolysis of proteins to bioactive peptides intended for functional nutrition: with high antioxidant, antitumor, antidiabetic and mineral-binding activity. In the process of modification, it is necessary to take into account the type of enzyme or microorganism used, its concentration, degree of hydrolysis, type of raw material, molecular weight of its proteins and other factors affecting the quality of the obtained hydrolysates and peptides. Otherwise, enzymatic modification causes undesirable changes: a decrease in functional and technological properties and nutritional value, as well as deterioration in organoleptic indicators, in particular an increase in the bitterness of hydrolysates. This review presents an analysis of a wide range of research results of Russian and foreign scientists in recent years in the field

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Куликов, Д. С., Королев, А. А. (2025). Аспекты ферментативной модификации растительных белков. *Пищевые системы*, 8(1), 22–28. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28>

FOR CITATION: Kulikov, D. S., Korolev, A. A. (2025). Aspects of enzymatic modification of plant proteins. *Food Systems*, 8(1), 22–28. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-22-28>

of enzymatic modification of plant proteins. The main focus is on obtaining protein hydrolysates and high-quality bioactive peptides that can compete with proteins of animal origin.

FUNDING: The article was prepared as part of the research under the state assignment No. FGUS-2024-0006 of the V. M. Gorbatov Federal Scientific Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

1. Введение

Мировое производство белков из растительного сырья в последние годы стремительно растет [1,2]. По прогнозам, к 2027 году рынок растительных белков составит 17,4 млрд долларов, увеличившись за пять лет на 42,6% [2]. Процесс их производства экономически выгоден и экологически безопасен [1,3,4]. Например, выработка 1 кг растительных культур (соя, горох, нут, чечевица и др.) требует меньше воды в 2,2–11,0 раз, чем производство аналогичного количества курятины, и в 8,6–43,0 раза меньше 1 кг говядины [3]. Снижены также выбросы углекислого газа при производстве растительных культур (кг CO₂ на 1 кг): соя — 3,2 кг; овес — 2,5 кг; пшеница и рожь — 1,6 кг; горох — 0,98 кг. Для сравнения при производстве птицы, свинины, баранины и говядины эти показатели составляют в среднем 9,9; 12,0; 40,0 и 99,0 кг газа, соответственно [4]. Несмотря на то, что растительные белки, как правило, имеют дефицит одной или нескольких незаменимых аминокислот, их широко применяют в качестве пищевых и кормовых добавок, а также в производстве продуктов функционального питания [5]. Использование растительных белков в пищевой промышленности ограничивается их высокой аллергенностью (в особенности сои) а также низкими функционально-технологическими свойствами и усвояемостью, по сравнению с животными белками [6]. Для решения данной проблемы проводят модификацию белка путем конформации (разворачивание, агрегация, сшивание) или фрагментации полипептидной цепи химическими, физико-химическими и биотехнологическими методами [7,8]. Химические методы являются наиболее распространенными в части нетермической модификации растительных белков. Однако процесс химической модификации связан с загрязнением окружающей среды и со сложностями в очистке готового продукта от остаточного количества реагентов [1,9,10]. Физические методы модификации, предназначенные для промышленного производства и предусматривающие отсутствие термической обработки белков (ультразвук, импульсное электрическое поле, радиоволны, холодная плазма и др.) малорентабельны из-за высокой стоимости оборудования и жестких условий выработки качественных продуктов [1,7,9].

Биотехнологическая модификация растительных белков с использованием различных штаммов микроорганизмов или полученных из них ферментов отличается высокой специфичностью, воспроизводимостью, экономичностью и экологичностью в сравнении с химическими и физико-химическими методами [7,9,11]. Данный подход позволил расширить ассортимент растительных белков с улучшенными функционально-технологическими свойствами и усвояемостью. Биотехнологическая модификация используется и для производства пептидов с антиоксидантными, антигипертензивными, противораковыми, антимикробными, гипохолестеринowymi и иммуномодулирующими свойствами [9,12]. Цель данного обзора — проанализировать публикации российских и зарубежных ученых, посвященные микроорганизмам и условиям модификации растительных белков. В работе рассмотрено влияние таких методов на усвояемость, аллергенность, функционально-технологические и биоактивные свойства белков и пептидов.

2. Объекты и методы

В качестве объектов исследования выбраны публикации, посвященные ферментативной модификации растительных белков. В обзоре анализируется влияние этого метода на функциональные свойства и качество получаемых белковых гидролизатов и биоактивных пептидов. Методами для проведения исследований служили поиск, обзор и анализ научных публикаций по данной тематике, большинство из которых опубликованы в течение 2017–2024 годов. Проанализированные работы отличались достоверными результатами и высокой цитируемостью.

Поиск научных публикаций осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, Researchgate.net, RSCI, Scopus, Web of Science, Elsevier, PubMed по следующим ключевым словам: растительные белки, ферменты, микроорганизмы, модификация, белковые гидролизаты, биоактивные пептиды. Опубликованные и отобранные результаты исследований были проанализированы, систематизированы, обобщены, после чего были сделаны выводы по разделам и общее заключение.

3. Используемые микробиологические модификаторы

Ферментативная модификация растительного сырья заключается в расщеплении под действием микроорганизмов или ферментных препаратов полисахаридов и полипептидов на более мелкие фрагменты, которые легче усваиваются организмом [9,13]. Для модификации белков используются микроорганизмы (бактерии, дрожжи или плесени), вырабатывающие протеолитические ферменты (протеиназы и пептидазы), которые способны расщеплять молекулы белков на пептиды с различной молекулярной массой и в дальнейшем высвобождать аминокислоты [14].

Молочнокислые бактерии (МКБ), включая *Lactobacillus*, *Staphylococcus*, *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Staphylococcus*, *Micrococcus* и *Leuconostoc*, в основном используются для ферментации белков и вторичных продуктов переработки растительных культур [10,15–19]. Помимо этих микроорганизмов, бактерии рода *Bacillus*, некоторые грибы родов *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Saccharomyces* и *Candida* spp. и полученные из них ферментные препараты также используются для ферментации белков растительного происхождения, расщепляя полипептиды и высвобождая большое количество аминокислот [8,20,21]. Получаемые таким образом гидролизаты характеризуются улучшенными органолептическими показателями, функционально-технологическими свойствами, усвояемостью и гипоаллергенностью [13,14].

4. Свойства микробиологических модификаторов

4.1. Улучшение органолептических показателей

Одной из главных проблем при производстве растительных белков, в особенности бобовых, является присутствие в полученных продуктах горечи, а также характерного бобового привкуса и запаха. Ферментация с применением микроорганизмов способна нейтрализовать данные недостатки. Например, снижение горечи горохового изолята установлено после 24 часов ферментации с шестью различными штаммами аэробных и анаэробных МКБ: *Lactobacillus plantarum* DSM-20174, *L. perolens* DSM-12744, *L. fermentum* DSM-20391, *L. casei* DSM-20011, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris* DSM-20200 и *Pediococcus pentosaceus* DSM-20336 [22]. Однако ферментация в течение двух суток усиливала у гидролизата «сырный» запах и кисловатый привкус, присущий МКБ. Гороховый белок, ферментированный с *L. plantarum*, обладал лучшей органолептикой с нейтральным запахом и вкусом по сравнению с другими штаммами, использованными в исследовании. Снижение или нейтрализация привкуса бобовых белков достигнуто и с помощью протеолитических ферментных препаратов микробиологического происхождения [23,24]. При этом степень протеолиза белков ферментами, как правило, должна быть не более 10%, при её превышении вкус горечи, наоборот, усиливается за счет изменения структурной целостности белков и воздействия гидрофобных аминокислотных остатков изолейтина, тирозина, фенилаланина и триптофана [23,25–27]. На горечь гидролизатов, помимо степени гидролиза и гидрофобности, влияют также молекулярная масса белков, положение остатков пролина, тип используемых ферментов и аминокислотная последовательность. Тем не менее ферментация микроорганизмами успешно снижает горький и бобовый вкус растительных белков. Например, группа ученых доказала снижение бобового привкуса соевого изолята после 24 и 48 часов ферментации бактериями *Bacillus subtilis* DSM 10, плесенью *Rhizopus oryzae* DSM 2200, дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* TMW 3.210 и лактобактериями *L. helveticus* DSM 20075 [28]. Обработка люпинового изолята штаммами лактобактерий *L. reuteri* DSM 20016, *L. brevis* TMW 1.1326, *L. amylophilus* TL 5, *L. parabuchneri* DSM 5987, *L. sakei* subsp. *carneus* DSM 15831, *Staphylococcus xylosum* DSM 20266, *L. helveticus* DSM 20075 и *L. delbrueckii* DSM 20081 также снижала уровень горечи продукта на 15–57% по сравнению с контрольным образцом. Лучшие результаты продемонстрировал продукт, ферментированный *L. brevis* TMW 1.1326, снизив также гороховый аромат изолята в 4,5 раза [29]. При этом ферментированные продукты обладали высокой способностью к пенообразованию и эмульгированию, что говорит и об улучшении их функционально-технологических свойств, определяющих качество белка.

4.2. Улучшение функционально-технологических свойств

Функционально-технологические свойства (ФТС), такие как растворимость, гелеобразование, эмульгирование, пенообразование, водоудерживающая способность и другие, зависят, как правило, от структуры и заряда белка, его молекулярной массы и аминокислотного состава [6,7,30]. Ферментация используется как наиболее эффективный метод модификации ФТС растительных белков [7,31]. Например, ферментация улучшает растворимость соевого белка, водосвязывающую (ВСС) и жиросвязывающую (ЖСС) способности, а также пенообразующие свойства (ПОС) [28]. В то же время растворимость белка и жироземлюющая способность (ЖЭС) горохового изолята снизились после ферментации МКБ, а ПОС и стабильность пены (СП) осталась постоянной по сравнению с необработанным образцом [22]. Увеличенная растворимость, ЖЭС и ПОС наблюдались после твердофазной ферментации белка люпина с использованием *Pediococcus pentosaceus* KTU05–9 в течение 24, 48 и 72 часов [32]. При добавлении в пшеничную муку полученных ферментированных изолятов люпина (3 г/100 г) увеличивалась кислотность, интенсивность цвета и вкуса, а также снижалась твердость выпекаемого хлеба.

Повышение растворимости, ЖСС, ЖЭС и ПОС установлено у соевых изолятов, модифицированных микроорганизмами *Actinomyces elegans* DSM 1174, *Rhizopus oryzae* DSM 2200 и *L. perolens* DSM 12744 и комплексом ферментных препаратов (Alcalase из *Bacillus licheniformis*, Flavourzyme из *Aspergillus oryzae* и папаина) [33]. При этом, как правило, фиксируется снижение ВСС гидролизатов из-за высвобождения гидрофобных аминокислот, взаимодействующих с липидами эмульсий. Обработка изолятов пшеничных отрубей МКБ ферментами, гидролизующими клеточную стенку, и фитазой позволила увеличить растворимость белка. Эмульгирующие свойства не изменились, а стабильность пенообразования увеличилась вдвое [34]. Гидролиз микробными эндопротеазами рисовых белков увеличивал их растворимость, пенообразование и эмульгирование [9]. Использо-

вание отечественных микробных ферментных препаратов протеолитического действия также способствовало увеличению растворимости, ПОС, ЖСС, ЖЭС и стабильности эмульсии (СЭ) растительных белков [21,35]. Некоторые примеры ферментативного гидролиза растительного сырья и его влияние на ФТС белков представлены в Таблице 1.

Специфичность действия ферментов микроорганизмов оказывает различное влияние на длину пептидной цепи, электростатический заряд и вторичную структуру растительных белков [9,24]. Такие модификации могут одновременно влиять на стабильность, поверхностную гидрофобность и биоактивность белковых молекул, увеличивая их усвояемость в организме.

4.3. Повышение усвояемости

Спрос на растительные белки растет, несмотря на некоторые антипитательные свойства, снижающие их усвояемость. Большое количество исследований российских и зарубежных ученых направлено на повышение их усвояемости, сравнимой с животными белками [24,36,37]. Относительно низкая усвояемость растительных белков связана с их высокой молекулярной массой, более сложной последовательностью аминокислот и наличием антипитательных веществ. Модификация микроорганизмами и микробными ферментными препаратами способствует увеличению биодоступности незаменимых аминокислот, снижает молекулярную массу пептидов и подавляет активность антипитательных веществ, тем самым повышая усвояемость растительных белков [38]. Так, доказано значительное повышение усвояемости и сбалансированности аминокислотного состава арахисовой муки после ферментации *B. licheniformis* CGMCC0635 в течение 21 часа при температуре 37 °C [39]. Снижение содержания α-галактозидов, фитиновой кислоты и трудноусвояемых углеводов (рафинозы и стахиозы) в продуктах переработки нута установлено после ферментации штаммами *Pediococcus pentosaceus*

Таблица 1. Условия ферментативной модификации растительных белков и ее влияние на функционально-технологические свойства

Table 1. Conditions of enzymatic modification of plant proteins and its influence on functional and technological properties

Источник белка	Ферментные препараты/микроорганизмы	Условия ферментации (концентрация, pH, температура, продолжительность)	Достигнутые результаты	Источник
Белковые продукты из гороха: изолят, концентрат, белковая мука	Ацидолюкс-А, Ацидолюкс-НП, Alcalase, Neutrase, Flavourzyme	Ацидолюкс-А: 0,5%/г белка, pH 4,0, 50 °C, 180 мин. Ацидолюкс-НП: 0,2%/г белка, pH 7,0, 50 °C, 120 мин. Alcalase: 0,2%/г белка, pH 7,0, 50 °C, 90 мин. Neutrase: 0,2%/г белка, pH 7,0, 50 °C, 150 мин. Flavourzyme: 1,5%/г белка, pH 7,0, 50 °C, 90 мин	Увеличение ПОС, ЖСС и растворимости. Снижение ВСС. При модификации Ацидолюкс-А — рассыпчатая консистенция и светлый цвет гидролизатов	[21]
Гороховый белковый изолят	Бациллолизин, Агропрот, Протозим, Протозим С	Бациллолизин: 8,9 ед./мл, 50 °C, pH 7,0, от 15 до 120 мин. Агропрот: 1,5 ед./мл, 50 °C, pH 5,0, от 15 до 120 мин. Протозим: 1,5 ед./мл, 50 °C, pH 8,0, от 15 до 120 мин. Протозим С: 1,5 ед./мл, 50 °C, pH 8,0, от 15 до 120 мин	Увеличение ЖЭС, СЭ, ПОС, СП и растворимости. Снижение бобового вкуса гидролизатов	[35]
Гороховый белковый концентрат	Protamex, Flavourzyme	1,5 Е/г белка, 50 °C, pH 6,0, 210 мин	Увеличение ПОС, СП, ЖСС и растворимости	[24]
Нутовый белковый изолят	Alcalase	5% к субстрату, pH 8,0, 50 °C, 24 часа	Увеличение ПОС, ЖЭС и растворимости. Снижение СЭ и СП	[9]
Рисовый белковый изолят	Alcalase, Neutrase, Трипсин	Alcalase: 6,67% к субстрату pH 8,0, 50 °C, 240 мин. Neutrase: 6,67% к субстрату, pH 7,0, 50 °C, 240 мин. Трипсин: 6,67% к субстрату, pH 8,0, 50 °C, 240 мин	Увеличение ПОС, ЖЭС, СЭ и растворимости	[9]
Люпиновый белковый изолят, Соевый белковый изолят	Alcalase, Corolase 7089, Corolase 2TS, Corolase N, Flavourzyme, Neutrase, PTN, Папаин, Пепсин, Protamex, Протеаза N-01	Alcalase: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 8,0, от 10 до 120 мин. Corolase 7089: 0,5 Е к субстрату, 55 °C, pH 7,0, от 10 до 120 мин. Corolase 2TS: 0,5 Е к субстрату, 70 °C, pH 7,0, от 10 до 120 мин. Corolase N: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 7,0, от 10 до 120 мин. Flavourzyme: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 6,0, от 10 до 120 мин. Neutrase: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 6,5, от 10 до 120 мин. PTN: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 9,0, от 10 до 120 мин. Папаин: 0,2 Е к субстрату, 80 °C, pH 7,0, от 10 до 120 мин. Пепсин: 0,5 Е к субстрату, 50 °C, pH 2,0, от 10 до 120 мин. Protamex: 0,5 Е / к субстрату, 60 °C, pH 8,0, от 10 до 120 мин. Протеаза N-01: 0,5 Е к субстрату, 55 °C, pH 7,2, от 10 до 120 мин.	Увеличение ЖСС, ЖЭС и ПОС и растворимости. При модификации Flavourzyme и папаином — снижение горечи гидролизатов	[31,33]
Белковый изолят пшеничных отрубей	<i>L. brevis</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>S. cerevisiae</i> , Viscoferm, Bel'ase, Фитаза	<i>L. brevis</i> , <i>L. plantarum</i> , <i>S. cerevisiae</i> : соотношение к отрубям 1:1000, 35 °C pH 5,6, 8 часов. Viscoferm, Bel'ase: 500 нкат/г отрубей, 35 °C pH 5,6, 8 часов. Фитаза: 250 нкат/г отрубей, 35 °C pH 5,6, 8 часов	Увеличение стабильности пены и растворимости	[34]
Семена конопли	Ксиланаза, Протеаза	Ксиланаза: 1,0%/г клетчатки, 30 °C, 24 часа. Протеаза: 2,5%/г белка, 30 °C, 24 часа	Увеличение растворимости и высвобождение биоактивных пептидов	[9]
Шрот семян тыквы, Шрот семян подсолнечника	<i>L. rhamnosus</i> , <i>L. casei</i>	3–5% к субстрату, 37 °C, 10 часов	Увеличение растворимости	[18,19]

и *Pediococcus acidilactici* [40]. Ферментированный МКБ гороховый изолят показал повышенную усвояемость, снижение молекулярной массы и изменение вторичной структуры белков, что указывает на его улучшенную биодоступность по сравнению с контрольным образцом [41].

Доказано улучшение усвояемости ферментированных растительных белков за счет снижения антипитательных факторов. Например, содержание конденсированных танинов в 19 сортах бобовых культур (горох, нут, фасоль, чечевица, чина) снижено путем ферментации *L. plantarum* C48 и *L. brevis* AM7 при температуре 30 °C в течение суток [42]. Кроме того, ферментация конских бобов с *L. plantarum* VTT E-133328 способствовала снижению содержания алкалоидов (вицина и конвизина), активности ингибитора трипсина и конденсированных танинов, а также увеличению содержания ненасыщенных жирных кислот, незаменимых аминокислот и γ -аминомасляной кислоты [43]. Схожим образом достигнута повышенная усвояемость белка для семян конопли, ферментированных с использованием *L. plantarum* 18S9 и *Leuconostoc mesenteroides* 12MM1 [44]. Содержание фитиновой кислоты и ингибирующей активности трипсина снижены и в гороховой муке, обработанной *L. plantarum* DSM 20174 [9]. В другой работе ферментация пророщенных зерен пшеницы, ячменя, нута, чечевицы и киноа с помощью *L. sanfranciscensis* DE9, *L. plantarum* 1A7 и *L. rossiae* LB5 снижала содержание рафинозы, фитиновой кислоты, ингибиторов трипсина и конденсированных танинов [45]. С помощью ферментации бактериями *L. rhamnosus* и *L. casei* шрота семян тыквы и подсолнечника в течение 10 часов при температуре 37 °C удалось получить лактоферментированные продукты с повышенным содержанием ненасыщенных жирных кислот (в 2,3 раза), белка (в 1,7 раза) и без лактозы. Результаты сравнивали с кисломолочным продуктом, полученным сквашиванием молока в аналогичных условиях [18,19]. Доказана увеличенная усвояемость белка пшеничных отрубей, подвергнутых комбинированной обработке заквасками (*L. brevis* E-95612 и *Candida humilis* E-96250) и микробными ферментами, разрушающими клеточную стенку (Depol 761P и Viscoferm) [20]. Поэтапная обработка ферментами микробиологического происхождения амилалитического (Fungamyl 800 L), целлюлолитического (Viscoferm L), ксиланазного (Shearzym 500 L), глюкоамилазного (AMG 300 L 2500) и протеолитического (Alcalase 2,4 L FG) действия также способствовала увеличению перевариваемости *in vitro* горохового и нутевого белка выше яичного альбумина [24].

4.4. Снижение аллергенности

Аллергены растительных белков, которые зачастую более опасны для здоровья человека, чем другие виды пищевых аллергенов, являются одной из главных проблем, ограничивающих применение растительных белков в пищевой и фармацевтической промышленности [9]. Физико-химические термические (кипячение, микроволновой и омический нагрев) и нетермические (обработка холодной плазмой, высоким давлением, ультразвуком и облучением) методы модификации позволяют снизить или нейтрализовать активность аллергенов, но приводят к чрезмерному разрушению молекул белков. Ферментативная модификация ограниченным протеолизом способна инактивировать аллергены растительных белков путем направленной деградации аллергенных эпитопных последовательностей в их первичной и вторичной структурах [13].

Коллектив ученых сообщил о сниженной иммунореактивности изолята соевого белка после ферментации с использованием *B. subtilis*, *Rh. oryzae*, *Sacch. cerevisiae* и *L. helveticus* [28]. Среди оцениваемых штаммов микроорганизмов *L. helveticus* DSM 20075 оказался наиболее эффективным, снизив до 100% иммунореактивность соевого белка. Ферментативная обработка 8 штаммами лактобактерий *L. plantarum* также снижала реактивность аллергена иммуноглобулина E соевого белка на 83,8–94,8% [46]. Авторы связывают данное снижение аллергенности с появлением низкомолекулярных (< 10 кДа) пептидов, с увеличением в 1,6–3,3 раза поверхностной гидрофобности, а также с появлением во вторичной структуре белков β -цепи во всех ферментированных образцах. В другом исследовании соевый шрот ферментировали консорциумом *B. subtilis* CICC20641, *L. casei* CGMCC1.539 и дрожжей в соотношении 2:1:1 с использованием твердофазной ферментации при 30 °C в течение 72 часов [47]. Установлено значительное снижение содержания аллергена в соевом шроте после ферментации, что было связано с расщеплением аллергенных эпитопных последовательностей β -конглианина (7S) и глицинина (11S) на полипептиды и пептиды с меньшей молекулярной массой. Снижение иммунореактивности β -конглианина и глицина зафиксировано и в соевом молоке после ферментации *Enterococcus faecalis* VB43 при 37 °C в течение 24 часов [15]. Другая группа ученых

снизила аллергенность соевого молока ферментацией лактобактериями *L. brevis* CICC23.474 и *L. brevis* CICC23.470 [17]. Белки пшеницы и ржи, содержащие иммуноглобулин E (альбумины, глобулины и глиадины), разрушались на пептиды после ферментации с несколькими видами МКБ, включая *L. brevis* 14G, *L. sanfranciscensis* 7A, *L. alimentarius* 15M и *L. hilgardii* 51. Эффективно гидролизировал аллерген пшеницы (глиадин) и выделенный из ферментированной пшеницы *E. faecalis* [9]. Кроме того, содержание глиадинов и глютеинов в пшенице снизилось после ферментации 9 штаммами *E. faecalis* и *L. lactis* с наибольшей деградацией основных аллергенных белков глютена при обработке штаммом *L. lactis* LLGK18 при 37 °C в течение 24 часов [16]. Результаты электрофореза горохового изолята, обработанного шестью различными штаммами МКБ, показали снижение аллергенных белковых фракций, в сравнении с контролем [22].

4.5. Повышение антиоксидантной активности

Клинические исследования доказали взаимосвязь окислительного стресса в организме, вызванного активными формами кислорода, и развития хронических заболеваний, включая сахарный диабет, ревматоидный артрит и рак [48]. В настоящее время пищевая промышленность заинтересована в производстве натуральных продуктов с высокими антиоксидантными свойствами из-за их способности ингибировать окислительную дегенерацию макромолекул жиров, увеличивать срок годности и качество готового продукта [49]. Биоактивные пептиды демонстрируют различные антиоксидантные свойства, которые зависят от их конформационной структуры, аминокислотного состава и поверхностной гидрофобности. Например, среди изученных 20 аминокислот гистидин, триптофан, метионин, лизин, аргинин, цистеин и тирозин проявили более сильную антиоксидантную активность [50]. Показано, что ферментативные гидролизаты горохового белка проявляют антиоксидантную активность в отношении перекисного окисления линоленовой кислоты [51]. Также сообщается, что ферментированные *B. licheniformis* белки арахисовой муки обладали повышенной антиоксидантной активностью, а также активностью захвата радикалов 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила и гидроксильных радикалов [39]. Несмотря на это, растительное сырье, в зависимости от культуры и сорта, может обладать высокой антиоксидантной активностью. При изучении изолятов белков фасоли, маша, желтой и черной сои у фасоли была выявлена самая высокая антиоксидантная активность (удаление гидроксильных радикалов) и наибольшая растворимость. Белок маша характеризовался высоким содержанием незаменимых аминокислот, а белок черной сои — низким уровнем гидрофобных аминокислот, что обуславливает его высокую водосвязывающую способность. Антиоксидантная активность всех образцов возрастала с увеличением концентрации белка в растворе от 0,2 до 1,0 мг/мл. Исходные и модифицированные микроорганизмами растительные белки с увеличенной антиоксидантной активностью проявляют ингибирующее действие против раковых клеток организма [52].

4.6. Повышение противоопухолевой активности

Биоактивные пептиды способны функционировать как носители цитотоксических агентов, ингибируя специфические молекулярные сигнальные пути раковых клеток, связанные с механизмом онкогенеза, подавлять самовосстановление и дифференциацию раковых стволовых клеток [50]. Таким образом, они могут применяться в качестве противоопухолевых препаратов. Так, установлена ингибиторная активность белков фасоли, маша, желтой и черной сои на клеточную линию рака яичников SKOV3 и клетки гепатоцеллюлярной карциномы печени SMMC-7721 при концентрации белков в растворе от 200 до 800 мкг/мл. Белок черной сои демонстрировал наибольшее ингибирование раковых клеток среди других образцов — до 69% на SKOV3 при концентрации 600 мкг/мл и до 7% — на SMMC-7721 при концентрации 800 мкг/мл. Полученные результаты авторы объяснили наличием большого количества в черной сое белков с молекулярной массой 36 кДа, которые идентифицируются как углеводсвязывающие (лектины) и способные ингибировать активность линий раковых клеток HONE1, HepG2 и MCF7 [52]. В другом исследовании установлены противоопухолевые свойства пептидов киноа на линии клеток колоректального рака толстой кишки [53]. Гидролизаты амаранта, полученные *in vitro* моделированием пищеварения в желудочно-кишечном тракте, проявляли улучшенную антиоксидантную активность и подавляли рост клеток рака молочной железы на 50% при концентрации 48,3 мкг/мл, вызывая их апоптоз и снижение миграционной активности [54]. Установлено, что гидролизированные из оливы пептиды с молекулярной массой менее 3 кДа проявляют антигипертензивные свойства при концентрации $29,6 \pm 0,5$ мкг/мл

в модели *in vitro*. При этом фракционированный из данного гидролизата пептид (LLPSY) обладал антипролиферативной активностью в отношении клеток рака груди MDAMB-468 и рака простаты PC-3, снижая их миграционную способность и останавливая клеточный цикл в фазе S при синтезе ДНК [55].

4.7. Повышение противодиабетической активности

Биоактивные пептиды растительных белков, полученные ферментативным гидролизом, оказывают противодиабетическое действие на организм человека, что делает их перспективной альтернативой синтетическим противодиабетическим препаратам. Например, установлено ингибирование дипептидилпептидазы IV пептидами, полученными гидролизом растительных белков (соя, люпин и др.), что приводило к снижению уровня глюкозы в крови и способствовало нормализации уровня вырабатываемого организмом инсулина [51,56]. Кроме этого, важной частью контроля диабета является потребление пищевых ингредиентов, ингибирующих действие ферментов α -амилазы и α -глюкозидазы, которые быстро расщепляют молекулы поступающих углеводов с высвобождением большого количества глюкозы. Обработкой белков гороха протеолитическим ферментом термоазой, полученного из *B. stearotheophilus*, удалось получить пептиды с увеличенной противодиабетической активностью [57]. Установлено, что пептиды с различной молекулярной массой (<1, 1–3, 3–5, 5–10, >10 кДа) подавляли активность α -амилазы и α -глюкозидазы методом *in vitro*, среди которых наибольшую эффективность демонстрировали пептиды массой 3–5 и >10 кДа.

4.8. Увеличение минералосвязывающей активности

Минеральные вещества, включая железо, медь, цинк, марганец и кальций, являются важными неорганическими микроэлементами, необходимыми для поддержания здоровья человека [58]. Минералосвязывающие пептиды гидролизатов растительных белков могут использоваться в качестве минеральных добавок для предотвращения их дефицита в организме [59]. В настоящее время получен и идентифицирован широкий спектр пептидов, хелатирующих металлы [9,52,60–63]. Так, доказано, что пентапептид FVDVT (Фенилаланин-Валин-Аспарагин-Валин-Треонин) из гидролизата белка пшеницы проявил улучшенную кальцийсвязывающую активность на 86,37% по сравнению с контролем, составив $89,94 \pm 0,75\%$ [61]. Кальций является строительным материалом для зубов и костей, участвует в проведении нервных импульсов, регуляции давления, транспорте ионов, свертывании крови. Полученные результаты показали, что атомы кислорода карбоксильных групп и атомы азо-

та амидных групп аминокислот обеспечивали основную связку с кальцием. Кроме того, среди аминокислот лучшую связку с кальцием демонстрировали аспарагиновая кислота и треонин. В другой работе получены железосвязывающие пептиды VEDELVAVV (11S леугмин) и LAGNPDEFRPQ из вторичного продукта переработки грецкого ореха — обезжиренной стружки [62]. Железо является частью гемоглобина эритроцитов, миоглобина мышц, ферритина печени и функционирует как кофактор для различных ферментов. Пентапептиды PAIDL и LLGIL, выделенные из гидролизата белка маша, продемонстрировали более высокую антиоксидантную активность и способность хелатировать железо по сравнению с гепта- и октапептидами. В связи с этим предполагается, что короткие пептидные цепи (например, пентапептиды) эффективнее образуют хелатные комплексы с железом, чем более длинные [63]. При исследовании белков четырех растительных культур установлена высокая способность к хелатированию железа у фасоли при концентрации 156 мкг/мл с распределением минералосвязывающей активности белков по убыванию: фасоль > черная соя > маш > желтая соя [52].

5. Выводы

Улучшению конкурентоспособности животных источников белков и удовлетворению спроса на растительные белковые продукты с высокой биологической ценностью способствуют биотехнологические методы (ферментация микроорганизмами, обработка ферментными препаратами) модификации. Они изменяют структуру, поверхностно-активные и биофизические свойства растительных белков для увеличения их усвояемости, функциональности, органолептических показателей и с целью снижения аллергенности. Кроме того, ферментативная модификация растительных белков используется для разработки функциональных ингредиентов с полезными для здоровья биоактивными пептидами, проявляющими антиоксидантные, антипролиферативные, антидиабетические и минералосвязывающие свойства. Высокая специфичность, воспроизводимость, низкая себестоимость и экологичность ферментативного гидролиза являются преимуществами биотехнологического метода, по сравнению с химическими и физико-химическими способами модификации. Такие факторы модификации, как тип фермента, его концентрация, степень гидролиза и источник белка, должны учитываться для получения продукта высокого качества. В противном случае ферментативная модификация способствует нежелательным изменениям — снижению функционально-технологических свойств и ухудшению органолептических показателей гидролизатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Singhal, A., Karaca, A.C., Tyler, R., Nickerson, M. (2016). Pulse Proteins: From Processing to Structure-Function Relationships. Chapter in a book: Grain Legumes. InTechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/64020>
- Жихарёва, В. (2023). Вместо молока и мяса: почему растительные протеины становятся популярнее. Электронный ресурс: <https://plus-one.ru/manual/2023/07/14/vmesto-moloka-i-myasa> Дата обращения: 09.09.2024. [Zhikhareva, V. (2023). Instead of milk and meat: Why plant proteins are becoming increasingly popular. Retrieved from: <https://plus-one.ru/manual/2023/07/14/vmesto-moloka-i-myasa> Accessed September 09, 2024. (In Russian)]
- Редакторская статья. (2017). Протеины: новое в технологии производства и возможности использования. *Комбикорма*, 10, 59–62. [Editorial article. (2017). Proteins: New in the production technology and possibilities of using. *Combined Feed*, 10, 59–62. (In Russian)]
- Webber, J. (2023). How many CO₂ emissions does the meat industry actually produce? Plant based news. Retrieved from: <https://plantbasednews.org/opinion/the-long-read/emissions-meat-industry> Accessed September 09, 2024.
- Ismail, B.P., Senaratne-Lenagala, L., Stube, A., Brackenridge, A. (2020). Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. *Animal Frontiers*, 10(4), 53–63. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa040>
- Куликов, Д.С., Аксёнова, Л.М., Самойлова, А.М. (2024). Функционально-технологические свойства белковых продуктов из зернобобовых культур и их модификация под влиянием различных факторов. Часть 1. *Пищевая промышленность*, 3, 20–25. [Kulikov, D.S., Akseanova, L.M., Samoylova, A.M. (2024). Functional properties of protein products from grain legumes and their modification under the influence of various factors. Part 1. *Food Industry*, 3, 20–25. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.3.3.004>
- Куликов, Д.С., Королев, А.А. (2024). Функционально-технологические свойства белковых продуктов из зернобобовых культур и их модификация под влиянием различных факторов. Часть 2. *Пищевая промышленность*, 8, 35–44. [Kulikov, D.S., Korolev, A.A. (2024). Functional properties of protein products from grain legumes and their modification under the influence of various factors. Part 2. *Food Industry*, 8, 35–44. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.8.8.007>
- Nasrabadi, M.N., Doost, A.S., Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118, Article 106789. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789>
- Olatunde, O.O., Owolabi, I.O., Fadairo, O.S., Ghosal, A., Coker, O.J., Soladaye, O.P. et al. (2022). Enzymatic modification of plant proteins for improved functional and bioactive properties. *Food and Bioprocess Technology*, 16, 1216–1234. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02971-5>
- Meinlschmidt, P., Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P. (2016). Soy protein hydrolysates fermentation: Effect of debittering and degradation of major soy allergens. *LWT — Food Science and Technology*, 71, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.03.026>
- Куликов, Д.С., Арюзина, М.А. (2021). Биокаталический и биосинтетический способы получения белковых концентратов из гороха и нута. *Пищевые системы*, 4(3S), 160–167. [Kulikov, D.S., Aryuzina, M.A. (2021). Biocatalytic and biosynthetic methods of obtaining protein concentrates from peas and chickpeas. *Food Systems*, 4(3S), 160–167. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-160-167>
- Aondona, M.M., Ikeya, J.K., Ukeyima, M.T., Gborigo, T.-w. J.A., Aluko, R.E., Girgih, A.T. (2021). In vitro antioxidant and antihypertensive properties of sesame seed enzymatic protein hydrolysate and ultrafiltration peptide fractions. *Journal of Food Biochemistry*, 45(1), Article e13587. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13587>
- Fadimu, G., Olatunde, O., Bandara, N., Truong, T. (2022). Reducing allergenicity in plant-based proteins. Chapter in a book: Engineering Plant-Based Food Systems. Academic Press, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89842-3.00012-9>
- Kieliszek, M., Pobiega, K., Piwowarek, K., Kot, A.M. (2021). Characteristics of the proteolytic enzymes produced by lactic acid bacteria. *Molecules*, 26(7), Article 1858. <https://doi.org/10.3390/molecules26071858>
- Biscola, V., de Olmos, A.R., Choiset, Y., Rabesona, H., Garro, M.S., Mozzi, F. et al. (2017). Soy milk fermentation by *Enterococcus faecalis* VB43 leads to reduction in the immunoreactivity of allergenic proteins β -conglycinin (7S) and glycinin (11S). *Beneficial Microbes*, 8(4), 635–643. <https://doi.org/10.3920/BM2016.0171>
- El Mecherfi, K.-E., Lupi, R., Cherkaoui, M., Albuquerque, M.A.C., Todorov, S.D., Tranquet, O. et al. (2022). Fermentation of gluten by *Lactococcus lactis* LLGKC18 reduces its antigenicity and allergenicity. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 14(5), 779–791. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09808-1>
- Lu, Q., Zhuo, L., Wu, Z., Li, X., Tong, P., Wu, Y. et al. (2022). Characterization of the protein structure of soymilk fermented by *Lactobacillus* and evaluation of its

- potential allergenicity based on the sensitized-cell model. *Food Chemistry*, 366, Article 130569. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130569>
18. Sineelnikov, A.V., Kolganova, T. V. Ulanova, R.V. (2024). Obtaining analogues of fermented milk products from seed meal using new strains of lactic acid bacteria. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 60, 476–482. <https://doi.org/10.1134/S0003683824603664>
 19. Синельников, А.В., Уланова, Р.В., Канапатский, Т.А. (2024). Разработка технологии получения лактоферментированных продуктов на основе растительного материала. *Пищевая промышленность*, 8, 75–80. [Sineelnikov, A.V., Ulanova, R.V., Kanapatsky, T.A. (2024). Development of technology for obtaining lacto-fermented products based on plant material. *Food Industry*, 8, 75–80. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.8.8.014>
 20. Arte, E., Rizzello, C.G., Verni, M., Nordlund, E., Katina, K., Coda, R. (2015). Impact of enzymatic and microbial bioprocessing on protein modification and nutritional properties of wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(39), 8685–8693. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03495>
 21. Куликов, Д.С., Калугина, З.И., Ермолаева, М.Д., Шевченко, С.Е., Бызов, В.А. (2024). Модификация функционально-технологических свойств белковых продуктов из гороха отечественными бактериальными протеазами. *Пищевая промышленность*, 8, 93–101. [Kulikov, D.S., Kalugina, Z.I., Ermolaeva, M.D., Shevchenko, S.E., Byzov, V.A. (2024). Modification of functional and technological properties of protein products from peas by domestic bacterial proteases. *Food Industry*, 8, 93–101. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.8.8.018>
 22. Arteaga, V. G., Leffler, S., Muranyi, I., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2020). Sensory profile, functional properties and molecular weight distribution of fermented pea protein isolate. *Current Research in Food Science*, 4, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.12.001>
 23. Kravchenko, I.V., Furalyov, V.A., Pshennikova, E.S., Kostyleva, E. V., Sereda, A. S., Kurbatova, E. I. et al. (2024). The effect of various domestically produced proteolytic enzyme preparations on the organoleptic properties of pea protein isolates. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 60, 656–662. <https://doi.org/10.1134/S0003683824604335>
 24. Колпакова, В.В., Куликов, Д.С., Гулакова, В.А., Уланова, Р.В., Бессонов, В.В. (2024). Кисломолочный продукт функционального назначения с гороховым концентратом. *Пищевая промышленность*, 6, 126–132. [Kolpakova, V.V., Kulikov, D.S., Gulakova, V.A., Ulanova, R.V., Bessonov, V.V. (2024). Fermented milk product for functional purposes with pea concentrate. *Food Industry*, 6, 126–132. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.6.6.026>
 25. Akharume, F. U., Aluko, R. E., Adedeji, A. A. (2021). Modification of plant proteins for improved functionality: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 198–224. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12688>
 26. Idowu, A. T., Benjakul, S. (2019). Bitterness of fish protein hydrolysate and its debittering prospects. *Journal of Food Biochemistry*, 43(9), Article e12978. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12978>
 27. Eckert, E., Han, J., Swallow, K., Tian, Z., Jarpa-Parra, M., Chen, L. (2019). Effects of enzymatic hydrolysis and ultrafiltration on physicochemical and functional properties of faba bean protein. *Cereal Chemistry*, 96(4), 725–741. <https://doi.org/10.1002/cche.10169>
 28. Meinschmidt, P., Ueberham, E., Lehmann, J., Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P. (2016). Immunoreactivity, sensory and physicochemical properties of fermented soy protein isolate. *Food Chemistry*, 205, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.016>
 29. Schlegel, K., Leidigkei, A., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2019). Technofunctional and sensory properties of fermented lupin protein isolates. *Foods*, 8(12), Article 678. <https://doi.org/10.3390/foods8120678>
 30. Singh T. P., Siddiqi R. A., Sogi D. S. (2021). Enzymatic modification of rice bran protein: Impact on structural, antioxidant and functional properties. *LWT*, 138, Article 110648. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110648>
 31. Schlegel, K., Sontheimer, K., Hickisch, A., Wani, A. A., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2019). Enzymatic hydrolysis of lupin protein isolates – Changes in the molecular weight distribution, technofunctional characteristics, and sensory attributes. *Food Science and Nutrition*, 7(8), 2747–2759. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1139>
 32. Klupsaitė D., Juodeikiene G., Zadeike, D., Bartkiene, E., Maknickiene, Z., Liutkute, G. (2017). The influence of lactic acid fermentation on functional properties of narrow-leaved lupine protein as functional additive for higher value wheat bread. *LWT*, 75, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.058>
 33. Meinschmidt, P., Sussmann, D., Schweiggert-Weisz, U., Eisner, P. (2015). Enzymatic treatment of soy protein isolates: Effects on the potential allergenicity, technofunctionality, and sensory properties. *Food Science and Nutrition*, 4(1), 11–23. <https://doi.org/10.1002/fsn3.253>
 34. Arte, E., Huang, X., Nordlund, E., Katina, K. (2019). Biochemical characterization and technofunctional properties of bioprocessed wheat bran protein isolates. *Food Chemistry*, 289, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.020>
 35. Kravchenko, I.V., Furalyov, V.A., Kostyleva, E.V., Sereda, A.S., Kurbatova, E.I., Tsurikova, N.V. et al. (2024). Effect of different classes of proteases on the techno-functional properties of pea protein isolates. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 60, 106–117. <https://doi.org/10.1134/S0003683824010083>
 36. Joshi, P., Varma, K. (2016). Effect of germination and dehulling on the nutritive value of soybean. *Nutrition and Food Science*, 46(4), 595–603. <https://doi.org/10.1108/NFS-10-2015-0123>
 37. Pal, R.S., Bhartiya, A., ArunKumar, R., Kant, L., Aditya, J.P., Bisht, J.K. (2016). Impact of dehulling and germination on nutrients, antinutrients, and antioxidant properties in horsegram. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2037-3>
 38. Tapal, A., Tikku, P.K. (2019). Nutritional and Nutraceutical Improvement by Enzymatic Modification of Food Proteins. Chapter in a book: *Enzymes in Food Biotechnology. Production, Applications, and Future Prospects*. Academic Press, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00027-X>
 39. Yang, X., Teng, D., Wang, X., Guan, Q., Mao, R., Hao, Y. et al. (2016). Enhancement of nutritional and antioxidant properties of peanut meal by bio-modification with bacillus licheniformis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180(6), 1227–1242. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2163-z>
 40. Xing, Q., Dekker, S., Kyriakopoulou, K., Boom, R.M., Smid, E.J., Schutyser, M.A.I. (2020). Enhanced nutritional value of chickpea protein concentrate by dry separation and solidstate fermentation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, Article 102269. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102269>
 41. Kim, H.D., Lee, K.S., Lee, K.E., Suh, H.J., Kim, B.-Y. (2023). Improved digestibility and bioavailability of pea protein following enzymatic treatment and fermentation by lactic acid bacteria. *Food Science and Biotechnology*, 33(3), 607–615. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01335-9>
 42. Curiel, J.A., Coda, R., Centomani, I., Summo, C., Gobetti, M., Rizzello, C.G. (2015). Exploitation of the nutritional and functional characteristics of traditional Italian legumes: The potential of sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 196, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.11.032>
 43. Coda, R., Melama, L., Rizzello, C.G., Curiel, J.A., Sibakov, J., Holopainen, U. et al. (2015). Effect of air classification and fermentation by *Lactobacillus plantarum* VTT E-133328 on faba bean (Vicia faba L.) flour nutritional properties. *International Journal of Food Microbiology*, 193, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.10.012>
 44. Pontonio, E., Verni, M., Dingeo, C., Diaz-de-Cerio, E., Pinto, D., Rizzello, C.G. (2020). Impact of enzymatic and microbial bioprocessing on antioxidant properties of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Antioxidants*, 9(12), Article 1258. <https://doi.org/10.3390/antiox9121258>
 45. Montemurro, M., Pontonio, E., Gobetti, M., Rizzello, C.G. (2019). Investigation of the nutritional, functional and technological effects of the sourdough fermentation of sprouted flours. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.005>
 46. Rui, X., Huang, J., Xing, G., Zhang, Q., Li, W., Dong, M. (2019). Changes in soy protein immunoglobulin E reactivity, protein degradation, and conformation through fermentation with *Lactobacillus plantarum* strains. *LWT*, 99, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.034>
 47. Yang, A., Zuo, L., Cheng, Y., Wu, Z., Li, X., Tong, P. et al. (2018). Degradation of major allergens and allergenicity reduction of soybean meal through solid-state fermentation with microorganisms. *Food and Function*, 9(3), 1899–1909. <https://doi.org/10.1039/c7fo01824j>
 48. Ibrahim, H.R., Isono, H., Miyata, T. (2018). Potential antioxidant bioactive peptides from camel milk proteins. *Animal Nutrition*, 4(3), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2018.05.004>
 49. Nwachukwu, I.D., Aluko, R.E. (2019). Structural and functional properties of food protein-derived antioxidant peptides. *Journal of Food Biochemistry*, 43(1), Article e12761. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12761>
 50. Xu, N., Chen, G., Liu, H. (2017). Antioxidative categorization of twenty amino acids based on experimental evaluation. *Molecules*, 22(12), Article 2066. <https://doi.org/10.3390/molecules22122066>
 51. Samtiya, M., Acharya, S., Pandey, K.K., Aluko, R.E., Udenigwe, C.C., Dhewa, T. (2021). Production, purification, and potential health applications of edible seeds' bioactive peptides: A concise review. *Foods*, 10(11), Article 2696. <https://doi.org/10.3390/foods10112696>
 52. Chen, Z., Wang, J., Liu, W., Chen, H. (2017). Physicochemical characterization, antioxidant and anticancer activities of proteins from four legume species. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 964–972. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2390-x>
 53. Vilcacundo, R., Miralles, B., Carrillo, W., Hernández-Ledesma, B. (2018). In vitro chemopreventive properties of peptides released from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein under simulated gastrointestinal digestion. *Food Research International*, 105, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.036>
 54. Taniya, M.S., Reshma, M.V., Shanmoli, P.S., Krishnan, G., Priya, S. (2020). Bioactive peptides from amaranth seed protein hydrolysates induced apoptosis and antimigratory effects in breast cancer cells. *Food Bioscience*, 35, Article 100588. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100588>
 55. Vázquez-Villanueva, R., Muñoz-Moreno, L., Carmena, M.J., Marina, M.L., García, M.C. (2018). In vitro antitumor and hypotensive activity of peptides from olive seeds. *Journal of Functional Foods*, 42, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.062>
 56. Lamm, C., Zanon, C., Arnoldi, A., Vistoli, G. (2016). Peptides derived from soy and lupin protein as dipeptidyl-peptidase IV inhibitors: In vitro biochemical screening and in silico molecular modeling study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(51), 9601–9606. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04041>
 57. Olagunju, A.I., Omoba, O.S., Enujiugha, V.N., Alashi, A.M., Aluko, R.E. (2021). Thermoase-hydrolysed pigeon pea protein and its membrane fractions possess in vitro bioactive properties (antioxidative, antihypertensive, and antidiabetic). *Journal of Food Biochemistry*, 45(3), Article e13429. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13429>
 58. Silva, C.S., Moutinho, C., Vinha, A.F., Matos, C. (2019). Trace minerals in human health: Iron, Zinc, Copper, Manganese and Fluorine. *International Journal of Science and Research Methodology*, 13(3), 57–80.
 59. Caetano-Silva, M.E., Netto, F.M., Bertoldo-Pacheco, M.T., Alegria, A., Cilla, A. (2021). Peptide-metal complexes: Obtention and role in increasing bioavailability and decreasing the pro-oxidant effect of minerals. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(9), 1470–1489. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1761770>
 60. Cui, P., Lin, S., Jin, Z., Zhu, B., Song, L., Sun, N. (2018). In vitro digestion profile and calcium absorption studies of a sea cucumber ovum derived heptapeptide-calcium complex. *Food and Function*, 9(9), 4582–4592. <https://doi.org/10.1039/C8FO00910D>
 61. Wang, L., Ding, Y., Zhang, X., Li, Y., Wang, R., Luo, X. et al. (2018). Isolation of a novel calcium-binding peptide from wheat germ protein hydrolysates and the prediction for its mechanism of combination. *Food Chemistry*, 239, 416–426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.090>
 62. Lv, Y., Wei, K., Meng, X., Huang, Y., Zhang, T., Li, Z. (2017). Separation and identification of iron-chelating peptides from defatted walnut flake by nanoLC-ESI-MS/MS and de novo sequencing. *Process Biochemistry*, 59(Part B), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.05.010>
 63. Chunkao, S., Youravong, W., Yupanqui, C.T., Alashi, A.M., Aluko, R.E. (2020). Structure and function of mung bean protein-derived iron-binding antioxidant peptides. *Foods*, 9(10), Article 1406. <https://doi.org/10.3390/foods9101406>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Куликов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 Тел.: +7-903-709-81-23 E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * автор для контактов	Denis S. Kulikov , Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia Tel.: +7-903-709-81-23 E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * corresponding author
Королев Алексей Александрович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 Тел.: +7-926-113-19-08 E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522	Alexey A. Korolev , Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia Tel.: +7-926-113-19-08 E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.