

BIOLOGICAL SCIENCES

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ БЕЛКА И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЕГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ: ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

Бурак Л. Ч.

*доктор философии в области пищевых наук (PhD), к.т. н.,
директор ООО «БЕЛПРОСАКВА», Республика Беларусь, г. Минск.
<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>*

Егорова З. Е.

*Белорусский государственный технологический университет,
доцент, факультет технологии органических веществ, к.т.н. Минск, Беларусь
<https://orcid.org/0000-0001-8015-527X>*

Саманкова Н. В.

*Белорусский государственный экономический университет,
доцент кафедры товароведения и экспертизы товаров, к.т.н. Минск, Беларусь
<https://orcid.org/0000-0003-4518-3480>*

ALTERNATIVE SOURCES OF PROTEIN AND MODERN METHODS OF THEIR EXTRACTION: A REVIEW OF THE SUBJECT FIELD

Burak L.,

*Doctor of Philosophy in Food Sciences (PhD), c. t. s.,
director of BELROSAKVA LLC, Republic of Belarus, Minsk
<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>*

Yegorova Z.,

*Belarusian State Technological University, Associate Professor,
Faculty of Technology of Organic Substances, Ph.D. in Engineering Minsk, Belarus
<https://orcid.org/0000-0001-8015-527X>*

Samankova N.

*Belarusian State University of Economics, Associate Professor of the Department of Commodity Science
and Expertise of Goods, PhD in Engineering Minsk, Belarus
<https://orcid.org/0000-0003-4518-3480>*

АННОТАЦИЯ

Глобальный спрос на белок постоянно растет, что способствует поиску и исследованиям новых источников белка, а также разработку передовых технологий их экстракции, способных преодолеть ограничения традиционных методов. Целью настоящего обзора является обобщение роли белка в устойчивых продовольственных системах, обсуждение новых альтернативных источников белка и методов их экстракции, с точки зрения устойчивости. Для исследования были использованы ключевые слова и словосочетания «животные и растительные белки», «новые методы экстракции белков» и «устойчивость белков». Поиск проводился в онлайн-базах данных Web of Science и Scopus. Для разработки настоящего обзора были отобраны релевантные публикации за период 2015–2024 годы, что позволило создать более полное представление о современных методах экстракции белков и их роли в повышении устойчивости продовольственной системы. Результаты исследований последнего десятилетия показывают, что использование ультразвуковой экстракции, экстракции с использованием импульсного электрического поля, ферментативной экстракции, субкритической водной экстракции и экстракции с использованием эвтектических растворителей особенно эффективно при работе с побочными продуктами агропромышленного комплекса. Эти методы позволяют оптимизировать извлечение белка, придерживаясь принципов экономики замкнутого цикла, благодаря минимизации отходов и рациональному использованию ресурсов. Таким образом, оценка устойчивости и практичности новых методов экстракции направлена на стимулирование будущих инноваций и формирование политических решений, способствуя созданию более устойчивой и надежной глобальной продовольственной системы.

ABSTRACT

The global demand for protein is constantly growing, which stimulates the search and research of new protein sources, as well as the development of advanced protein extraction technologies that can overcome the limitations of traditional methods. The aim of this review is to summarize the role of protein in sustainable food systems, discussing new alternative protein sources and their extraction methods from a sustainability perspective. The keywords and phrases “animal and plant proteins”, “new protein extraction methods” and “protein sustainability” were used for the study. The search was conducted in the online databases Web of Science and Scopus. Relevant publications for the period 2015–2024 were selected for the development of this review, which allowed us to create

a more comprehensive understanding of modern protein extraction methods and their role in improving the sustainability of the food system. Research results from the last decade show that the use of ultrasonic extraction, pulsed electric field extraction, enzymatic extraction, subcritical water extraction and eutectic solvent extraction are particularly effective when working with agro-industrial by-products. These methods allow optimizing protein recovery in a circular economy by minimizing waste and using resources efficiently. Therefore, assessing the sustainability and practicality of new extraction methods aims to stimulate future innovation and shape policy decisions, contributing to a more sustainable and resilient global food system.

Ключевые слова: белок, устойчивость, экстракция, ультразвук, импульсное электрическое поле, микроволны, отходы, окружающая среда.

Keywords: protein, stability, extraction, ultrasound, pulsed electric field, microwaves, waste, environment.

Введение

Растущий глобальный спрос на белок, обусловленный ростом населения и растущими потребностями в питании, требует инновационных и устойчивых решений. Принятие циклической экономики имеет решающее значение для достижения целей устойчивого развития (ЦУР), установленных Организацией Объединенных Наций в 2015 году. Эти цели охватывают широкий спектр неотложных проблем, включая изменение климата, устойчивость, продовольственную безопасность и поддержание планетарных границ. Устойчивые продовольственные системы определяются Продовольственной и сельскохозяйственной организацией как те, которые обеспечивают питание и продовольственную безопасность для всех, гарантируя, что окружающая среда, общество и экономика не будут поставлены под угрозу для будущих поколений. Белок играет жизненно важную роль в устойчивых продовольственных системах, поскольку он вносит вклад в основные питательные вещества, поддерживает здоровье человека и предлагает потенциальные альтернативы источникам животного белка. Кроме того, белок из устойчивых источников, таких как овощи, насекомые, водоросли и микроорганизмы, может снизить воздействие производства продуктов питания на окружающую среду за счет минимизации выбросов парниковых газов, сокращения водо- и землепользования, а также уменьшения обезлесения и опустынивания [1]. Кроме того, включение растительных белков в рацион может помочь решить проблемы, связанные с изменением климата и утратой биоразнообразия [2]. Поощряя потребление белка из устойчивых источников, можно снизить спрос на животные белки и связанное с ними воздействие на окружающую среду. Устойчивые источники белка имеют первостепенное значение в связи с прогнозируемым ростом населения мира, которое, как ожидается, достигнет 9,7 млрд человек к 2050 году [3]. Рост населения вызвал беспокойство по поводу дефицита продовольствия и необходимости альтернативных источников белка [4]. Как следствие, наблюдается всплеск интереса к устойчивым и недорогим источникам белка, включая пищевые отходы, водоросли и микроорганизмы, такие как грибы, дрожжи и бактерии. Эти альтернативные белки предлагают потенциал для сокращения использования сельскохозяйственных земель, вырубки лесов и связанных с этим выбросов CO₂. Разработка устойчивых источников белка имеет решающее значение для удовлетворения глобального спроса на продовольствие,

экологической устойчивости и здоровья человека [5-6]. Кроме того, белок также играет важную роль в устойчивых продовольственных системах, обеспечивая необходимые питательные вещества, поддерживая здоровье человека и предлагая альтернативы источникам животного белка. Кроме того, включение белка из устойчивых источников может помочь решить проблемы, связанные с изменением климата, и поддержать достижение ЦУР [7]. Несколько примеров, которые считаются новыми и устойчивыми источниками белка, — это бобовые (включая фасоль, чечевицу и горох), микроводоросли, грибы (например, микопротеины), насекомые и некоторые злаки, и этот переход к нетрадиционным белкам полезен для социальных, экономических и экологических факторов. Микробная биомасса, которая может быть создана устойчивым образом с помощью процессов ферментации с использованием недоиспользуемого органического сырья (например, остатков агропродовольственного сектора) для роста отдельных микроорганизмов и микробных консорциумов, является возможным источником функциональных молекул. В отличие от земледелия и животноводства, микроорганизмы быстро развиваются и выращиваются под контролем биологических реакторов, что исключает необходимость в пахотных землях. Кроме того, предлагаются адаптивность, минимальное воздействие на окружающую среду и конкурентный синтез микробных и растительных белков [8]. Сокращение пищевых отходов во всем мире может значительно повысить экологическую устойчивость производства продуктов питания, а также имеет важное значение для достижения ЦУР «нулевого голода», установленной ООН. Согласно Цели 12.3 ЦУР, к 2030 году мировое количество пищевых отходов, производимых на человека по всей цепочке поставок продовольствия, должно быть сокращено вдвое [9]. Хотя концепция использования пищевых отходов или агропромышленных отходов не нова, внимание к устойчивым и альтернативным источникам белка для продуктов питания и кормов возросло из-за растущей обеспокоенности по поводу дефицита питательных веществ, продовольственной безопасности, хронического голода и устойчивости. Были предприняты попытки извлечь и использовать белок из пищевых отходов, но эти усилия в значительной степени остаются недоиспользованными. Согласно текущему анализу, извлечение белка из агропромышленных побочных продуктов является многогранной и сложной проблемой, которая требует более комплексных и

надежных методов экстракции и обработки [10]. Применялись традиционные методы экстракции белка, в которых используются традиционные органические растворители, такие как ацетонитрил, гексан, ацетон, этанол, метанол и т. д. Хотя эти традиционные органические растворители недороги и просты в обращении, существует значительная обеспокоенность возможным загрязнением окружающей среды [11]. Кроме того, традиционные технологии экстракции белка, такие как щелочная экстракция, изоэлектрическое осаждение, экстракция на основе соли, ультрафильтрация/диализация и технологии сухого фракционирования, имеют ограничения. Эти ограничения включают недостаточные выходы экстракции, изменение нефункциональных свойств белка, низкую стабильность, ухудшение пищевой ценности, нежелательные изменения цвета и значительное образование сточных вод, что может привести к экологической опасности [12]. Следовательно, существует острая необходимость в использовании экологически чистых и новых технологий экстракции, которые могут преодолеть технологические и научные ограничения традиционных методов экстракции белка. Целью настоящего обзора является обобщение роли белка в устойчивых продовольственных системах, обсуждение новых альтернативных источников белка и современных методов экстракции с точки зрения устойчивости. Данный обзор также охватывает применение агропромышленных побочных продуктов для восстановления белка с использованием инновационных методов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования был проведен научный поиск с использованием ключевых слов «животные и растительные белки», «новые методы экстракции белков» и «устойчивость белков». Поиск проводился в онлайн-базах данных Web of Science и Scopus. Результаты поиска показали, что за период с 2000 года по июнь 2024 года в Web of Science и Scopus было опубликовано 307 и 403 публикации соответственно, которые соответствовали теме данного исследования. Для отбора научных статей на русском языке провели поиск, по ключевым словам, в «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». Ранее опубликованные обзорные статьи, охватывающие различные аспекты новых источников белка и методов их экстракции, не предоставляли всеобъемлющего понимания методологии устойчивой экстракции белков. Основной акцент публикаций был на анализе текущих и перспективных направлений исследований в области белков не животного происхождения и их применений, особенно в контексте функциональных и питательных характеристик. Также рассматривались технологические вызовы и возможности, связанные с экстракцией белков из новых источников, таких как растения, водоросли, грибы и насекомые. Для разработки настоящего обзора были отобраны самые последние и релевантные публикации, что позволило создать более полное представление о современных методах экстракции белков и их роли

в повышении устойчивости продовольственной систем. Подход к отбору публикаций был направлен на выявление наиболее инновационных и устойчивых методов экстракции белков, а также на оценку их практического применения и влияния на устойчивость продовольственной системы. В качестве материалов для исследования отобрано 90 научных публикаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

1. Обзор традиционных источников животного и растительного белка

Рацион питания обеспечивает нас белком в виде цельных продуктов (сырых, приготовленных или обработанных) или готовых блюд, содержащих фракционированные белковые компоненты животного или растительного происхождения. Считают, что растительные белки имеют более низкую пищевую ценность, чем животные белки [13], но оказывают меньшее воздействие на окружающую среду по сравнению с животными белками [14,15]. Например, по данным Sabaté и соавторов для получения 1 кг белка из фасоли потребовалось примерно в 10 раз меньше пестицидов и воды, в 12 раз меньше удобрений, в восемнадцать раз меньше земельной площади и в девять раз меньше топлива, чем из говядины [16]. Пищевая ценность белка может быть оценена с помощью его аминокислотного индекса, скорректированного по усвояемости белка, то есть PDCAAS (Protein digestibility-corrected amino acid score). PDCAAS — это показатель качества белка, который измеряет его способность удовлетворять потребность человека в аминокислотах. Все источники животного белка, включая изолят молочного белка, казеин и обезжиренное молоко, имеют PDCAAS 1 или выше [17]. Растительные белки в основном имеют меньше PDCAAS по сравнению с животными источниками, такими как мясо и молочные продукты. Это связано с тем, что растительные белки хуже усваиваются и в составе не всегда присутствуют аминокислоты. Однако есть исключение — изолят соевого белка, у которого PDCAAS составляет от 0,92 до 1,00, что по качеству ставит его на один уровень с некоторыми источниками животного белка. Ученые Shevkani и другие предположили, что бобовые белки могут быть сопоставимы с животными белками в спортивном питании, потенциально улучшая спортивные результаты и выступая в качестве альтернативы красному и обработанному мясу в качестве источников белка [18].

1.1. Животные белки и их влияние на окружающую среду

Высококачественный белок содержится в мясе, яйцах и молоке, при этом яичный белок часто рассматривается как полноценный белок из-за его незаменимого аминокислотного профиля по сравнению с другими продуктами питания. Мясо содержит около 20–22 % белка, при этом содержание белка в курице, свинине и говядине составляет 22,5–23,4 %, 19,9–23,1 % и 19,6–21,6 % соответственно [19]. Мясо содержит все незаменимые аминокислоты, необходимые для роста и поддержания.

Основными аминокислотами, обнаруженными в говядине, были лизин, глутаминовая кислота и лейцин [20]. Многочисленные антиоксидантные пептиды были обнаружены в белках, полученных из мяса. В частности, карнозин (b-аланил-L-гистидин) и ансерин (Nb-аланил-1-метил-L-гистидин) были наиболее известными пептидами, обнаруженными в мясе. Помимо этого, оно также содержит минералы, такие как цинк, селен, железо, и витамины, такие как витамин D, B₁₂, B₆. Мясо содержит железо в форме гема, которое эффективно усваивается [21]. Молоко содержит 3–7 % белка в зависимости от типа животного [22]. Сывороточные и казеиновые белки составляют приблизительно 20 % и 80 % соответственно от общего содержания белка в коровьем молоке. По сравнению с казеином, сывороточные белки содержат больше незаменимых аминокислот, особенно аминокислот с разветвленной цепью (ВСАА) и серосодержащих аминокислот [23]. Помимо этого, молочные белки обладают антиоксидантным, антимикробным и высоким антиканцерогенным потенциалом [24]. Глутамат, пролин, лейцин, лизин и валин составляют половину всех аминокислот в молоке и сыре [21]. Одно яйцо содержит 6,3 г белка, распределенного между желтком и белком. Желток обеспечивает 2,7 г белка, в то время как белок содержит 3,6 г/ Концентрация ВСАА в белке яичного белка сопоставима с концентрацией в молочном белке, и он содержит больше серосодержащих аминокислот, чем другие источники белка. При аминокислотном индексе 100, как утверждается, белок яичного белка имеет более высокую чистую утилизацию белка, чем белок молочной сыворотки [25]. Яйца богаты кальцием и фосфором, а также витаминами группы B, такими как B₁₂. Они также содержат ретинол, каротиноиды и токоферолы, холекальциферол и витамин K [26,27].

Ожидается, что мясная промышленность к 2050 году увеличит производство на 50–73%, чтобы обеспечить мясными продуктами 9 миллиардов человек в мире [28]. Производство мяса является высокоинтенсивной и неустойчивой деятельностью, которая ухудшает окружающую среду планеты, приводя к вырубке лесов, загрязнению, негативному влиянию на все гидрогеологические резервы и исчезновению биоразнообразия [29]. Результаты исследования Scarborough et al. показали, что употребление пищи, богатой различными видами мяса и мясных продуктов, коррелирует с более чем в два раза большим количеством выбросов в эквиваленте диоксида углерода, то есть 7,19 кг эквивалента CO₂ в день, чем веганство, то есть 2,89 кг эквивалента CO₂ в день [30,31].

1.2. Растительные белки

Растительные белки для потребления человеком в основном получают из зерновых (пшеница и злаковые), бобовых (соевый и гороховый белок), орехов и масличных семян. Согласно результатов многих исследований в составе растительных белков могут отсутствовать некоторые важные аминокислоты. Например, в злаках уровень лизина ниже,

а в бобовых отсутствуют серосодержащие аминокислоты, такие как метионин и цистеин [32]. Зерновые культуры и мука, приготовленная из них, имеют белковый состав от 6% до 15% что, как правило, ниже, чем в рационах животных белков в пересчете на сухое вещество [33]. Пшеничный белок был разделен на четыре фракции: альбумины, глобулины, глиадины и глютеинин. Глютеинин и проламины считаются запасными белками, в то время как глобулины и альбумины включают метаболические и защитные белки, такие как ферменты и ингибиторы ферментов [34]. Пшеничные отруби богаты белками высокого качества, с содержанием более 15%. Однако из-за их инкапсуляции в полисахариды клеточной стенки эти белки нелегко перевариваются. В результате ежегодно теряется около 15,5 миллионов тонн ценного белка [34]. Основным источником растительных белков является соя, которая потребляется многими различными цивилизациями по всему миру из-за ее высокого содержания белка и адаптивности при создании кулинарных продуктов [16]. Это высококачественный белок с (PDCAAS 1,00), который сопоставим с некоторыми животными белками, такими как мясо и молочные продукты. Соевый белок состоит из двух основных групп белков: альбуминов, которые растворимы в воде, и глобулинов, которые растворимы в соли. Преобладающим типом белка в сое является глобулин [35]. Соевые белки содержат аспарагиновую кислоту, аргинин, лейцин и лизин, но мало цистина, триптофана и метионина [36].

Содержание белка в горохе варьируется в зависимости от генотипа и условий роста, но обычно составляет около 25%. Компоненты горохового белка обладают хорошей способностью связывать воду и жир, а также эмульгирующими свойствами и могут использоваться в качестве наполнителя в эмульгированных мясных продуктах. Гороховый белок имеет сбалансированный аминокислотный состав, особенно богатый лизином [37]. Белковый состав орехов значительно различается [32]. Жмых или мука из подсолнечника или канолы, которые были экстрагированы растворителем, содержат от 45% до 65% белка, в зависимости от исходного материала и условий обработки [38].

2. Новые источники белка

2.1. Белок насекомых

Насекомые получают признание как перспективный источник пищи из-за их значительной пищевой ценности. Белок насекомых, также называемый энтомофагией, подразумевает потребление насекомых в качестве источника пищи [39]. Он питателен, устойчив и предлагает альтернативу традиционным источникам белка. Насекомые богаты белком, витаминами и минералами, их можно есть целиком или перерабатывать в различные пищевые продукты. Результаты исследования de Castro et al. показывают, что пептиды насекомых являются потенциальными антигипертензивными, противомикробными и антиоксидантными агентами, что подтверждает полезность этих белков [40]. Исследования показали, что гидролизаты белков насекомых

обладают биоактивными характеристиками, такими как противовоспалительное, антигипертензивное, антидиабетическое и антиоксидантное действие [41]. Ингибиторы липоксигеназы и циклооксигеназы проявляют противовоспалительные свойства. В исследовании Yoon *et al.* [42] был проведен сравнительный анализ белков трех съедобных насекомых. Этими насекомыми были куколки *Bombux mori* (шелкопряд), *Gryllus bimaculatus* (сверчок) и *Tenebrio molitor* (мучной червь). Используя коммерческие ферменты (Flavourzyme: 12% и Alcalase: 3%), белки из съедобных насекомых были извлечены, и их гидролизаты были приготовлены ферментативным гидролизом. Способность гидролизатов насекомых уменьшать воспаление была оценена путем измерения количества оксида азота, вырабатываемого макрофагами. Согласно результатам, куколка *B. mori* проявила значительную противовоспалительную активность. Кроме того, противовоспалительную активность целых гидролизатов насекомых, полученных путем переваривания *in vitro*, можно увеличить с помощью методов тепловой обработки, таких как кипячение и выпекание. *T. molitor*, *G. sigillatus* и *S. gregaria* продемонстрировали заметное увеличение ингибирования липоксигеназы и циклооксигеназы-2 после тепловой обработки [43]. Гидролизат, полученный из тропических полосатых сверчков (*Grylloides sigillatus*) гидролизованый с помощью алкалазы, обладал противовоспалительными свойствами. Гидролизаты белка из *G. sigillatus* проявили ингибирующую активность в отношении липоксигеназы и циклооксигеназы [43].

2.2. Белок водорослей

Водоросли являются высокопитательным и устойчивым источником полноценных белков, содержащих все незаменимые аминокислоты. Белки водорослей также могут обеспечивать биоактивные пептиды и другие белковые соединения со значительной пользой для здоровья. Эти соединения проявляют ряд полезных свойств, включая антипролиферативные, антиоксидантные, противовоспалительные, антидиабетические, антигипертензивные, антиатеросклеротические, антикоагулянтные и антимикробные свойства [44]. Проведены исследования антиоксидантной активности морских макроводорослей и микроводорослей, используя различные методы, включая анализ DPPH (1,1-дифенил-2-пикрилгидразила), улавливание гидроксильных радикалов, улавливание перекиси водорода и улавливание супероксидного аниона. На содержание белка в микроводорослях могут влиять такие факторы, как интенсивность и качество света, поступление азота, концентрация минералов, климат и возраст клеток [44]. Водорослевая биомасса является перспективной альтернативой наземной биомассе, предлагая ряд преимуществ, таких как более высокая скорость роста, низкое потребление воды, отсутствие конкуренции за пахотные земли, углеродно-нейтральные выбросы и производство многочисленных биоактивных соединений [44]. В настоящее время широко распространено использование водорослевой биомассы при разработке

различных пищевых продуктов. Водорослевая биомасса добавляется в различные хлебобулочные изделия, включая печенье, хлеб, бисквиты и хлебные палочки, для повышения их пищевой ценности [44]. Bhatnagar *et al.* установили, что включение водорослевой биомассы в йогурт создает благоприятную среду для микроорганизмов, поскольку она обеспечивает различные питательные вещества, необходимые для жизнеспособности и роста пробиотических бактерий [45]. Помимо улучшения функциональных свойств пищи, красные водоросли и сине-зеленые виды являются заметными источниками натуральных красителей для пищевой промышленности. Пигменты, такие как фикоцианины и каротиноиды, обнаруженные в этих водорослях, делают их многообещающей альтернативой синтетическим красителям, обычно используемым в индустрии напитков, которые могут иметь долгосрочные побочные эффекты для потребителей [44,46].

2.3. Мясо, выращенное в лабораторных условиях

Выращенное в лаборатории мясо является альтернативой белкам животного происхождения, которая может значительно сократить участие животных в производстве продуктов животного происхождения [47]. Процесс производства выращенного в лаборатории мяса включает культивирование мышечных стволовых клеток в коллагеновой матрице, полученной от живых или умерших животных, и снабжение их запасами энергии, необходимыми для пролиферации и дифференциации в полоски скелетной мышечной ткани. Чтобы улучшить вкус, текстуру и мягкость натурального мяса, жировые клетки должны быть совместно культивированы. Развитие мышечной ткани происходит исключительно без потребности в других биологических компонентах, таких как пищеварительная, нервная или дыхательная системы, кости, жир или кожа, поэтому количество жизненно важных питательных веществ и энергии минимально. Целью выращенных в лаборатории мясных продуктов является воспроизведение вкуса и питательных качеств традиционного мяса. Традиционно клетки млекопитающих использовались для разработки лабораторного мяса, но это довольно дорого и требует строгих этических норм, поэтому лабораторное мясо насекомых становится новой областью, поскольку насекомые имеют сравнительно более простую генетический состав, чем клетки млекопитающих, поэтому их легче культивировать и генетическую модификацию [48]. Черви *Spodoptera frugiperda* полезны для биотехнологических и медицинских применений, поскольку они особенно подходят для создания рекомбинантных белков [49]. Гладкие мышечные клетки коров использовались для создания модели культивируемого мяса. Основным фактором роста фибробластов был добавлен в среду для ускорения скорости развития, что значительно усилило экспрессию белков внеклеточного матрикса, таких как коллаген. Модели, созданные с использованием коллагенового гидрогеля, показали улучшение текстуры культивируемой плоти [50]. Сравнение ами-

нокислотного состава было проведено для традиционного мяса и культивируемых мясных тканей с использованием сателлитных клеток кур и крупного рогатого скота. Было установлено, что культивируемые мясные клетки имеют более низкое содержание глутаминовой и аспарагиновой кислоты, чем традиционное мясо. Состав питательной среды также влияет на характеристики выращенного в лаборатории или культивируемого мяса [51].

2.4. Заменители мяса на растительной основе

Мясо на растительной основе описывается как продукты, содержащие ингредиенты растительного происхождения с характеристиками, точно такими же, как у мяса животного происхождения, и неотличимыми от их эквивалентов на животной основе. Их также называют аналогами мяса или имитацией мяса. Разработка аналога мяса на растительной основе в основном включает два этапа. Первый этап — это приготовление эмульсии путем смешивания белков, жиров и солей и т. д. с последующим нагреванием под давлением, в результате чего образуется матрица. Второй этап — формирование кусков путем экструзионной обработки [52]. С ростом осведомленности, связанной с проблемами окружающей среды и здоровья, наблюдается рост вегетарианской диеты, и спрос на источники растительного белка увеличивается. Тофу и темпе — широко потребляемые заменители мяса на основе сои. Текстурированный растительный белок (TVP) является одним из аналогов мяса, который широко используется в качестве источника белка и обеспечивает ощущение во рту, похожее на мясо животных. Существует несколько функциональных свойств белка, которые важны для формирования структуры аналогов мяса. К этим свойствам относятся способность удерживать масло и воду, растворимость, пенообразующая способность, эмульгирующие свойства и свойства гелеобразования [53]. Пшеничный глютен естественным образом образует тонкие белковые пленки при растяжении, которые легко могут быть преобразованы в волокнистые белковые материалы. Эти свойства обусловлены его молекулярными характеристиками и полученным мезоскопическим поведением [54]. По сравнению с мясом, заменители мяса на растительной основе оказывают меньшее воздействие на окружающую среду. Если учитывать расход воды для производства белка, то для бобовых требуется 18,9 литров воды на каждый грамм белка, тогда как для говядины требуется 111,67 литров [55].

3. Извлечение белка из побочных продуктов агропромышленного производства с использованием новых технологий

3.1. Ультразвуковая экстракция

Результаты извлечение белка из различных продуктов с помощью ультразвуковой экстракции (УЗЭ), подробно описанное в опубликованной литературе, кратко представлено в Таблице 1. Традиционный метод экстракции белка требовал большого количества растворителя и давал низкое содержание белка [56]. Также было установлено, что кавитационные силы создаются ультразвуковыми

волнами в жидкой среде, что позволяет растворителю легче проникать в клеточный материал с большей проникающей способностью, что увеличивает массоперенос между молекулами белка и окружающим растворителем и улучшает высвобождение содержимого клетки в объемную среду. Преимущества использования УЗЭ заключаются в меньшем времени экстракции, уменьшенном использовании растворителя, повышенном выходе, меньшем потреблении энергии, нетермической природе и сохранении чувствительных к теплу молекул [57]. Кроме того, белки, извлеченные с помощью ультразвука, обладают улучшенными технико-функциональными свойствами, такими как растворимость, гидрофобность, вязкость, желатинизация и пенообразование [58]. Для справки, Yeasmin et al. [59] изучали извлечение белковых и антиоксидантных соединений с помощью ультразвуковой обработки из красной фасоли худшего размера, которая была отбракована во время сортировки по размеру для дальнейшей обработки. Максимальное извлечение белка, то есть 67,76%, было отмечено после 15 минут обработки ультразвуком при 450 Вт. Более высокая мощность ультразвука (450 Вт) и продолжительность (15 мин) значительно увеличили растворимость, эмульгирование, пенообразование, общее содержание фенолов, усвояемость белков *in vitro*, антиоксидантную способность снижения содержания железа и свойства активности по улавливанию радикалов DPPH экстракта белков красной фасоли из-за кавитационного эффекта ультразвука и высокой сдвиговой механической энергии. Gadalkar и Rathod [60] извлекли белок из семян арбуза методом УЗЭ и оценили функциональные свойства белка семян арбуза. Оптимизированными характеристиками для извлечения белка методом УЗЭ были температура около 30 °C, частота 25 кГц, соотношение порошка семян арбуза к растворителю (деионизированная вода) 1:50 (мас./об.), pH 9 и рабочий цикл 75%. Анализ аминокислотного состава белка семян арбуза показал, что он содержит все незаменимые аминокислоты в необходимом количестве для взрослых в соответствии с рекомендациями ФАО/ВОЗ. Исследование также сравнило ультразвуковую экстракцию белка с традиционным методом экстракции. Было обнаружено, что 87% белка извлекается с помощью ультразвука по сравнению с 75% при использовании традиционного метода экстракции с перемешиванием, при котором 3 г обезжиренного порошка семян арбуза смешивали с 70 мл деионизированной воды в стеклянном реакторе объемом 100 мл и перемешивали при 400 об./мин в течение 2 ч при комнатной температуре. Затем суспензию образца центрифугировали и анализировали методом Брэдфорда на наличие белка. Кроме того, применение ультразвука привело к снижению количества необходимого растворителя на 20%. Основным преимуществом УЗЭ является время экстракции, которое составило 9 мин по сравнению с обычной экстракцией, при которой время экстракции составляло 120 мин. Также было обнаружено, что функциональные характеристики, такие как способность удерживать воду и масло,

способность к пенообразованию и свойство гелеобразования, у белков, экстрагированных ультразвуком, были лучше, чем у белков, экстрагированных традиционным способом. Следует отметить, что важно оптимизировать параметры процесса экстракции для каждого конкретного соединения и

матрицы, поскольку взаимодействия между анализами и матрицами могут значительно различаться, что приводит к различным показателям извлечения [58]

Таблица 1. Обзор результатов опубликованных исследований восстановления белков различными методами экстракции

Таблица 1

Обзор результатов опубликованных исследований извлечения белков различными методами экстракции

| Метод извлечения | Источник белка | Параметры процесса | Полученные результаты Исследования | Источник |
|------------------|---|---|---|----------|
| Ультразвуковой | Подсолнечный шрот (побочный продукт извлечения масла) | Плотность мощности - 220 Вт/л, время экстракции - 15 мин., температура- 45°C | Выход белка составил приблизительно 54%. Белковые изоляты из подсолнечного шрота имели удовлетворительные МПС, РБ, СЭ и ВУС | [61] |
| | Обезжиренные рисовые отруби | время- 2 мин. Мощность ультразвука - 15 Вт г ⁻¹ температура- 30°C. Дальнейшая экстракция проводилась при 200 об/мин, 30°C в течение 58 мин. | Извлечение белка составило приблизительно 64,5%. Улучшенный РБ. Это уменьшило ПС и ГС | [62] |
| | Отходы семян томатов | Продолжительность ультразвука - 2 мин 18 с. Соотношение жидкости и твердого вещества - 52 мл г ⁻¹ Продолжительность экстракции - 60 мин. | Выход белка составил около 35% | [63] |
| | Листья цветной капусты | Соотношение жидкости и твердого вещества - 4 мл г ⁻¹ , используемый растворитель - дистиллированная вода, рН-11, продолжительность ультразвука - 15 мин., мощность- 175 Вт | Выход белка составил приблизительно 53%. | [64] |
| | Рапсовый шрот | Мощность ультразвука - 451 Вт, время ультразвуковой обработки - 84 мин., Т- 35°C, соотношение твердого вещества и жидкости - 1:24, растворитель: вода | Эффективность экстракции составила около 76%. Содержание белка увеличилось примерно на 8% | [65] |
| | Отходы гранатовых косточек | Амплитуда- 20%. Время экстракции - 5 мин. | Извлечение белка составило приблизительно 10,2%. Выход белка увеличился на 50% при использовании HIFU | [66] |
| | Спирулина | Давление- 2 бара. Температура- 24°C. Интенсивность ультразвука - 55 Вт см ⁻² | 229% увеличение восстановления белка | [67] |
| | Свиная печень | Мощность ультразвука - 265 Вт. Ультразвуковое время - 42 мин. Концентрация NaOH - 0,80%. Температура- 50°C. Соотношение вода/сырье - 70 | Концентрация аминокислот, таких как аргинин, пролин, серин, фенилаланин и лизин | [68] |
| | Личинки <i>Tenebrio molitor</i> | Продолжительность: 30 мин. Мощность ультразвука: 4 Вт/см ³ Частота 28 кГц, Температура 25°C | Выход белка составил около 60%. | [69] |

| | | | | |
|--|---|---|--|------|
| Экстракция с помощью микроволн | Белок микроводорослей <i>Chorella vulgaris</i> | Рабочий цикл микроволн - 80%. Концентрация биомассы микроводорослей - 0,5% по массе. Время работы микроволн - 120 сек. Концентрация сульфата аммония-30%. Мощность микроволн - 100 Вт. Соотношение суспензии к t-бутанолу - 1:1 | Выход белка микроводорослей составил приблизительно 63%, а эффективность разделения – приблизительно 67%. | [70] |
| | Соевое молоко | T- 80 °С. Скорость перемешивания - 160 об/мин. Уровень мощности - 675 Вт | Содержание белка и выход экстракции были примерно на 24% и 44% выше соответственно по сравнению с методом паровой инфузии. | [71] |
| | Семена арбуза | Мощность микроволн - 50 Вт. Время СВЧ-облучения - 2 мин. Соотношение твердого вещества и растворителя (вода) - 1:30, pH-10 | Восстановление белка составило приблизительно 90%. Метод МВЭ сопоставим с методом УЗЭ и имеет лучшие функциональные свойства, чем традиционный метод экстракции. | [72] |
| Ультразвуковая и микроволновая экстракция (УЗМЭ) | Моринга масличная (<i>Moringa oleifera</i>) | Температура экстракции - 41°C, мощность микроволн - 81 Вт, время экстракции - 148 с. Соотношение растворителя и твердого вещества - 91:1 (об./мас.) Используемый растворитель — буфер Трис-НСl. | Выход белка составил приблизительно 82 мг г ⁻¹ | [73] |
| Импульсное электрическое поле | Листья крапивы | Напряженность электрического поля - 3 кВ см ⁻¹ Соотношение воды и твердого вещества - 1:15. Удельная энергия - от 10 до 24 кДж кг ⁻¹ температура- 70–78°C, время экстракции - 5 мин. | Выход белка составил более 60% | [74] |
| | Пивоваренные дрожжи отходы | Напряженность электрического поля - 10 кВ см ⁻¹ Соотношение деионизированной воды и сырья - 50:1, длительность импульса - 8 | Выход белка достигает примерно 2,78%. | [75] |
| | <i>Arthrospira platensis</i> (Спирулина платенсис) | Уровень энергии - 56 и 112 Дж мл ⁻¹ Инкубационный период - 6 ч., T-25°C | Выход белка: 74–105% | [76] |
| | <i>Haematococcus pluvialis</i> (зеленые микроводоросли) | Напряженность поля – 1 кВ см ⁻¹ Длительность импульса - 2 мс | Выход белка: 46% | [77] |
| | Отходы куриной грудки | Напряжение - 200 В, 500 В, 1000 В. Длительность импульса - 50 мкс, 1 мс, 5 мс. Количество импульсов - 100, 50 | Содержание белка: 78 мг/ мл | [78] |

| | | | | |
|--------------------------------|--|--|--|------|
| Извлечение субкритической воды | Обезжиренные рисовые отруби | T -250°C , P- 7 МПа , время- 60 мин. | Выход экстракции составил 100%. | [79] |
| | Тыквенные, льняные и молотые жмыхи из конопли | Повышение давления - 99,999% N ₂ или CO ₂ до 2,0 МПа. Время - 1 час. Температура- 160°C Соотношение образца и воды - 1:30 | Выход белка из семян тыквы – около 60%. Выход белка из семян конопли около 40% Выход белка из семян льна около 53% | [80] |
| | Бурые морские водоросли; <i>Saccharina japonica</i> | Температура- 180–420°C. P - 1,3 и 52 МПа | Выход: 71–98% | [81] |
| | Остаточные промышленные твердые частицы, оставшиеся после экстракции <i>Gelidium sesquipedale</i> на агаре | Температура- 185°C. Скорость потока - 2 мл мин ⁻¹ | Содержание белка: 70% | [82] |

Обозначения: T- температура; P- давление; СЭ — стабильность эмульсии; ПС— пенообразующая способность; ГС — гелеобразующая способность; МПС — маслопоглощающая способность; РБ — растворимость белка; ВУС — водоудерживающая способность.

3.2. Экстракция с помощью микроволн

Эффективным методом чистой экстракции для получения биоактивных соединений из растительных матриц является микроволновая экстракция (МВЭ) [44]. Результаты исследований извлечения белка методами МВЭ из различных продуктов кратко представлено в таблице 1. Молекулы воды *in-situ* нагреваются микроволновым излучением, что повышает давление внутри клеток. Данное повышение давления способствует разрушению клеточной стенки, что быстро и эффективно высвобождает компоненты в окружающий растворитель [83]. Инактивация ферментов, солибилизация полисахаридов клеточной стенки и улучшение качества питательных веществ - вот лишь некоторые примеры использования микроволновой экстракции. Объем (соотношение твердого вещества и растворителя), тип растворителя, структура матрицы (толщина клеточной стенки), время микроволновой обработки, температура и давление — вот некоторые внутренние и внешние факторы, которые влияют на процесс МВЭ [83]. Bedin et al . [84] исследовали использование микроволновой энергии для извлечения белков из рисовых отрубей, и установили превосходство этого метода над традиционной щелочной экстракцией. Сравнивая МВЭ со щелочной экстракцией, было установлено, что МВЭ является эффективным и экологически чистым методом извлечения белка из рисовых отрубей. МВЭ в тридцать раз быстрее, чем традиционный метод, достиг максимального извлечения белка, а выход экстракции был на 6,19% и 22,04% выше (содержание белка: 79,98% и выход: 15,68%), чем (содержание белка: 75,32% и выход: 12,85% за 60 мин) в традиционном методе. Поскольку состав аммиака, электрофоретический профиль, усвояемость белка и растворимость белков МВЭ были в значительной степени идентичны таковым при щелочной экстракции, характеристика белков продемонстриро-

вала, что использование микроволн не оказало неблагоприятного воздействия на их свойства. Поэтому можно предполагать что МВЭ является высокоэффективным и рекомендуемым методом получения белка из рисовых отрубей. Использование МВЭ в сочетании с другими методами, как оказалось, увеличивает скорость извлечения белка из растительных источников. В работе Ochoa-Rivas et al . белок был извлечен из обезжиренной арахисовой муки, полученной из масличных семян [85]. Было получено на 77% больше белка по сравнению с методом без использования микроволн. Установлено, что технико-функциональные свойства извлеченных белков были лучше, такие как активность пены, индекс абсорбции жира, эмульгирующая активность, индекс абсорбции воды и усвояемость белка *in vitro*. Основное препятствие, возникающее при масштабировании МВЭ для белков, полученных из растений, связано с термическим воздействием, вызванным механизмом обратного переноса тепла микроволновым излучением, что приводит к нежелательным изменениям в структуре [86]

3.3. Импульсное электрическое поле

Одним из современных, нетермических, экологически чистых технологий является импульсное электрическое поле (ИЭП) [87,88]. Продукты, расположенные между электродами в камере, обрабатываются путем применения электрических волн высокой амплитуды напряжения или электрических импульсов длительностью от микросекунд до миллисекунд [87,88]. ИЭП может приводить к электропермеабилитации (20–80 кВ см⁻¹ в непрерывном режиме) или электропорации (100–300 В см⁻¹ в периодическом режиме) в зависимости от приложенного напряжения. В первом случае клеточная стенка целевого вещества разрушается импульсами высоковольтного электрического поля. Это усиливает массоперенос из сырья, опосредованный через открытые каналы, способствуя извлечению белка.

Электропермеабиллизация увеличивает растворимость ингредиентов, стимулируя химические реакции между ингредиентами и растворителями. В целом, высокий и колебательный резонанс, создаваемый сильным электрическим полем, является тем, что вызывает электропермеабиллизацию [87,89]. Параметры процесса, которые влияют на эффективность ИЭП, включают частоту импульсов, силу электрического поля (kV cm^{-1}), ширину импульса, форму волны и продолжительность воздействия (которая связана с объемом жидкости и скоростью потока в электродной камере) [87,88]. С помощью обработки ИЭП клеточные мембраны могут быть физически разрушены без использования тепла или других методов, которые изменяют структуру и функцию белков [87]. Для извлечения белков из стеблей и листьев рапса обработка проводилась с использованием слабого (800 V cm^{-1} в течение 200 мс) и высокого напряжения (20 kV cm^{-1} и 5 kV cm^{-1} в течение двух миллисекунд) в электрическом поле при 20°C . Вывод исследования состоял в том, что единственным способом увеличения количества белков, извлекаемых из листьев рапса (примерно до 80%), было применение сильного электрического поля (20 kV). Кроме того, также был сделан вывод, что отрасли по производству кормов для животных технология ИЭП может повысить питательную ценность стеблей и листьев рапса [87,73]. Метод ИЭП также применялся для извлечения белков из водорослей. Например, Поликовский и соавторы извлекли белок из макроводоросли *ulva*. Согласно исследованию, наибольшая скорость извлечения белка, приблизительно $53,8 \text{ мкг мл}^{-1}$, может быть достигнута путем обработки макроводорослей $2,3 \text{ мкс}$ с помощью ИЭП из 50 импульсов при напряженности поля 26 kV cm^{-1} . Более того, обработка ИЭП эффективна предотвращала высвобождение кальмодулина, который классифицируется как тип аллергена [90]. Основным недостатком импульсного электрического поля является высокая первоначальная стоимость оборудования, которая требует значительных финансовых затрат [83,88].

Заключение

Рост населения планеты, нехватка продовольствия вызывает необходимость поиска альтернативных устойчивых источниках белка и экологически чистых технологий его извлечения. Обзор научных исследований показал, что белок насекомых, выращенное в лаборатории мясо, белок водорослей и заменители мяса на растительной основе являются эффективной альтернативой белкам животного происхождения. Эти источники предлагают такие преимущества, как сокращение выбросов парниковых газов, снижение водо- и землепользования, а также жизненно важное снабжение питательными веществами, что решает проблемы продовольственной безопасности и экологической устойчивости по сравнению с традиционными источниками белка. Современные методы экстракции, такие как ультразвуковая экстракция, субкритическая водная экстракция, экстракция импульсным электрическим полем и микроволновая

экстракция способствуют максимальному извлечению белка, особенно из побочных продуктов агропромышленного комплекса. Эти методы оптимизируют выход белка, минимизируя отходы и воздействие на окружающую среду, поддерживая принципы экономики замкнутого цикла. Несмотря на значительный масштаб проводимых исследований, эти технологии выполнены в основном в лабораторных масштабах, и широкого промышленного внедрения не имеют. Масштабируемость, экономическая эффективность, а также осведомленность и принятие потребителями альтернативных белков имеют решающее значение для их промышленного производства и реализации. Удовлетворение растущего спроса на белок на устойчивой основе требует разработки и внедрения этих источников белка и технологий экстракции. Следует также отметить, что решающими факторами широкого использования устойчивых источников белка являются осведомленность потребителей о влиянии производства мяса на окружающую среду и принятие ими белков, полученных из альтернативных источников.

Литература

1. Munialo, C.D. An exploration of alternative proteins as a potential sustainable solution to meeting the nutritional needs of the ever-increasing global population // *International Journal of Food Science & Technology*. 2024.V. 59. pp. 2846–2859 <https://doi.org/10.1111/ijfs.17099>
2. Espinosa-Marrón, A., Adams, K., Sinno, L. et al. Environmental impact of animal-based food production and the feasibility of a shift toward sustainable plant-based diets in the United States // *Frontiers in Sustainability*. 2022.V. 3. p. 841106 <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.841106>
3. Бурак, Л. Ч., Сапач А.Н., Завалей А.П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2024. Т. 14, № 2(49). С. 173–183 <https://doi.org/10.21285/achb.914>
4. Dubey, A., Mateen, A. & Singh, N. Exploring textural, solubility and rheological characteristics of high-moisture extruded meat analogues: effects of wheat gluten and rice protein incorporation in pea protein isolate and feed moisture levels // *International Journal of Food Science & Technology*. 2024. V. 59. pp. 5560–5575 <https://doi.org/10.1111/ijfs.17279>
5. Бурак, Л. Ч., Сапач А.Н. Улучшение технологических свойств продовольственного зерна за счет использования современных технологий: Обзор предметного поля // *Health, Food & Biotechnology*. 2024. Т. 6, № 1. С. 40–64 <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i1.s204>
6. Bajić, B., Vučurović, D., Vasić, Đ., Jevtić-Mučibabić, R. & Dodić. Biotechnological production of sustainable microbial proteins from agro-industrial residues and by-products // *Food*. 2022. V. 12. p. 107 <https://doi.org/10.3390/foods12010107>
7. Fasolin, L.H., Pereira, R.N., Pinheiro, A.C. et al. Emergent food proteins—towards sustainability, health and innovation // *Food Research International*.

2019. V. 125. P. 108586 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108586>

8. Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I. & Verstraete, W. Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint // *Microbial Biotechnology*. 2016.V. 9. pp. 568–575 <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12369>

9. Manzoor, S., Fayaz, U., Dar, A.H. et al. Sustainable development goals through reducing food loss and food waste: A comprehensive review // *Future Foods*. 2024.V. 9. p. 100362 <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100362>

10. Kamal, H., Le, C.F., Salter, A.M. & Ali, A. Extraction of protein from food waste: an overview of current status and opportunities // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021.V. 20. pp. 2455–2475. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12739>

11. Chen, Y. & Mu, T. Application of deep eutectic solvents in biomass pretreatment and conversion // *Green Energy & Environment*. 2019.V. 4. pp. 95–115 <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.01.012>

12. Hewage, A., Olatunde, O.O., Nimalaratne, C., Malalgoda, M., Aluko, R.E. & Bandara, N. Novel extraction technologies for developing plant protein ingredients with improved functionality // *Trends in Food Science & Technology*. 2022.V. 129. pp. 492–511 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.016>

13. Kim, W., Wang, Y. & Selomulya, C. Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. V.105. pp. 261–272 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.012>

14. Ferrari, L., Panaite, S.A., Bertazzo, A. & Violi, F. Animal- and plant-based protein sources: a scoping review of human health outcomes and environmental impact // *Nutrients*. 2022. V. 14.p. 5115 <https://doi.org/10.3390/nu14235115>

15. Munialo, C.D. A review of alternative plant protein sources, their extraction, functional characterisation, application, nutritional value and pinch points to being the solution to sustainable food production // *International Journal of Food Science & Technology*. 2024. V. 59. pp.462–472 <https://doi.org/10.1111/ijfs.16467>

16. Qin, P., Wang, T. & Luo, Y. A review on plant-based proteins from soybean: health benefits and soy product development // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022. V. 7. p. 100265 <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100265>

17. Sabaté, J., Sranacharoenpong, K., Harwatt, H., Wien, M. & Soret, S. The environmental cost of protein food choices // *Public Health Nutrition*. 2015.V. 18. pp. 2067–2073 <https://doi.org/10.1017/s1368980014002377>

18. Shevkani, K., Singh, N., Patil, C., Awasthi, A. & Paul, M. Antioxidative and antimicrobial properties of pulse proteins and their applications in gluten-free foods and sports nutrition // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022.V. 57. pp. 5571–5584 <https://doi.org/10.1111/ijfs.15666>

19. Lozano, M., Rodríguez-Ulibarri, P., Echeverría, J.C., Beruete, M., Sorolla, M. & Beriain, M.J. Mid-

infrared spectroscopy (MIR) for simultaneous determination of fat and protein content in meat of several animal species // *Food Analytical Methods*. 2017.V. 10. pp 3462–3470 <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0879-1>

20. Бурак, Л. Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54, № 2. С. 342–357 <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>

21. Zeng, Y., Chen, E., Zhang, X., Li, D., Wang, Q. & Sun, Y. Nutritional value and physicochemical characteristics of alternative protein for meat and dairy—a review // *Food*. 2022. V.11.p. 3326 <https://doi.org/10.3390/foods11213326>

22. Горелик А. С., Темербаева М. В. Аминокислотный состав молока и сыра в зависимости от происхождения коров // *Все о мясе*. 2020. № 5S. С. 85–88. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2020-5S-85-88>

23. Bielecka, M., Cichosz, G. & Czczot, H. Antioxidant, antimicrobial and anticarcinogenic activities of bovine milk proteins and their hydrolysates—A review // *International Dairy Journal*. 2022. V.127.p. 105208 <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105208>

24. Ciccaglione, A.F., Di Giulio, M., Di Lodovico, S., Di Campli, E., Cellini, L. & Marzio, L. Bovine lactoferrin enhances the efficacy of levofloxacin-based triple therapy as first-line treatment of *Helicobacter pylori* infection: an in vitro and in vivo study // *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 2019.V. 74. pp. 1069–1077 <https://doi.org/10.1093/jac/dky510>

25. Hardynets, S., & Charniauskaya, L. Study of the nutritional value of chicken eggs sold on the market of the Republic of Belarus // *Food Resources*. 2021. V.9(16). pp. 79–89. <https://doi.org/10.31073/foodresources2021-16-08>

26. Кавтарашвили, А. Ш. Факторы, влияющие на внешние и внутренние показатели качества куриных яиц. Сообщение I. Формирование и строение яйца; факторы, влияющие на массу яиц (обзор) // *Птицеводство*. 2023. № 6. С. 36-43 <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2023-72-6-36-43>

27. Кавтарашвили, А. Ш. Морфологические и химические качества разных категорий пищевых яиц кур современных кроссов // *Вестник аграрной науки*. 2024. № 1(106). С. 13-20 <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2024.1.10>

28. Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X.A. & Lin, S. Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food // *Food Research International*. 2021. V.139.p 109914 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>

29. Machovina, B., Feeley, K.J. & Ripple, W.J. Biodiversity conservation: the key is reducing meat consumption // *Science of the Total Environment*. 2015.V. 536. pp. 419–431 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.022>

30. Scarborough, P., Appleby, P.N., Mizdrak, A. et al. Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters,

fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK // *Climatic Change*. 2014. V. 125. pp. 179–192 <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1169-1>

31. Leip, A., Billen, G., Garnier, J. et al. Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity // *Environmental Research Letters*. 2015.V. 10. p. 115004 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115004>

32. Day, L., Cakebread, J.A. & Loveday, S.M. Food proteins from animals and plants: differences in the nutritional and functional properties // *Trends in Food Science & Technology*. 2022.V. 119. pp. 428–442 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.020>

33. Thakur, S., Pandey, A.K., Verma, K., Shrivastava, A. & Singh, N. Plant-based protein as an alternative to animal proteins: A review of sources, extraction methods and applications // *International Journal of Food Science & Technology*. 2024. V. 59. pp. 488–497 <https://doi.org/10.1111/ijfs.16663>

34. Погорелова Н. А., Гаврилова Н. Б. Конверсия пшеничных отрубей в целевые продукты биосинтеза // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53. №. 1. С. 49-59 <http://dx.doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414>

35. Sui, X., Zhang, T. & Jiang, L. Soy protein: molecular structure revisited and recent advances in processing technologie // *Annual Review of Food Science and Technology*. 2021. V. 12. pp. 119–147 <https://doi.org/10.1146/annurev-food-062220-104405>

36. Соколов Д. В., Болхонов Б. А., Жамсаранова С. Д., Лебедева С. Н., & Баженова, Б. А. Ферментативный гидролиз соевого белка // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53. №1. С.86-96 <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418>

37. Денисович Ю.Ю., Осипенко Е. Ю., Кичигина Е. Ю., Гаврилова Г. А. Изучение возможности применения изолята горохового белка в технологии производства мясорастительного кулинарного изделия // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 8(197). С. 257-265.

38. Корнева Н. Ю., Литвиненко О. В. Оценка качественного состава зерна сои, пригодного для производства пищевых добавок // *Агронаука*. 2023. Т. 1. №. 1. С. 158-164.

39. da Silva, J., Lucas, A., Menegon de Oliveira, L., Da Rocha, M. & Prentice, C. Edible insects: an alternative of nutritional, functional and bioactive compounds // *Food Chemistry*. 2020.V. 311. p. 126022 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126022>

40. de Castro, R.J.S., Ohara, A., Aguilar, J.G. & Domingues, M.A.F. Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: processes for obtaining, consumption and future challenges // *Trends in Food Science and Technology*. 2018. V. 76. pp. 82–89 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.006>

41. Ma, Z., Mondor, M., Valencia, F.G. & Hernández-Álvarez, A.J. Current state of insect proteins: Extraction technologies, bioactive peptides and allergenicity of edible insect proteins // *Food & Function*. 2023. V. 14. pp. 8129–8156 <https://doi.org/10.1039/d3fo02865h>

42. Yoon, S., Wong, N.A., Chae, M. & Auh, J.H. Comparative characterization of protein hydrolysates from three edible insects: mealworm larvae, adult crickets, and silkwormpupae // *Food*. 2019.V.8.p. 563 <https://doi.org/10.3390/foods8110563>

43. Zielińska, E., Baraniak, B. & Karaś, M. Identification of antioxidant and anti-inflammatory peptides obtained by simulated gastrointestinal digestion of three edible insects species (*Gryllobates sigillatus*, *Tenebrio molitor*, *Schistocerca gregaria*) // *International Journal of Food Science & Technology*. 2018. V. 53. pp.2542–2551 <https://doi.org/10.1111/ijfs.13848>

44. Бурак, Л. Ч. Состояние и перспективы использования морских водорослей в качестве источника белка и биологически активных веществ // *Sciences of Europe*. 2024. № 143(143). С. 4-13 <https://doi.org/10.5281/zenodo.12540670>

45. Bhatnagar, P., Gururani, P., Parveen, A. et al. Algae: A promising and sustainable protein-rich food ingredient for bakery and dairy products // *Food Chemistry*. 2024. V. 441.p. 138322 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138322>

46. Сутула Г. И., Рябухин Д. С. Микроводоросли и насекомые как альтернативные источники белка: преимущества и риски // *Пищевые системы*. 2023. С. 497 <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-497-503>

47. Moslemy, N., Sharifi, E., Asadi-Eydivand, M. & Abolfathi, N. Review in edible materials for sustainable cultured meat: scaffolds and microcarriers production // *International Journal of Food Science & Technology*. 2023.V. 58. pp. 6182–6191 <https://doi.org/10.1111/ijfs.16703>

48. Kumar, P., Mehta, N., Abubakar, A.A. et al. Potential alternatives of animal proteins for sustainability in the food sector // *Food Reviews International*. 2023. V. 39. pp. 5703–5728 <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2094403>

49. Park, S., Kuo, J.C.H., Reesink, H.L. & Paszek, M.J. Recombinant mucin biotechnology and engineering // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2023.V. 193. 114618 <https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114618>

50. Zheng, Y.Y., Zhu, H.Z., Wu, Z.Y. et al. Evaluation of the effect of smooth muscle cells on the quality of cultured meat in a model for cultured meat // *Food Research International*. 2021. V.150.p. 110786 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110786>

51. Joo, S.T., Choi, J.S., Hur, S.J. et al. A comparative study on the taste characteristics of satellite cell cultured meat derived from chicken and cattle muscles // *Food Science of Animal Resources*. 2022. V. 42. pp. 175–185 <https://doi.org/10.5851/kosfa.2021.e72>

52. Malav, O.P., Talukder, S., Gokulakrishnan, P. & Chand, S. Meat analog: A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015. V. 55. pp. 1241–1245 <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.689381>

53. Tan, M., Nawaz, M.A. & Buckow, R. Functional and food application of plant proteins—a review // *Food Reviews International*. 2023.V. 39. pp. 2428–2456 <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1955918>

54. Nawrocka, A., Szymańska-Chargot, M., Miś, A., Wilczewska, A.Z. & Markiewicz, K.H. Aggrega-

- tion of gluten proteins in model dough after fibre polysaccharide addition // *Food Chemistry*. 2017. V.231. pp. 51–60 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.117>
55. Kowalski, J.K. Sustainability impacts of pulses in meat-analogue food products // *CerealFoods World*. 2019. V. 64. P.52.
56. Бурак, Л. Ч., Сапач А.Н. Использование технологии омического нагрева в процессе переработки плодов и овощей. Обзор предметного поля // *Пищевые системы*. 2024. Т. 7, № 1. С. 59-70. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-59-70>
57. Choudhary, P. & Rawson, A. Impact of power ultrasound on the quality attributes of curd and its fermentation/gelation kinetics // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. V. 44. e13698 <https://doi.org/10.1111/jfpe.13698>
58. Бурак, Л. Ч., Карбанович, В.И. Влияние валоризованных растительных белков и фенольных соединений на пищевую ценность и усвояемость. Обзор последних достижений // *Научное обозрение. Технические науки*. 2024. № 2. С. 35-41 <https://doi.org/10.17513/srts.1464>
59. Yeasmin, F., Prasad, P. & Sahu, J.K. Effect of ultrasound on physicochemical, functional and antioxidant properties of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) proteins extract // *Food Bioscience*. 2024. V. 57. p. 103599 <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103599>
60. Gadalkar, S.M. & Rathod, V.K. Extraction of watermelon seed proteins with enhanced functional properties using ultrasound // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2020.V. 50. pp.133–140 <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1679173>
61. Dabbour, M., He, R., Ma, H. & Musa, A. Optimization of ultrasound assisted extraction of protein from sunflower meal and its physicochemical and functional properties // *Journal of Food Process Engineering*. 2018. V. 41. e12799 <https://doi.org/10.1111/jfpe.12799>
62. Lee, K.S. & Choe, Y.C. Environmental performance of organic farming: evidence from Korean small-holder soybean production // *Journal of Cleaner Production*. 2019.V. 211. pp. 742–748.
63. Özyurt, V.H., Tetik, I. & Ötles, S. Influence of process conditions on ultrasound-assisted protein extraction from cold pressed tomato seed waste // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. V. 45. e16079 <https://doi.org/10.1111/jfpp.16079>
64. Xu, Y., Li, Y., Bao, T., Zheng, X., Chen, W. & Wang, J. A recyclable protein resource derived from cauliflower by-products: potential biological activities of protein hydrolysates // *Food Chemistry*. 2017. V. 221. pp. 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.053>
65. Dong, X.Y., Guo, L.L., Wei, F. et al. Some characteristics and functional properties of rapeseed protein prepared by ultrasonication, ultrafiltration and isoelectric precipitation // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2011. V. 91. pp. 1488–1498 <https://doi.org/10.1002/jsfa.4339>
66. Guzmán-Lorite, M., Marina, M.L. & García, M.C. Pressurized liquids vs. high intensity focused ultrasounds for the extraction of proteins from a pomegranate seed waste // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022. V. 77.p. 102958 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102958>
67. Vernes, L., Abert-Vian, M., El Maâtaoui, M., Tao, Y., Bornard, I. & Chemat, F. Application of ultrasound for green extraction of proteins from spirulina. Mechanism, optimization, modeling, and industrial prospects // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. V. 54. pp. 48–60 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.02.016>
68. Zou, Y., Bian, H., Li, P. et al. Optimization and physicochemical properties of nutritional protein isolate from pork liver with ultrasound-assisted alkaline extraction // *Animal Science Journal*. 2018. V.89. pp. 456–466 <https://doi.org/10.1111/asj.12930>
69. Zhang, F., Sun, Z., Li, X. et al. Ultrasound-assisted alkaline extraction of protein from *Tenebrio molitor* larvae: extraction kinetics, physicochemical, and functional traits // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. V. 95.p. 106379 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106379>
70. Chew, K.W., Chia, S.R., Lee, S.Y., Zhu, L. & Show, P.L. Enhanced microalgal protein extraction and purification using sustainable microwave-assisted multiphase partitioning technique // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 367. pp. 1–8 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.131>
71. Varghese, T. & Pare, A. Effect of microwave assisted extraction on yield and protein characteristics of soymilk // *Journal of Food Engineering*. 2019.V. 262. pp. 92–99 <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.020>
72. Behere, M., Patil, S.S. & Rathod, V.K. Rapid extraction of watermelon seed proteins using microwave and its functional properties // *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2021. V. 51. pp. 252–259 <https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1808792>
73. Cheng, F., Shu, G., Chen, L. et al. Ultrasound-microwave assisted extraction of proteins from *Moringa oleifera* leaves: comparative optimization study and LC-MS analysis of the protein concentrate // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. V. 45. e15547 <https://doi.org/10.1111/jfpp.15547>
74. Kronbauer, M., Shorstkii, I., da Silva, S.B., Toepfl, S., Lammerskitten, A. & Siemer, C. Pulsed electric field assisted extraction of soluble proteins from nettle leaves (*Urtica dioica* L.): kinetics and optimization using temperature and specific energy // *Sustainable Food Technology*. 2023.V. 1. pp.886–895 <https://doi.org/10.1039/D3FB00053B>
75. Liu, M., Zhang, M., Lin, S., Liu, J., Yang, Y. & Jin, Y. Optimization of extraction parameters for protein from beer waste brewing yeast treated by pulsed electric fields (PEF) // *African Journal of Microbiology Research*. 2012.V. 6. pp. 4739–4746
76. Jaeschke, D.P., Mercali, G.D., Marczak, L.D.F., Müller, G., Frey, W. & Gusbeth, C. Extraction of valuable compounds from *Arthrospira platensis* using pulsed electric field treatment // *Bioresource Technology*. 2019. V. 283. pp. 207–212 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.035>
77. Gateau, H., Blanckaert, V., Veidl, B. et al. Application of pulsed electric fields for the biocompatible

- extraction of proteins from the microalga *Haematococcus pluvialis* // *Bioelectrochemistry*. 2021. V. 137. p. 107588 <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107588>
78. Ghosh, S., Gillis, A., Sheviriyov, J., Levkov, K. & Golberg, A. Towards waste meat biorefinery: extraction of proteins from waste chicken meat with non-thermal pulsed electric fields and mechanical pressing // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 208. pp. 220–231 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.037>
79. Sunphorka, S., Chavasiri, W., Oshima, Y. & Ngamprasertsith, S. Protein and sugar extraction from rice bran and de-oiled rice bran using subcritical water in a semi-continuous reactor: optimization by response surface methodology // *International Journal of Food Engineering*. 2012. V. 8. p. 2262 <https://doi.org/10.1515/1556-3758.2262>
80. Švarc-Gajić, J., Morais, S., Delerue-Matos, C., Vieira, E.F. & Spigno, G. Valorization potential of oilseed cakes by subcritical water extraction // *Applied Sciences*. 2020. V. 10. p. 8815 <https://doi.org/10.3390/app10248815>
81. Saravana, P.S., Choi, J.H., Park, Y.B., Woo, H.C. & Chun, B.S. Evaluation of the chemical composition of brown seaweed (*Saccharina japonica*) hydrolysate by pressurized hot water extraction // *Algal Research*. 2016. V. 13. pp. 246–254 <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.12.004>
82. Trigueros, E., Sanz, M.T., Alonso-Riaño, P., Beltrán, S., Ramos, C. & Melgosa, R. Recovery of the protein fraction with high antioxidant activity from red seaweed industrial solid residue after agar extraction by subcritical water treatment // *Journal of Applied Phycology*. 2021. V. 33. pp. 1181–1194 <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02349-0>
83. Бурак, Л. Ч., Сапач, А.Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения // *Пищевые системы*. 2023. Т. 6, № 1. С. 80-94 <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>
84. Bedin, S., Zanella, K., Bragagnolo, N. & Taranto, O.P. Implication of microwaves on the extraction process of rice bran protein // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2020. V. 36. pp. 1653–1665 <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190364s20180599>
85. Ochoa-Rivas, A., Nava-Valdez, Y., Serna-Saldívar, S.O. & Chuck-Hernández, C. Microwave and ultrasound to enhance protein extraction from peanut flour under alkaline conditions: effects in yield and functional properties of protein isolates // *Food and Bioprocess Technology*. 2017. V. 10. pp. 543–555 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-016-1838-3>
86. Hewage, A., Olatunde, O.O., Nimalaratne, C., House, J.D., Aluko, R.E. & Bandara, N. Improved protein extraction technology using deep eutectic solvent system for producing high purity fava bean protein isolates at mild conditions // *Food Hydrocolloids*. 2024. V. 147. p. 109283 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109283>
87. Burak, L. Influence of electric field technology on quality and nutritional value of juices. A review // *The Scientific Heritage*. 2024. No. 142(142). P. 45-53 <https://doi.org/10.5281/zenodo.13252969>
88. Бурак, Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодово-овощного сырья и соковой продукции // Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М». 2025. 236 с. <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>
89. Xi, J., Li, Z. & Fan, Y. Recent advances in continuous extraction of bioactive ingredients from food-processing wastes by pulsed electric fields // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. V. 61. pp. 1738–1750 <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765308>
90. Polikovskiy, M., Fernand, F., Sack, M., Frey, W., Müller, G. & Golberg, A. In silico food allergenic risk evaluation of proteins extracted from macroalgae *Ulva* sp. with pulsed electric fields // *Food Chemistry*. 2019. V. 276. pp. 735–744 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.134>