

Научные обзоры и сообщения / Scientific Reviews and Reports

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418)EDN: [SBLMDD](https://www.edn.ru/SBLMDD)

УДК 664.68



Подход Zero Waste на предприятиях питания: направления развития экономики замкнутого цикла

О.А. Суворов¹, Р.Х. Кандроков², Д.А. Песоцкая¹,
Ю.В. Николаева¹, М.А. Шанк^{3,4}

¹Университет РОСБИОТЕХ, Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва,
Российская Федерация

³МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация

⁴Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэнь, Шэньчжэнь,
Китайская Народная Республика

Аннотация

Обоснование. От сельскохозяйственного производства до внутреннего потребления продукции пищевая промышленность ежегодно производит огромное количество отходов, что приводит к загрязнению почвы, воды и воздуха, поэтому валоризация пищевых отходов является актуальным вопросом индустрии питания.

Целью обзора предметного поля является анализ применяемых методов экономики замкнутого цикла, изучение возможности использования отходов цитрусовых в пищевой промышленности и способов экстракции пектина.

Методы. В работу включен анализ предметного поля, систематизированы научные источники опубликованных работ о способах внедрения экономики замкнутого цикла международных научных публикаций из высокорейтинговых изданий Scopus и Google Scholar с 2020 по 2024 год по вопросам актуальных подходов к внедрению экономики замкнутого цикла на пищевых производствах.

Полученные результаты. Рассмотрены методы повторного применения отходов цитрусовых, новых и комбинированных методов экстракции и внедрение этих технологий в экономику замкнутого цикла. Описаны направления в исследованиях относительно применяемых методов экономики замкнутого цикла, возможности использования отходов цитрусовых в пищевой промышленности и способы экстракции пектина. Изучение возможностей по включению различных экстрактов в различные блюда и продукты, а также оценка их сенсорных и питательных харак-

теристик станет важным направлением для будущих исследований. Полученные в ходе обзора данные могут служить основой для проектирования экспериментов, посвященных изучению свойств и методов получения эфирных масел и других биологически активных соединений из отходов цитрусовых.

Заключение. Выявлены три главных тренда в сфере применения отходов цитрусовых в пищевой промышленности; три ключевые тенденции в области экстракции пектина и пять организационно-технологических направлений развития организации и применения стратегии экономики замкнутого цикла. Особое значение имеет исследование щадящих методов экстракции, которые обеспечивают сохранение биоактивных компонентов при минимальных энергетических затратах. По результатам проведенного обзора выявлено необходимость более глубокого изучения вторичной переработки отходов овощей и фруктов, а также повышения осведомленности производителей о принципах экономики замкнутого цикла и способах их внедрения в производственные процессы.

Ключевые слова: индустрия питания; безотходное производство; переработка; цитрусовые; экстракция; пектин

Для цитирования. Суворов, О. А., Кандроков, Р. Х., Песоцкая, Д. А., Николаева, Ю. В., & Шанк, М. А. (2026). Подход Zero Waste на предприятиях питания: направления развития экономики замкнутого цикла. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 457–478. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418>

Zero Waste approach in food enterprises: directions for development of closed-loop economy

**O.A. Suvorov¹, R.H. Kandrov², D.A. Pesotskaya¹,
Y.V. Nikolaeva¹, M.A. Shank^{3,4}**

¹*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, Russian Federation*

²*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

⁴*MSU-PPI University in Shenzhen, Shenzhen, P.R. China*

Abstract

Background. From agricultural production to domestic consumption of products, the food industry produces a huge amount of waste every year, which leads to pollution of soil, water and air, so the valorization of food waste is a pressing issue in the food industry.

The **purpose** of the review of the subject field is to analyze the applied methods of the closed-loop economy, study the possibility of using citrus waste in the food industry and methods of pectin extraction.

Methods. The work includes an analysis of the subject field and systematized scientific sources of published works on ways to implement the closed-loop economy of international scientific publications from highly rated publications Scopus and google scholar from 2020 to 2024 on topical approaches to the introduction of the closed-loop economy in food production.

Results. The article reviews methods for reusing citrus waste, new and combined extraction methods, and the introduction of these technologies into a circular economy. Research trends in the applied circular economy methods, the possibilities of using citrus waste in the food industry, and methods for extracting pectin are described. Studying the possibilities of incorporating various extracts into various dishes and products, as well as assessing their sensory and nutritional characteristics, will be an important area for future research. The data obtained in the review can serve as a basis for designing experiments devoted to studying the properties and methods for obtaining essential oils and other biologically active compounds from citrus waste.

Conclusion. Three main trends in the use of citrus waste in the food industry were identified; three key trends in the field of pectin extraction and five organizational and technological directions for the development of the organization and the application of a closed-loop economy strategy. Of particular importance is the study of gentle extraction methods that ensure the preservation of bioactive components with minimal energy costs. This requires a more in-depth study of the recycling of vegetable and fruit waste, as well as raising awareness among producers of the principles of the closed-loop economy and how to implement them in production processes.

Keywords: food industry; zero waste; recycling; citrus; extraction; pectin

For citation. Suvorov, O. A., Kandrov, R. Kh., Pesotskaya, D. A., Nikolaeva, Yu. V., & Shank, M. A. (2026). Zero Waste approach in food enterprises: directions for development of closed-loop economy. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 457–478. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1418>

Введение

Кожура, семена, непригодная мякоть составляют 40% от общего количества растительной пищи в цитрусовых, поскольку они обычно выбрасываются и могут быть преобразованы в основные побочные продукты [1; 2]. Эти пищевые побочные продукты богаты органическими кислотами, минералами, пищевыми волокнами, сахарами и биологически активными соединениями и содержат некоторые полифенолы и каротиноиды, что привело к росту интереса к их использованию в качестве натуральных ингредиентов, альтернативных синтетическим ингредиентам при производстве высококачественных соединений, поскольку они используются в

различных промышленных областях, таких как нутрицевтика, пищевая промышленность, косметика и фармацевтика [3; 4].

Согласно экономическим, экологическим и фармацевтическим данным обзора, отходы переработки цитрусовых должны быть преобразованы из отходов, подлежащих утилизации, в ценный ресурс для повторного использования [5; 6]. На основе модели круговой экономики отходы цитрусовых (семена, кожура, отжатая мякоть, вторичный сок и листья) все чаще перерабатываются, чтобы получить ценные соединения для использования в пищевой промышленности [7].

Обзор предметного поля показал следующие актуальные, но еще до конца не изученные направления:

1. Как повторное использование отходов цитрусовых повлияет на экономику замкнутого цикла;
2. Применение отходов цитрусовых в сфере пищевых технологий;
3. Новые и наиболее эффективные методы экстракции.

Целью данного обзора предметного поля являлось обобщение и систематизация идей и способов применения отходов цитрусовых как способ внедрения экономики замкнутого цикла на предприятия общественного питания за последние 5 лет.

Исследовательские вопросы обзора:

1. Поможет ли вторичное использование отходов цитрусовых в развитии экономики замкнутого цикла?
2. Как эффективно и с наименьшим вложением ресурсов использовать отходы цитрусовых?
3. Возможна ли комбинация нескольких методов экстракции?

Материалы и методы

Стратегия поиска и источники информации

Чтобы ответить на вопрос нашего исследования, был проведен обзор литературы по интересующей нас теме (направления развития экономики замкнутого цикла) с указанием объема имеющихся исследований, ключевых характеристик, новых данных и пробелов в исследованиях с целью внесения вклада в дальнейшие разработки.

Материалами для анализа послужили статьи, опубликованные с 2020 по 2024 годы в таких базах данных как Scopus и Google Scholar. Кроме того, были изучены списки ссылок на включенные исследования и недавние публикации для выявления потенциальных исследований, которые также могли бы быть включены в обзор.

Всего было проанализировано 113 источников, из которых была выбрана 37 статей, отвечающая критериям отбора и релевантная теме обзора.

Ключевыми словами для осуществления поиска являлись следующие словосочетания: «citrus waste in the food industry», «pectin extraction methods», «recycling of waste», «closed-loop economics».

Критерии отбора источников и извлечение данных

Аналитический обзор включал следующие этапы: 1) определение вопроса исследования, 2) определение соответствующих исследований, 3) отбор исследований, 4) извлечение данных и 5) обобщение и представление результатов. Основной вопрос звучал так: “Как внедрение экономики замкнутого цикла влияет на пищевую индустрию?”. Критерии отбора источников были разделены на три группы. Подробно критерии включения и исключения представлены в таблице.

Таблица.

Критерии включения и исключения источников в обзор предметного поля

Table. Inclusion and Exclusion Criteria for Sources in a Review of a Subject Area

Критерий отбора	Характеристика
Тип публикаций	К рассмотрению принимались статьи из иностранных научных журналов и баз данных; статьи, опубликованные с 2020 года до даты проведения исследования; публикации на английском языке, независимо от страны, которую представляет автор.
Концепция	Все статьи были разбиты на 3 блока: 1) Экономика замкнутого цикла – в раздел включались статьи по внедрению технологии zero waste, способах повторного использования ресурсов, примеры предприятий, которые уже внедрили у себя технологию. 2) Отходы цитрусовых – отбор прошли статьи, авторы которых исследовали кожуру цитрусовых как сырье для вторичного использования. Включались статьи не только про пищевую индустрию, но и медицинская и технологическая отрасли. 3) Экстракция – наиболее важным соединением кожуры цитрусовых является пектин, поэтому именно его методы экстракции были включены в обзор. Новейшие разработки, наиболее эффективные и комбинированные методы принимались к рассмотрению.
Контекст	В обзор были включены статьи, в которых содержались какой-либо опыт по теме исследования методов повторного применения отходов цитрусовых. Также были включены документы с рекомендациями, в которых сообщалось о новых и комбинированных методах экстракции и их внедрение технологий в экономику замкнутого цикла. Исключались статьи, описывающие применение экономики замкнутого цикла не в пищевой индустрии; статьи, не относящиеся к теме вторичного использования отходов цитрусовых.

Данные извлекались двумя независимыми рецензентами. Процесс отбора состоял из двух этапов: 1) чтение названий и аннотаций и 2) чтение полных текстов. На обоих этапах проводилось консенсусное совещание для обсуждения потенциально приемлемых исследований, отвечающих критериям включения в исследование (таблица). В случае разногласий между рецензентами для принятия решения обращались к третьему рецензенту. Потенциально приемлемые документы были сведены в таблицу данных и проанализированы двумя рецензентами перед включением в окончательный обзор. Была создана стандартная электронная таблица EXCEL, которая включала следующие данные: название соответствующего учреждения, географический охват документа, год публикации документа, цели и описание документа.

Данный обзор предметного поля опирался на алгоритм протокола PRISMA (Рисунок). Как свидетельствует протокол PRISMA, было рассмотрено 113 статей и после исключения дублирующих статей и тех, что не касались цитрусовых, осталось 37 статей, которые вошли в обзор.

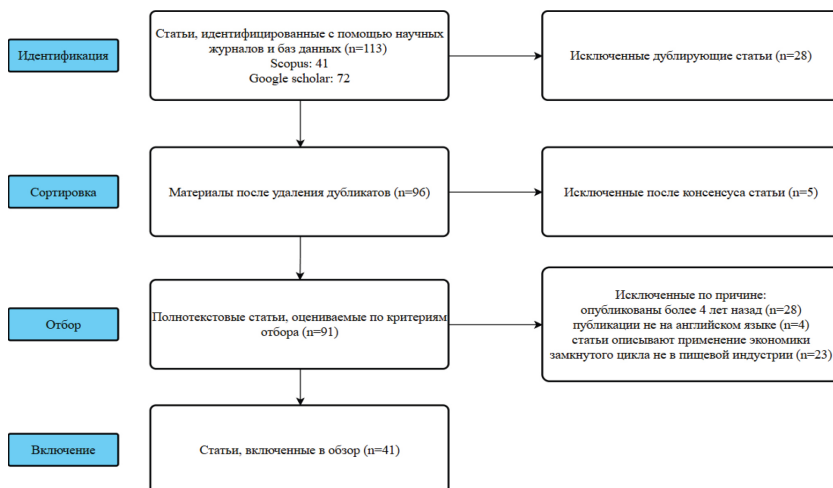


Рис. Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA

Fig. Flowchart illustrating the study selection process, in accordance with the PRISMA protocol

Результаты исследований и их обсуждение

На основе обзора литературы, реализации задуманной цели и ответов на поставленные исследовательские вопросы. Данные были разбиты на 3

раздела: «Экономика замкнутого цикла и повторное использование отходов в пищевой промышленности». «Применение отходов цитрусовых в пищевой промышленности» и «Методы экстракции пектина».

Экономика замкнутого цикла и повторное использование отходов в пищевой индустрии

Отходы, образующиеся при переработке сельскохозяйственного сырья и использовании вспомогательных материалов, таких как добавки, некоторые химические компоненты усиливают воздействие пищевой цепи на окружающую среду, что приводит к истощению природных ресурсов. В последние годы в производственных отраслях экономики, включая агропромышленный комплекс, предпринимаются попытки поддержания баланса между воздействием на окружающую среду, использованием ресурсов, благосостоянием населения и экономической выгодой [8; 9]. Эта тенденция стимулирует интенсивное развитие теории круговой (циклической) экономики или экономики замкнутого цикла и способствует поиску методов ее реализации в реальной экономической системе [10].

Применение побочных продуктов в качестве пищевых добавок

Применение побочных продуктов в качестве пищевых добавок представляет собой важный элемент устойчивого развития пищевой промышленности и поддержания принципов круговой экономики. Одной из ключевых стратегий в этом направлении является переработка отходов, таких как остатки апельсинов и виноградные выжимки, для создания ингредиентов, обогащенных биоактивными соединениями и пищевыми волокнами. Исследования показывают, что побочные продукты производства апельсинового сока, содержащие до 73,61% пищевых волокон, а также фенольные соединения и минералы, могут быть эффективно использованы для производства обогащенных продуктов, таких как печенье, без ухудшения сенсорных характеристик [5; 11; 12].

Инновационные методы переработки, такие как использование технологий 3D-печати, предлагают дополнительные возможности для использования побочных продуктов. Этот подход позволяет создавать продукты с индивидуальными характеристиками и поддерживает концепцию «отходы в богатство». Исследования демонстрируют, что добавление порошка виноградных выжимок в рецептуры способствует улучшению текстуры и структуры продуктов, а также поддерживает их функциональные свойства [13].

Разработка методов переработки побочных продуктов направлена на повышение их добавленной стоимости и создания функциональных продуктов питания. Включение таких ингредиентов позволяет не только снизить

объемы отходов, но и создать новые продукты, обогащенные пищевыми волокнами и биоактивными компонентами, которые могут поддерживать здоровье и удовлетворять спрос потребителей на продукты с высокой питательной ценностью. Эти стратегии играют важную роль в переходе к более устойчивым производственным практикам и помогают пищевой промышленности интегрировать принципы круговой экономики [14-16].

Использование отходов в качестве кормовой добавки для животных

Использование пищевых отходов в кормовой промышленности является важным направлением для устойчивого развития и минимизации потерь продовольствия [12; 13; 17]. Хлебные отходы, например, содержат значительное количество ферментируемых сахаров и белков, что делает их ценным ресурсом для производства кормов для животных [2; 18]. Хотя минимизация отходов остается важной целью, их полное исключение невозможно, поэтому переработка хлебных отходов в корма и другие продукты с высокой добавленной стоимостью становится перспективной стратегией. Помимо анаэробного сбраживания, хлебные отходы могут использоваться для создания биотоплива, фармацевтических продуктов и кормовых добавок, что открывает новые возможности для их валоризации [14; 19].

Потенциал использования насекомых в качестве преобразователей пищевых отходов также привлекает внимание исследователей. Насекомые способны перерабатывать биоразлагаемые отходы, создавая биомассу, пригодную для использования в кормах для животных. Данное решение позволяет замкнуть цикл питательных веществ и снизить воздействие пищевой промышленности на окружающую среду. Однако регуляторные ограничения препятствуют применению значительной части отходов в качестве субстрата для выращивания насекомых, что требует пересмотра и адаптации нормативных актов для полноценной реализации этого подхода [20].

Дополнительный потенциал использования отходов в кормовой промышленности представлен бывшими пищевыми продуктами, такими как макароны, хлеб, шоколад и кондитерские изделия [21]. Данные продукты могут быть переработаны в однородные кормовые добавки, обогащенные питательными веществами. Исследования подтверждают, что бывшие пищевые продукты и побочные продукты хлебопекарного производства можно безопасно использовать в рационах как моногастричных, так и жвачных животных без ущерба для их продуктивности [18; 21; 22]. Полученные данные позволяют не только позволяет переработать значительный объем пищевых отходов, но и снижает конкуренцию между человеком и животными за ценные продовольственные ресурсы, такие как пшеница.

Использование многоразовой и переработанной упаковки

Современные подходы к управлению упаковочными отходами сосредоточены на разработке устойчивых решений, которые минимизируют воздействие на окружающую среду. Основной акцент делается на использовании многоразовой и переработанной упаковки, что имеет особое значение для пищевой промышленности и цепочек поставок, где применяется значительное количество первичных материалов [16]. Пластиковые контейнеры, в отличие от одноразовых картонных и деревянных коробок, обладают потенциалом для многократного использования и переработки, что способствует сокращению отходов. Однако, для этого требуются сложные логистические системы, способные эффективно управлять жизненным циклом упаковки [23].

Оптимизация таких систем подразумевает не только использование материалов с высокой степенью повторного применения, но и моделирование логистических сетей с учетом сроков службы контейнеров. Включение параметров срока службы в проектирование замкнутых сетей позволяет продлить срок эксплуатации упаковки и минимизировать затраты. Исследования показывают, что разработка моделей, учитывающих возможные изменения в спросе и условиях эксплуатации, может повысить экономическую и экологическую эффективность цепочек поставок [16; 24].

Эффективное планирование местоположений центров распределения, сбора и переработки также является ключевым элементом в управлении потоками упаковки. Оптимизация этих параметров позволяет сократить транспортные расходы и выбросы углекислого газа, что особенно важно для реализации целей экологической устойчивости [16]. Эти решения помогают как государственным, так и частным организациям строить устойчивые модели работы с многоразовой упаковкой.

Пищевые отходы как продукт для создания биотоплива, удобрений

Анализ современных подходов к управлению отходами и их переработке показывает, что ключевые стратегии устойчивости включают интеграцию замкнутых цепочек поставок и инновационные методы переработки. Пищевая промышленность и связанные с ней логистические цепочки поставок продуктов питания, в которых активно используются пластиковые, картонные и деревянные ящики, представляют собой важные точки для внедрения улучшенных систем управления. Например, использование многоразовых пластиковых контейнеров требует сложных логистических схем для продления срока их службы и оптимизации жизненного цикла [23]. Исследования показывают, что эффективное проектирование сетей,

включающее анализ сроков службы упаковки и логистических потоков, способствует снижению транспортных затрат и выбросов, что особенно актуально для устойчивого развития [16].

Важным направлением является переработка пищевых отходов для производства биотоплива и удобрений, что помогает минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечивает экономическую выгоду. Использование подходов, основанных на обратной логистике и технологиях искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность цепочек поставок и максимизировать ценность переработанных продуктов, таких как этанол и компост [8]. Это направление подтверждает важность объединения технологий и устойчивых практик в единой системе переработки.

Кроме того, переработка твердых отходов как часть стратегии устойчивого развития включает применение передовых технологий для производства энергии и создания материалов с высокой добавленной стоимостью. Методы переработки отходов, включающие использование биоугля и биосорбентов, улучшают качество почвы и очищают сточные воды, что способствует сохранению природных ресурсов и защите окружающей среды [21]. Эти примеры демонстрируют необходимость системного подхода к управлению отходами и внедрения экономически жизнеспособных решений.

Оптимизация использования отходов требует оценки их экономической ценности и внедрения технологических инноваций. Современные методы переработки позволяют получать побочные продукты с меньшими затратами и обеспечивать более эффективное управление ресурсами [18]. Применение интегрированных подходов к переработке отходов помогает максимизировать экономическую выгоду и поддерживает устойчивость агропромышленных и муниципальных систем [10; 11; 25].

Организация замкнутого цикла на едином производстве. Система оборота отходов без сторонних организаций

Поддержание замкнутого цикла на уровне отдельного предприятия требует внедрения внутренней переработки отходов без привлечения сторонних организаций. Этот подход позволяет снизить издержки и повышает устойчивость производства, что подтверждается примерами использования отходов в цепочке поставок, таких как переработка креветочных остатков в кормовые добавки [26]. Это показывает, что внутренние циклы переработки могут существенно способствовать повышению экономической эффективности и снижению нагрузки на окружающую среду.

Одним из важнейших аспектов успешного внедрения устойчивых практик является повышение осведомленности участников цепочек поставок, что особенно актуально для предприятий общественного питания и розничной торговли. Исследования показывают, что недостаточная осведомленность приводит к снижению уровня переработки и слабой интеграции устойчивых методов управления отходами [14; 15]. Повышение уровня знаний и использование эффективных методов классификации и переработки пищевых отходов может улучшить результаты и способствовать выполнению принципов круговой экономики.

Вопросы устойчивости заставили многие отрасли замкнуть цикл в своих цепочках поставок, превратившись в более сложный процесс со множеством рисков из-за круговой или многокруговой структуры с несколькими обратными потоками товаров/деталей/материалов [27].

Применение отходов цитрусовых в пищевой промышленности

Эффективное использование отходов цитрусовых в пищевой промышленности становится важным элементом устойчивого управления ресурсами. Отходы цитрусовых, включая кожуру, мякоть, мембраны и семена, составляют значительную часть массы плодов и представляют собой ценный источник биоактивных компонентов [28]. Их переработка позволяет создавать продукты с высокой добавленной стоимостью и снижать воздействие на окружающую среду [29].

Отходы цитрусовых как пищевая добавка, источник биологически активных соединений

Отходы цитрусовых богаты эфирными маслами, аскорбиновой кислотой, каротиноидами, флавоноидами и пищевыми волокнами, что делает их перспективным источником для разработки функциональных продуктов питания и нутрицевтиков [17]. Пектин, извлекаемый из цитрусовых, обладает гелеобразующими и водоудерживающими свойствами, что позволяет использовать его в производстве джемов, желе и других продуктов. Исследования показывают, что добавление 0,72% пектина в мороженое позволяет снизить содержание жира на 45% без ухудшения сенсорных качеств продукта [29]. Пищевые компании также активно используют порошок из кожуры цитрусовых для обогащения продуктов, что улучшает их текстуру и питательную ценность [1]. Сенсорные исследования подтверждают, что экстракты кожуры цитрусовых, такие как кожура аманцу, могут использоваться в качестве натуральных ароматизаторов, принимаемых потребителями [30]. Отходы цитрусовых также служат источником натуральных пигментов, которые являются нетоксичными и экологически устойчивыми [6].

Антиоксидантные свойства отходов цитрусовых помогают в хранении продуктов

Одной из важных характеристик отходов цитрусовых является их способность продлевать срок хранения продуктов. Эфирные масла и экстракты, полученные из отходов цитрусовых, демонстрируют выраженные антиоксидантные и антимикробные свойства, что делает их подходящими для использования в активной упаковке пищевых продуктов [2]. Применение таких материалов способствует предотвращению микробиологической и окислительной порчи продуктов, что снижает уровень пищевых отходов и обеспечивает более длительное хранение [24]. Проведенные исследования также показывают, что эфирные масла цитрусовых могут быть использованы в качестве натуральных консервантов и инсектицидов, что подтверждает их универсальность и multifunctionality в пищевой и упаковочной промышленности [31].

Биопродукты из отходов цитрусовых

Отходы цитрусовых имеют значительный потенциал для использования в производстве биопродуктов, таких как ферменты, биотопливо и биополимеры. Комплексные подходы к биопереработке позволяют оптимизировать процессы извлечения ценных компонентов и создавать устойчивые решения, поддерживающие экономику замкнутого цикла [32]. Биопродукты, полученные из отходов цитрусовых, не только минимизируют отходы, но и предоставляют возможности для экономической выгоды и развития экологически чистых технологий [3].

Методы экстракции пектина

Пектин, сложный полисахарид, широко используется в пищевой промышленности благодаря своим желирующим, загущающим и стабилизирующим свойствам [10]. Методы его экстракции имеют важное значение, поскольку влияют на качество и выход конечного продукта. Традиционные методы, основанные на кислотном гидролизе, имеют свои ограничения, что приводит к необходимости поиска новых и более эффективных технологий [33]. В этой секции рассматриваются различные подходы к экстракции пектина, включая комбинирование, сравнение и выявление новых методов.

Комбинирование методов

Современные исследования показывают, что комбинирование различных методов экстракции может значительно повысить выход и качество пектина. Например, комбинация экстракции с использованием сверхкритического CO₂ и этанола при изменении параметров давления и температуры приводит к получению экстрактов с высокой антиоксидантной активностью

[4]. Также использование ультразвука и микроволн совместно показало высокую эффективность при экстракции пектина из промышленных отходов томатов, где оптимальные условия ультразвуковой экстракции дали наибольший выход пектина с высоким содержанием галактуроновой кислоты и сопутствующих компонентов [15]. Такие подходы демонстрируют, что комбинирование методов позволяет получить более высокие показатели по сравнению с использованием каждого метода по отдельности.

Сравнение методов

Сравнительный анализ показывает, что ультразвуковая, микроволновая и сверхкритическая CO_2 -экстракции являются наиболее эффективными современными методами, обеспечивающими высокий выход и качество пектина при низких энергозатратах [22]. Например, ультразвуковая экстракция дает преимущество в извлечении фенольных компонентов, а микроволновая экстракция позволяет получить высокий выход пектина за короткое время [11]. Исследования также подтверждают, что кислотная экстракция при различных значениях pH и температуре обеспечивает стабильный выход пектина, но уступает по скорости и энергоэффективности более новым методам [34].

Выявление новых методов экстракции

Инновационные методы экстракции, такие как омическое нагревание и ультразвуковая экстракция, становятся предметом активных исследований благодаря их способности сократить время и повысить эффективность процессов [28, 32]. Омическое нагревание показало значительный потенциал в улучшении энергоэффективности процесса при экстракции пектина из отходов цитрусовых. Ультразвуковая экстракция также доказала свою эффективность в интенсификации извлечения ценных соединений, таких как d-лимонен, сокращая время процесса и снижая энергозатраты [25]. Гибридные методы экстракции, комбинирующие различные технологии, предлагают перспективные решения для улучшения качества и выхода пектина [2].

Обсуждение результатов

Интерпретация результатов

Результаты данного обзора предметного поля акцентируют внимание на значимости валоризации пищевых отходов и внедрении принципов экономики замкнутого цикла в пищевой сектор. Несмотря на многочисленные исследования, направленные на переработку пищевых отходов и создание продуктов с добавленной стоимостью [18; 19]. При этом, поле для разработки новых методов и подходов остается открытым.

В обзоре были рассмотрены пять ключевых сценариев, демонстрирующих применение технологии zero waste в пищевой промышленности [4; 10; 14; 21]. Каждый из этих сценариев подкреплен примерами переработки различных отходов, включая хлебные остатки, бывшие пищевые продукты и побочные продукты производства, что подчеркивает разнообразие и комплексность подходов к реализации концепции устойчивого развития. Однако анализ выявил, что использование отходов цитрусовых пока не получило достаточного освещения, несмотря на значительный потенциал этих ресурсов. Обнаружено, что отходы цитрусовых могут быть эффективно использованы для извлечения биологически активных соединений, улучшения упаковочных материалов с помощью эфирных масел и производства биопродуктов. Этот аспект требует дальнейшего развития, поскольку может значительно усилить устойчивость пищевых цепочек и уменьшить нагрузку на природные ресурсы [8].

Особое внимание в представленном обзоре уделено методам экстракции пектина, который является важным компонентом, получаемым из отходов цитрусовых. Исследования показывают, что пектин обладает многочисленными функциями в пищевой промышленности, включая его использование в качестве загустителя и стабилизатора. Раздел, посвященный методам экстракции пектина, показал, что наиболее перспективными подходами являются комбинированные методы, которые объединяют преимущества традиционных и инновационных технологий. Например, ультразвуковая и микроволновая экстракции продемонстрировали высокий выход и улучшенные характеристики экстракта при минимальных энергозатратах [4; 15]. Тем не менее, внедрение этих методов требует детальной оценки их экономической и экологической целесообразности.

Анализ также подчеркнул важность поиска новых методов экстракции, способных минимизировать воздействие на окружающую среду. Современные исследования, такие как изучение омического нагрева и других щадящих методов, показывают, что такие технологии могут быть перспективными для улучшения энергетической эффективности и сохранения структуры биоактивных компонентов [11, 28, 35]. Однако информация о таких методах пока ограничена, что оставляет пространство для дальнейших исследований и экспериментов.

Ограничения обзора

Несмотря на активные исследования в области переработки отходов, существует множество вызовов и ограничений. Проблематика переработ-

ки отходов цитрусовых охватывает широкий спектр аспектов, каждый из которых требует глубокого изучения. Существующие исследования преимущественно сосредоточены на традиционных методах переработки и применении отдельных технологий, что оставляет необходимость в разработке интегрированных и междисциплинарных подходов. Например, комбинирование методов экстракции показывает хорошие результаты по выходу пектина и его качественным характеристикам, однако требует дальнейших оценок их экономической жизнеспособности и влияния на окружающую среду [3; 36]. Также было выявлено, что данные о щадящих методах экстракции, которые могли бы сохранить биоактивные свойства и минимизировать потребление энергии, остаются недостаточными. Это ограничение подчеркивает необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку новых технологий с низким воздействием на окружающую среду, которые могут быть интегрированы в существующие процессы переработки [25; 37].

Выводы

1. Растущая потребность в обеспечении продовольствием увеличивающегося мирового населения, а также возрастающая осведомленность и ожидания потребителей способствовали развитию систем и процессов в пищевой промышленности.

2. Данный обзор систематизировал существующие исследования, выделив ключевые направления и подтемы, что позволяет определить дальнейшие пути исследований, направленных на повышение эффективности использования полученных данных.

3. Несмотря на значительный прогресс, зафиксированный проанализированными исследованиями, выявлены пробелы в обобщении и систематизации данных о применении отходов цитрусовых, а также в создании инструментов для прогнозирования на основе этих данных. Особое внимание следует уделить исследованиям об эффективности комбинированных методов экстракции, таких как ультразвуковая экстракция с применением электрохимически активированных растворов. Также важно продолжать исследования, направленные на разработку практических приложений экстрактов, полученных из отходов, и изучение их влияния на свойства конечных продуктов.

4. Изучение возможностей по включению экстрактов вторичных продуктов переработки цитрусовых растений в различные блюда и продукты, а также оценка их сенсорных и питательных характеристик станет важным направлением для будущих исследований. Полученные в ходе обзора данные могут служить основой для проектирования экспериментов, посвя-

щенных изучению свойств и методов получения эфирных масел и других биологически активных соединений из отходов цитрусовых.

5. Особое значение имеет исследование щадящих методов экстракции, которые обеспечивают сохранение биоактивных компонентов при минимальных энергетических затратах. Это требует более глубокого изучения вторичной переработки отходов овощей и фруктов, а также повышения осведомленности производителей о принципах экономики замкнутого цикла и способах их внедрения в производственные процессы.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы / References

1. Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. (2020). A closed-loop packaging network design model to foster infinitely reusable and recyclable containers in food industry. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.06.014>. EDN: <https://elibrary.ru/IOUVHP>
2. Ademosun, A. O. (2022). Citrus peels odyssey: From the waste bin to the lab bench to the dining table. *Applied Food Research*, 2(1), 100083. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100083>. EDN: <https://elibrary.ru/AIUUTS>
3. Andrade, M. A., Barbosa, C. H., Shah, M. A., Ahmad, N., Vilarinho, F., Khwaldia, K., Ana, S., & Ramos, F. (2022). Citrus by-products: Valuable source of bioactive compounds for food applications. *Antioxidants*, 12(1), 38. <https://doi.org/10.3390/antiox12010038>. EDN: <https://elibrary.ru/FBFNXX>
4. Ben Hsouna, A., Sadaka, C., Generalić Mekinić, I., Garzoli, S., Švarc-Gajić, J., Rodrigues, F., & Mnif, W. (2023). The chemical variability, nutraceutical value, and food-industry and cosmetic applications of citrus plants: A critical review. *Antioxidants*, 12(2), 481. <https://doi.org/10.3390/antiox12020481>. EDN: <https://elibrary.ru/ZQMKOW>
5. Casas Cardoso, L., Cejudo Bastante, C., Mantell Serrano, C., & Martínez de la Ossa, E. J. (2022). Application of citrus by-products in the production of active food packaging. *Antioxidants*, 11(4), 738. <https://doi.org/10.3390/antiox11040738>. EDN: <https://elibrary.ru/DDCCBY>
6. Castro, L. A. D., Lizi, J. M., Chagas, E. G. L. D., Carvalho, R. A. D., & Vanin, F. M. (2020). From orange juice by-product in the food industry to a functional ingredient: Application in the circular economy. *Foods*, 9(5), 593. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1003144>. EDN: <https://elibrary.ru/XEDFAB>
7. Di Salvo, E., Lo Vecchio, G., De Pasquale, R., De Maria, L., Tardugno, R., Vadalà, R., & Cicero, N. (2023). Natural pigments production and their application in

- food, health and other industries. *Nutrients*, 15(8), 1923. <https://doi.org/10.3390/nu15081923>. EDN: <https://elibrary.ru/ACIMXP>
8. Gholipour, A., Sadegheih, A., Mostafaeipour, A., & Fakhrzad, M. B. (2024). Designing an optimal multi-objective model for a sustainable closed-loop supply chain: A case study of pomegranate in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26(2), 3993–4027. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02868-5>. EDN: <https://elibrary.ru/SUGXKD>
 9. Jagadiswaran, B., Alagarsan, V., Palanivelu, P., Theagarajan, R., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Valorization of food industry waste and by-products using 3D printing: A study on the development of value-added functional cookies. *Future Foods*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100036>. EDN: <https://elibrary.ru/BDZDKZ>
 10. Kim, I. J., Jeong, D., & Kim, S. R. (2022). Upstream processes of citrus fruit waste biorefinery for complete valorization. *Bioresource Technology*, 362, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127776>. EDN: <https://elibrary.ru/OTTOGK>
 11. Kute, A. B., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N., Giri, S. K., & Sawant, B. P. (2020). Characterization of pectin extracted from orange peel powder using microwave-assisted and acid extraction methods. *Agricultural Research*, 9, 241–248. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00419-5>. EDN: <https://elibrary.ru/MGKKDQ>
 12. Kumar, M., Tomar, M., Saurabh, V., Mahajan, T., Punia, S., del Mar Contreras, M., & Kennedy, J. F. (2020). Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 223–237. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>. EDN: <https://elibrary.ru/JGROHU>
 13. Lalander, C., & Vinnerås, B. (2022). Actions needed before insects can contribute to a real closed-loop circular economy in the EU. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(4), 337–342. <https://doi.org/10.3920/JIFF2022.x003>. EDN: <https://elibrary.ru/DBXWZG>
 14. Lang, L., Wang, Y., Chen, X., Zhang, Z., Yang, N., Xue, B., & Han, W. (2020). Awareness of food waste recycling in restaurants: Evidence from China. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104949. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104949>. EDN: <https://elibrary.ru/PMKBJL>
 15. Lasunon, P., & Sengkhamparn, N. (2022). Effect of ultrasound-assisted, microwave-assisted and ultrasound-microwave-assisted extraction on pectin extraction from industrial tomato waste. *Molecules*, 27(4), 1157. <https://doi.org/10.3390/molecules27041157>. EDN: <https://elibrary.ru/KEBLPK>
 16. Liao, Y., Kaviyani-Charati, M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Diabat, A. (2020). Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 199–220. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.001>. EDN: <https://elibrary.ru/OOKYJT>

17. Maqbool, Z., Khalid, W., Atiq, H. T., Koraqi, H., Javaid, Z., Alhag, S. K., Laila A., Bader, D., Mohammed A., Mohamed Af., & Al-Farga, A. (2023). Citrus waste as source of bio-active compounds: Extraction and utilization in health and food industry. *Molecules*, 28(4), 1636. <https://doi.org/10.3390/molecules28041636>. EDN: <https://elibrary.ru/QGYTBR>
18. Mahato, N., Sharma, K., Sinha, M., Baral, E. R., Koteswararao, R., Dhyani, A., Cho, MH., & Cho, S. (2020). Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: A review. *Journal of Advanced Research*, 23, 61–82. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.01.007>. EDN: <https://elibrary.ru/UXVEDU>
19. Matsuo, Y., Akita, K., Taguchi, H., Fujii, S., Yoshie-Stark, Y., & Araki, T. (2022). Utilization and evaluation of *Citrus natsudaiddai* peel waste as a source of natural food additives. *Food Chemistry*, 373, 131464. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131464>. EDN: <https://elibrary.ru/KCELQX>
20. Mosallanezhad, B., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Triki, C. (2021). Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft Computing*, 25, 7399–7422. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05698-1>. EDN: <https://elibrary.ru/HNKDQX>
21. Narisetty, V., Cox, R., Willoughby, N., Aktas, E., Tiwari, B., Matharu, A. S., & Kumar, V. (2021). Recycling bread waste into chemical building blocks using a circular biorefining approach. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(19), 4842–4849. <https://doi.org/10.1039/D1SE00575H>. EDN: <https://elibrary.ru/LBEOWN>
22. Novais, C., Molina, A. K., Abreu, R. M., Santo-Buelga, C., Ferreira, I. C., Pereira, C., & Barros, L. (2022). Natural food colorants and preservatives: A review, a demand, and a challenge. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(9), 2789–2805. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07533>. EDN: <https://elibrary.ru/FZSJQW>
23. Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 765–801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>. EDN: <https://elibrary.ru/SKGTGG>
24. Petrunina, I. V., & Gorbunova, N. A. (2024). Using the model of closed-loop economy in certain branches of the agro-industrial complex. *Food Systems*, 7(2), 231–237. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-231-237>. EDN: <https://elibrary.ru/VVKQTW>
25. Pinotti, L., Luciano, A., Ottoboni, M., Manoni, M., Ferrari, L., Marchis, D., & Tretola, M. (2021). Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126290>. EDN: <https://elibrary.ru/JFAJTU>
26. Roy, S., Priyadarshi, R., Łopusiewicz, Ł., Biswas, D., Chandel, V., & Rhim, J. W. (2023). Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. *International Journal of Biologi-*

- cal Macromolecules*, 239, 124248. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124248>. EDN: <https://elibrary.ru/XDVICZ>
27. Russo, C., Maugeri, A., Lombardo, G. E., Musumeci, L., Barreca, D., Rapisarda, A., Cirmi, S., & Navarra, M. (2021). The second life of Citrus fruit waste: A valuable source of bioactive compounds. *Molecules*, 26(19), 5991. <https://doi.org/10.3390/molecules26195991>. EDN: <https://elibrary.ru/EJNEUH>
 28. Shorbagi, M., Fayek, N. M., Shao, P., & Farag, M. A. (2022). *Citrus reticulata* Blanco (the common mandarin) fruit: An updated review of its bioactive, extraction types, food quality, therapeutic merits, and bio-waste valorization practices to maximize its economic value. *Food Bioscience*, 47, 101699. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101699>. EDN: <https://elibrary.ru/PTRZSF>
 29. Sabanci, S., Çevik, M., & Göksu, A. (2021). Investigation of time effect on pectin production from citrus wastes with ohmic heating assisted extraction process. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), e13689. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13689>. EDN: <https://elibrary.ru/GMZDOY>
 30. Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Gaur, V. K., Farooqui, A., Varjani, S., & Younis, K. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351, 127064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064>. EDN: <https://elibrary.ru/XSRSGF>
 31. Simonetto, M., Sgarbossa, F., Battini, D., & Govindan, K. (2022). Closed loop supply chains 4.0: From risks to benefits through advanced technologies. A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 253, 108582. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108582>. EDN: <https://elibrary.ru/UIFNWD>
 32. Twinomuhwezi, H., Godswill, A. C., & Kahunde, D. (2023). Extraction and characterization of pectin from orange (*Citrus sinensis*), lemon (*Citrus limon*) and tangerine (*Citrus tangerina*). *American Journal of Physical Sciences*, 1(1), 17–30. <https://doi.org/10.47604/ajps.1049>. EDN: <https://elibrary.ru/ISENAQ>
 33. Visakh, N. U., Pathrose, B., Chellappan, M., Ranjith, M. T., Sindhu, P. V., & Mathew, D. (2022). Chemical characterisation, insecticidal and antioxidant activities of essential oils from four *Citrus* spp. fruit peel waste. *Food Bioscience*, 50, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102163>. EDN: <https://elibrary.ru/YFDANI>
 34. Yadav, V., Sarker, A., Yadav, A., Miftah, A. O., Bilal, M., & Iqbal, H. M. (2022). Integrated biorefinery approach to valorize citrus waste: A sustainable solution for resource recovery and environmental management. *Chemosphere*, 293, 133459. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133459>. EDN: <https://elibrary.ru/JNGZTJ>
 35. Zhang, C., Zhu, X., Zhang, F., Yang, X., Ni, L., Zhang, W., & Zhang, Y. (2020). Improving viscosity and gelling properties of leaf pectin by comparing five pectin extraction methods using green tea leaf as a model material. *Food Hydrocolloids*, 98, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105246>. EDN: <https://elibrary.ru/HHYZHN>

36. Zoghi, A., Vedadi, S., Esfahani, Z. H., Gavligi, H. A., & Khosravi-Darani, K. (2021). A review on pectin extraction methods using lignocellulosic wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02062-z>. EDN: <https://elibrary.ru/QEXGBX>
37. Yun, D., & Liu, J. (2022). Recent advances on the development of food packaging films based on citrus processing wastes: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133459>. EDN: <https://elibrary.ru/FZTPCV>

ВКЛАД АВТОРОВ

Суворов О.А.: внес существенный вклад в разработку концепции и дизайна работы, принимал участие в сборе, анализе и интерпретации полученных данных.

Кандроков Р.Х.: принимал участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Песоцкая Д.А.: принимала участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Николаева Ю.В.: принимала участие в написании статьи и ее редактировании с целью повышения ее научной значимости.

Шанк М.А.: принимал участие в написании статьи и внесение итоговых правок в рукопись, и формирование итоговой редакции.

Все авторы окончательно одобрили версию работы, которая будет опубликована, при этом авторы несут ответственность и гарантируют, что все вопросы, связанные с точностью или единством всех частей работы, проработаны и разрешены.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Oleg A. Suvorov: made a significant contribution to the development of the concept and design of the study; participated in the collection, analysis, and interpretation of the data.

Roman H. Kandrov: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Daria A. Pesotskaya: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Yulia V. Nikolaeva: participated in the writing and editing of the article to enhance its scientific significance.

Mikhail A. Shank: contributed to the writing of the article, made final revisions to the manuscript, and prepared the final draft.

All authors have given their final approval of the version of the work to be published, and the authors are responsible for and guarantee that all issues related to the accuracy or consistency of all parts of the work have been addressed and resolved.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Суворов Олег А., профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

SuvorovOA@ya.ru

Кандрок Роман Х., доцент кафедры технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой продукции

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Российская Федерация

nart132007@mail.ru

Песоцкая Дарья А., магистр кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

darya.khlopkova@mail.ru

Николаева Юлия В., доцент кафедры биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза

Университет РОСБИОТЕХ

Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

NikolaevaYV@mgupp.ru

Шанк Михаил А., аспирант кафедры “Биофизика” биологического факультета

МГУ имени М.В.Ломоносова; Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэнь

Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Российская Федерация; ул. Гоцзидасюеюань, 1, Даюньсиньчэн, район Лунган, г. Шэньчжэнь, Провинция Гу-

андун, Китайская Народная Республика

mikhailshank@gmail.com

DATA ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Suvorov, Professor, Department of Food Industry, Hotel Business and Service

Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)

11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation

SuvorovOA@ya.ru

SPIN-code: 8979-2000

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2100-0918>

Researcher ID: W-1014-2017

Author Scopus ID: 23482727600

Roman H. Kandrov, Associate Professor, Department of Technology of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Plant Products
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy
49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation
nart132007@mail.ru
SPIN-code: 7081-1209
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-2918>
Researcher ID: ID AAX-2106-2020
Scopus Author ID: 57200383950

Daria A. Pesotskaya, Master of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service
Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)
11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation
darya.khlopkova@mail.ru

Yulia V. Nikolaeva, Associate Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products
Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)
11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation
NikolaevaYV@mgupp.ru
SPIN-code: 2264-2190
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2961-8942>
Researcher ID: ID E-5926-2018
Author Scopus ID: 57220003151

Mikhail A. Shank, Ph.D. candidate in the Department of Biophysics, Faculty of Biology
Lomonosov Moscow State University; MSU-PPI University in Shenzhen
1, Leninsky Hills, Moscow, 119991, Russian Federation; 1, International University Park Road, Dayun New Town, Longgang District, Shenzhen, Guangdong Province, P.R. China
mikhailshank@gmail.com
SPIN-code: 1121-8888
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2823-5680>

Поступила 09.08.2025

После рецензирования 21.10.2025

Принята 12.11.2025

Received 09.08.2025

Revised 21.10.2025

Accepted 12.11.2025