

БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ/BIOTECHNOLOGY OF FOOD AND BIOLOGICAL ACTIVE SUBSTANCESDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55> EDN: RKTUVV**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКАПСУЛ И ЛИПОСОМ С РАСТИТЕЛЬНЫМИ ЭКСТРАКТАМИ В КАЧЕСТВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ**

Научная статья

Александрова И.В.^{1,*}, Лопатко В.В.², Аллох П.³, Сорокина А.С.⁴, Бараненко Д.А.⁵¹ORCID : 0000-0002-6598-3541;³ORCID : 0000-0002-4954-9470;⁴ORCID : 0000-0003-0328-550X;⁵ORCID : 0000-0002-9284-4379;^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (irina.ale98[at]mail.ru)

Предложена: 25.03.2026; Принята: 07.10.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

В статье рассматривали варианты инкапсулирования экстракта соцветий *Brassica oleracea* var. *italica* и экстракта корня *Reynoutria japonica* для создания функциональных пищевых ингредиентов. Объектами изучения были выбрано растительное сырье *Brassica oleracea* var. *italica* и *Reynoutria japonica*, согласно литературным данным, содержащие ресвератрол и глюкозинолаты в большом количестве. Первоначально проводилось исследование содержания биологически активных веществ (БАВ) в экстрактах корня горца японского и соцветий брокколи с применением методов спектрофотометрии и ВЭЖХ-ДМД. Установлено содержание в экстракте горца японского БАВ: флавоноидов, ресвератролозида, транс-ресвератрола, а в экстрактах соцветий брокколи: содержание флавоноидов и глюкозинолатов. Полученный экстракт из соцветия брокколи инкапсулировали методом со-экструзии при помощи оборудования BuchiB-390, а экстракт из горца японского методом сублимационной сушки с 10% мальтодекстрином. Инкапсулирование экстрактов в микрокапсулы и липосомы позволило определить биодоступность инкапсулированных БАВ в составе функциональных ингредиентов в условиях ЖКТ *in vitro*. Таким образом, включение ресвератрол-содержащих компонентов в состав функционального пищевого ингредиента с использованием липосомального инкапсулирования обеспечило переход более 60% БАВ в устойчивую инкапсулированную форму, при этом содержание глюкозинолатов и прочих БАВ в альгинатных микрокапсулах составляло до 85%. Стабильность инкапсулированных форм БАВ как в липосомах, так и в альгинатных капсулах сохранялась в течение 3 недель при 23 ± 1 °С. На основе данных по оценке органолептических показателей, рекомендуется внесение исследуемых ингредиентов в конкретные пищевые продукты в количестве от 0,8 до 1,6 г липосом и до 3% микрокапсул, обеспечивая функциональность исследуемых продуктов без ухудшения их потребительских свойств. На основе полученных результатов, подтверждается вероятность практического применения альгинатных микрокапсул с экстрактом соцветий брокколи и липосом с экстрактом горца японского в составе функциональных пищевых продуктов.

Ключевые слова: функциональный ингредиент, биодоступность, инкапсулирование, БАВ, брокколи, горец японский, липосомы, микрокапсулы.

A STUDY OF MICROCAPSULES AND LIPOSOMES CONTAINING PLANT EXTRACTS AS FUNCTIONAL FOOD INGREDIENTS

Research article

Aleksandrova I.V.^{1,*}, Lopatko V.V.², Allokh P.³, Sorokina A.S.⁴, Baranenko D.A.⁵¹ORCID : 0000-0002-6598-3541;³ORCID : 0000-0002-4954-9470;⁴ORCID : 0000-0003-0328-550X;⁵ORCID : 0000-0002-9284-4379;^{1, 2, 3, 4, 5} National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (irina.ale98[at]mail.ru)

Suggested: 25.03.2026; Accepted: 07.10.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The article examined methods of encapsulating extracts of the inflorescences of *Brassica oleracea* var. *italica* and the root of *Reynoutria japonica* to create functional food ingredients. The plant materials selected for study were *Brassica oleracea* var. *italica* and *Reynoutria japonica*, which, according to the literary data, contain large amounts of resveratrol and glucosinolates. Initially, the content of biologically active substances (BAS) in the extracts of Japanese knotweed root and broccoli inflorescences was studied using spectrophotometry and HPLC-DAD methods. The content of BAS in the Japanese knotweed extract was determined to include flavonoids, resveratrolsides and trans-resveratrol, while the broccoli inflorescence extracts were found to contain flavonoids and glucosinolates. The broccoli inflorescence extract was encapsulated by co-

extrusion using a Buchi B-390 system, whilst the Japanese knotweed extract was encapsulated by freeze-drying with 10% maltodextrin. Encapsulation of the extracts into microcapsules and liposomes made it possible to determine the bioavailability of the encapsulated bioactive compounds within the functional ingredients under *in vitro* gastrointestinal conditions. Thus, the incorporation of resveratrol-containing components into a functional food ingredient using liposomal encapsulation ensured that more than 60% of the bioactive compounds were converted into a stable encapsulated form, with the content of glucosinolates and other bioactive compounds in the alginate microcapsules reaching up to 85%. The stability of the encapsulated forms of biologically active substances, both in liposomes and in alginate capsules, was maintained for 3 weeks at 23 ± 1 °C. Based on the data from the assessment of organoleptic parameters, it is recommended that the studied ingredients be incorporated into specific food products in amounts ranging from 0,8 to 1,6 g of liposomes and up to 3% of microcapsules, thereby ensuring the functionality of the studied products without compromising their consumer properties. Based on the obtained results, the feasibility of the practical application of alginate microcapsules containing broccoli flower extract and liposomes containing Japanese knotweed extract in functional food products is confirmed.

Keywords: functional ingredient, bioavailability, encapsulation, BAS, broccoli, Japanese knotweed, liposomes, microcapsules.

Введение

Разработка функциональных пищевых продуктов в настоящее время ориентирована не только на повышение содержания биологически активных веществ (БАВ), но и на обеспечение их стабильности и высокой биодоступности в составе пищевых матриц. Многие фитохимические соединения, обладающие выраженной антиоксидантной и протекторной активностью, характеризуются низкой устойчивостью к воздействию технологических факторов (температура, кислород, свет) и условиям желудочно-кишечного тракта, что существенно ограничивает их практическое применение в пищевой промышленности [1].

Соцветия брокколи (*Brassica oleracea* var. *italica*) являются ценным источником биологически активных веществ, прежде всего глюкозинолатов, из которых в процессе гидролиза образуется сульфорафан. Данное соединение проявляет выраженные антиоксидантные свойства и рассматривается как перспективный компонент функционального питания благодаря способности активировать системы клеточной защиты [2]. Кроме того, брокколи содержит фенольные соединения, усиливающие её антиоксидантный потенциал. Вместе с тем биологически активные компоненты брокколи чувствительны к температуре и изменениям кислотности среды, что может приводить к их частичной деградации при технологической обработке пищевого сырья [3].

Экстракты *Reynoutria japonica* представляют интерес как источник стильбенов, прежде всего ресвератрола и его гликозидной формы — полидатына. Ресвератрол обладает антиоксидантной, противовоспалительной и гепатопротекторной активностью [4]. Вместе с тем для него характерны низкая водорастворимость и выраженный эффект пресистемного метаболизма, что обуславливает ограниченную биодоступность при пероральном поступлении [5].

В связи с этим особую актуальность приобретает применение различных способов инкапсулирования, направленных на защиту чувствительных соединений, повышение их стабильности и обеспечение контролируемого высвобождения в желудочно-кишечном тракте. Два перспективных способа инкапсулирования, которые в настоящее время активно развиваются — микроэкструзия в альгинаты и образование липосом под действием ультразвука. Альгинаты — природные анионные полисахариды бурых водорослей — применяются для формирования гелеобразных микрокапсул, обеспечивающих барьерную защиту инкапсулированных компонентов и возможность регулирования кинетики высвобождения [6]. Липосомальные системы представляют собой форму доставки, с помощью которой можно инкапсулировать как гидрофильные, так и липофильные молекулы. Липосомальные системы рассматриваются как эффективная платформа для повышения растворимости, защиты от окисления и улучшения абсорбции полифенолов, включая ресвератрол [4]. Важным аспектом, определяющим промышленную реализуемость данного способа, является возможность получения стабильного при хранении порошка липосом с использованием как сублимационной, так и распылительной сушки [7], [8]. Каждый из способов инкапсулирования имеет свои достоинства и ограничения, и может быть использован под конкретные задачи, объемы выпуска и виды функциональных продуктов.

Цель работы — исследование вариантов инкапсулирования экстракта соцветий *Brassica oleracea* var. *italica* и экстракта корня *Reynoutria japonica* для создания функциональных пищевых ингредиентов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: исследовать содержание БАВ в экстрактах корня горца японского и соцветиях брокколи; выполнить и охарактеризовать инкапсулирование экстрактов в микрокапсулы и липосомы для использования в качестве функциональных пищевых ингредиентов; определить биодоступность инкапсулированных БАВ в составе функциональных ингредиентов в условиях ЖКТ *in vitro*; исследовать показатели качества и безопасности полученных функциональных пищевых ингредиентов; выбрать дозировки внесения функциональных пищевых ингредиентов и определить их влияние на органолептические характеристики пищевых продуктов.

Методы и принципы исследования

Исследования проводились в Университете ИТМО на базе лабораторий Мегафакультета наук о жизни, а также международного научного центра «Биотехнологии третьего тысячелетия».

Объектом исследования выступало растительное сырье: высушенные соцветия брокколи сорта *Brassica oleracea* var. *italica* (Волгоградская область, Россия) и корень горца японского (*Reynoutria japonica*), собранный на территории Кавказского государственного природного биосферного заповедника имени Х.Г. Шапошникова (г. Сочи, Россия) при соглашении с лесничеством и заповедником. Соцветия брокколи сушили при 45 °C в течение 24 ч, корни горца

японского при 50 °С в течение 12 ч. Измельчение высушенных образцов проводилось с использованием режущей мельницы (Retsch SM 100). После процесса измельчения проводился отбор полученных частиц размером не более 500 мкм ситовым методом. Полученные образцы измельченного сухого растительного сырья хранились в герметичных светонепроницаемых емкостях в течение 6 месяцев.

Для получения экстрактов брокколи и горца использовали 70%-ную водно-этанольную смесь. Экстракцию проводили в ультразвуковой ванне (Град 28–35). Экстракт из сухих соцветий брокколи получали при параметрах: мощность 35 кГц и 100 Вт, время 30 с, температура 21 °С, гидромодуль 1:25. Данные параметры были ранее получены путём трехфакторной оптимизации и нахождения уравнения регрессии [9]. Экстракт корня горца японского получали при параметрах: мощность 35 кГц и 110 Вт, время 45 мин, температура 35 °С, гидромодуль 1:20. Навеску измельченного сырья помещали в колбу, приливая рассчитанный объем экстрагента. Экстракцию проводили при заданных параметрах мощности и продолжительности согласно матрице планирования эксперимента. По окончании процесса полученные экстракты фильтровали под вакуумом через бумажный фильтр «синяя лента». Фильтрат количественно переносили в мерную колбу и доводили до метки соответствующим растворителем. Полученные растворы использовали для дальнейшего анализа.

Анализ БАВ выполняли с применением высокоэффективной жидкостной хроматографии с диодно-матричным детектором — ВЭЖХ-ДМД (Shimadzu LC-20, детектор SPD-M20A, колонка Supelco C18) и спектрофотометрическим методом (Shimadzu UV-2600) с реактивом Фолина-Чокальтеу. Условия ВЭЖХ-ДМД: режим градиентный 0–30 мин — 10-35% растворитель В, 30–40 мин — 70% растворитель В; растворитель А — 0,025% трифторуксусная кислота, растворитель В — ацетонитрил; скорость потока 0,8 мл/мин; длина детектирования 306 нм. Для проведения колориметрической реакции аликвоту 1 мл исследуемого экстракта вносили в мерную колбу объемом 25 мл, после чего добавляли реактив Фолина-Чокальтеу (1:10) в пятикратном разведении. Через 5 мин в систему вводили 7%-ный раствор карбоната натрия в том же объеме и тщательно перемешивали. Содержимое колбы доводили до метки экстрагентом и выдерживали в темноте в течение 2 ч для проведения реакции. Интенсивность окраски регистрировали спектрофотометрически при 765 нм [8].

Количественное определение флавоноидов проводили по аналогичной методике с использованием в качестве комплексообразователя хлорида алюминия. Интенсивность окраски регистрировали спектрофотометрически при 420 нм.

Для оценки антиоксидантной активности использовали способность антиоксидантов нейтрализовать свободные радикалы, при использовании реактива DPPH или 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил. Раствор DPPH в этаноле использовали в концентрации 0,01 ммоль/л. Раствор DPPH в объеме 3,9 мл приливали к 0,1 мл каждого экстракта и оставляли на 15 мин в темном месте. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре (Shimadzu UV-2600) при длине волны 517 нм. Степень ингибирования свободных радикалов рассчитывали по формуле (1):

$$AOA = ((A_0 - A_x) / A_0) \cdot 100\%,$$

где A_0 — оптическая плотность исходного раствора DPPH; A_x — оптическая плотность анализируемого раствора.

Инкапсулирование БАВ из экстрактов горца японского проводили в несколько этапов. Первым этапом концентрировали водно-этанольный 70% экстракт на ротационном вакуумном испарителе (Buchi Rotavapor R-300). Затем полученный водный экстракт (40 мл) смешивали с раствором 2% лецитина в ацетатном буфере (60 мл). После чего смесь диспергировали (T 25 ULTRA-TURRAX) 10 мин при 10000 об/мин и проводили ультразвуковую гомогенизацию (Bandelin Sonopuls mini20) в течение 30 мин переменным импульсом. Полученные липосомальные капсулы замораживали при -80 °С в течение 12 ч, а затем лиофилизировали (Buchi Lyovapor L-200 Pro) в течение 24 ч при 25 Па.

Процесс инкапсулирования экстрактов брокколи также состоял из нескольких этапов. Инкапсулирование экстракта брокколи (*Brassica oleracea* var. *italica*) осуществляли методом ионного гелеобразования. В качестве матричного полимера использовали 2% (w/v) раствор альгината натрия, в который вносили 100 мл экстракта брокколи и 100 мл масла микроводорослей. Полученную эмульсию инкапсулировали методом ионного гелеобразования в 4% (w/v) растворе хлорида кальция. Таким образом, состав исследуемого образца включал альгинат натрия (2%), экстракт брокколи (100 мл), масло микроводорослей (100 мл) и раствор CaCl_2 (4%) в качестве сшивающего агента. Полученные капсулы отделяли фильтрованием, промывали дистиллированной водой и сушили до постоянной массы. В ходе проведения процесса инкапсулирования наблюдалось образование ярко-зеленых капсул, а наружный раствор практически не окрашивался.

Для определения эффективности инкапсулирования полученных жидких и лиофилизированных липосом, жидкую смесь липосом центрифугировали (Eppendorf MiniSpin) в течение 2 ч при 13300 об/мин. Лиофилизированные восстанавливали в ацетатном буфере и аналогично центрифугировали. Супернатант отделяли от липосом. Осажденные липосомы разрушали с помощью хлороформа и метанола 1 к 1, ожидая полного растворения.

Эффективность липосомального инкапсулирования рассчитывали по формуле (2):

$$EE\% = (m_1 - m_2) / m_1,$$

где m_1 — общая масса флавоноидов (в пересчете на кверцетин)/общая масса стильбенов (в пересчете на ресвератрол), мг; m_2 — масса свободных флавоноидов/стильбенов, находящихся в супернатанте, мг.

Эффективность инкапсулирования микрокапсул с брокколи оценивали по сохранности БАВ после их формирования. В качестве аналитических показателей использовали суммарное содержание фенольных соединений и общее содержание глюкозинолатов. Количество фенольных соединений определяли спектрофотометрическим методом с применением реактива Фолина-Чокальтеу. Результаты выражали в пересчете на галловую кислоту. Содержание глюкозинолатов определяли аналогичным спектрофотометрическим методом с использованием гексацианоферрата(III) калия в качестве комплексообразователя; расчет проводили в пересчете на синигрин.

Эффективность инкапсулирования (E , %) рассчитывали по формуле (3), как отношение суммарного содержания БАВ, обнаруженных в капсулах, к их количеству в исходной смеси для инкапсулирования:

$$E = \frac{n_1}{n_2} \cdot 100\%,$$

где n_1 — общее содержание фенольных соединений (в пересчете на галловую кислоту) или глюкозинолатов (в пересчете на синигрин), определённое во всех полученных капсулах; n_2 — суммарное содержание соответствующих соединений в исходной смеси, предназначенной для инкапсулирования.

Для анализа 1 г микрокапсул растворяли в 2%-ном растворе цитрата натрия. Объем растворителя подбирали с учётом диаметра частиц: для капсул размером 300 и 400 мкм использовали 15-кратный объем, для капсул диаметром 200 мкм — 25-кратный. После полного растворения оболочки из полученных растворов отбирали аликвоты для проведения реакций комплексообразования. Оптическую плотность образовавшихся комплексов измеряли на спектрофотометре при соответствующих длинах волн.

Исследование биодоступности функционального пищевого ингредиента в капсульной и липосомальной формах проводили с помощью модели *in vitro*. Были приготовлены модельные растворы ротовой полости, желудочного сока и среды тонкого кишечника.

Эксперименты проводили с использованием модельного раствора, имитирующего ионный состав ротовой полости (140 ммоль/л NaCl и 5 ммоль/л KCl). Навеску лиофилизированных липосом массой 0,5 г вводили в 13,5 мл указанного раствора, после чего данную смесь помещали в лабораторный шейкер VXR basic Vibrax (IKA), со скоростью перемешивания 100 оборотов в минуту при 37 °C в течение 2 мин, после чего отбирали пробу на анализ. Затем к полученной смеси добавляли 4,5 мл модельного желудочного сока (состоящий из пепсина 144 мг с соляной кислотой, pH 2), после чего смесь инкубировали в течение 60 мин при постоянном перемешивании. По завершении инкубации отбирали вторую пробу в объеме 1 мл и вводили в систему 4,5 мл модельного кишечного сока (состоящий из фосфатного буфера, pH 7,5, содержащий 107 мг панкреатина и 116 мг солей свиной желчи). Смесь выдерживали в термостате 90 мин, после чего отбирали конечную аликвоту 1 мл для последующего анализа.

Биодоступность биологически активных веществ из микрокапсул оценивали в условиях, моделирующих последовательные отделы желудочно-кишечного тракта *in vitro* по ранее представленной методике [10]. На первом этапе 2 г микрокапсул смешивали с 2 мл базального физиологического раствора (140 ммоль/л NaCl и 5 ммоль/л KCl) и инкубировали при температуре $37 \pm 0,2$ °C в течение 2 мин при перемешивании 200 об/мин. Далее к смеси добавляли 4 мл раствора, моделирующего желудочный сок, и выдерживали при тех же условиях 2 ч. После этого вносили 8 мл раствора, имитирующего среду тонкого кишечника, и продолжали инкубацию в течение 3 ч при постоянном перемешивании. На каждом этапе из полученной системы отбирали аликвоты для последующего анализа.

Количество высвобожденных фенольных соединений и глюкозинолатов определяли спектрофотометрически и рассчитывали их содержание относительно исходной массы БАВ, внесенной с 2 г микрокапсул. Биодоступность *in vitro* выражали в процентах как отношение массы высвобожденных соединений к их общему содержанию в исследуемой пробе.

Для оценки установленных условий и сроков хранения ингредиента, полученные лиофилизированные липосомы и альгинатные микрокапсулы помещали в темную тару и хранили в темном прохладном месте последующие 3 недели при 23 ± 1 °C. По истечении времени, образцы анализировали на содержание биологически активных веществ с целью определения степени их сохранности и возможных потерь.

Была также проведена микробиологическая оценка функциональных ингредиентов. Общее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) определяли по ГОСТ 10444.15–94, бактерии группы кишечной палочки — по ГОСТ 31747–2012, плесени и дрожжи — по ГОСТ 10444.12–2013. В качестве питательных сред использовали питательный агар (для КМАФАнМ), агар Эндо (для БГКП) и агар Сабуро (для плесеней и дрожжей). Исследования выполняли для свежеполученных капсул и липосом, после их высушивания и по окончании 3 недель хранения. Дополнительно рассчитывали потери целевых БАВ на этапах сушки и хранения.

Полученные образцы подвергали органолептической для определения дозировки внесения инкапсулированного ингредиента в конечные продукты — творожный сыр и ряженку.

Для получения творожного сыра без стадии созревания использовали следующую рецептуру (из расчёта на 1000 мл молока). В качестве основного сырья применяли пастеризованное коровье молоко объёмом 1000 мл, соответствующее требованиям ГОСТ 32922-2014. Для сквашивания вносили бактериальную закваску CBL2 в количестве 10 мг (в соответствии с ГОСТ 32922-2014 на закваски для молочной продукции). С целью регулирования кислотности и улучшения консистенции добавляли поваренную пищевую соль (ГОСТ Р 51574-2000) в концентрации 1% от массы молока, а также хлорид кальция (ГОСТ 4161-77) в количестве 0,4% для активации сычужного фермента и усиления гелеобразования. Все ингредиенты использовали в строгом соответствии с действующими стандартами, что обеспечивало воспроизводимость технологических параметров и стабильность качества готового продукта.

Также использовали готовый пищевой продукт — ряженка «Большая кружка» 4%, производитель «Галактика» (Россия). Продукт изготавливается по ГОСТ 31455-2012 «Ряженка. Технические условия».

Органолептическая оценка микрокапсул и нанокапсул, внесенных в состав пищевых продуктов проводилась согласно ГОСТ ISO 6658-2016. С помощью слепых дегустаций десять отобранных испытателей описывали качества продукта согласно дескриптору, включающего в себя балльную оценку показателей качества и описание поставленной оценки, заполняя дегустационный лист. В качестве балльной шкалы была использована 5 балльная оценка, где 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 — удовлетворительно, 2 — плохо, 1 — очень плохо, что позволяло объективно оценить качество продукции.

Для определения количественных характеристик ингредиента использовали коэффициенты весомости. При расчете сумма всех коэффициентов должна быть равна 1.

Органолептическую оценку показателей качества продукта вычисляли по формуле (4):

$$K = \sum_{i=1}^n \left[\frac{m_{oi} k_{oi}}{k_{oi}^{\Sigma T}} \right],$$

где m_{oi} — коэффициент весомости каждого показателя; k_{oi} — значения показателей в каждой группе свойств; $k_{oi}^{\Sigma T}$ — значение эталонного показателя.

Продукт считается качественным, при высоком показателе K . Так продукты с показателем K выше 0,85 считаются отличными по качеству.

Все определения проводили не менее чем в трехкратной повторности. Результаты обрабатывали средствами математической статистики и признавали значимыми при $p < 0,05$.

Основные результаты и обсуждение

При создании пищевых ингредиентов функционального назначения уделяют особое внимание содержанию и сохранению биологически активных веществ в них. Так, фенольные соединения относятся к классу физиологически активных веществ, для которых характерна высокая активность: они обладают бактерицидным действием, проявляют Р-витаминную активность и выраженные антиоксидантные свойства. Количественный анализ с помощью ВЭЖХ-ДМД позволил установить, что основной группой полифенольных соединений в горце японском являются стильбены, а ресвератрол находился в связанной форме в виде гликозидов (рис. 1), обладающих более высокой биодоступностью по сравнению с чистым агликоном-ресвератролом [11], [12].

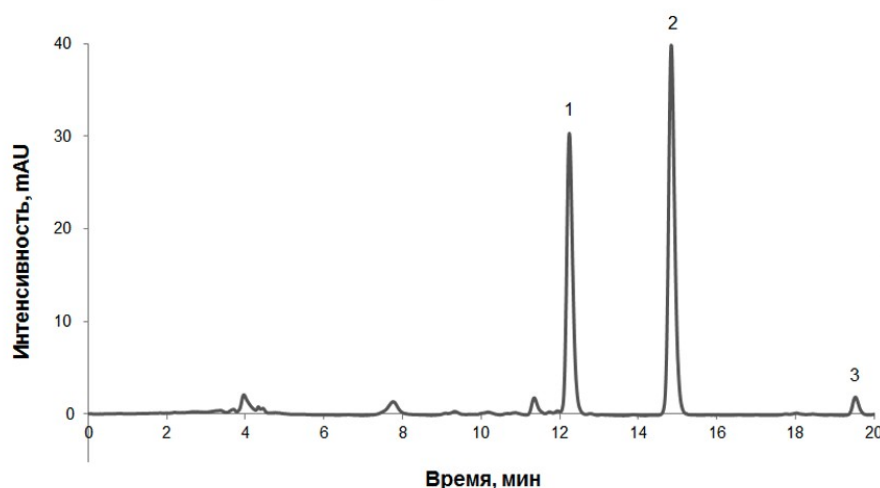


Рисунок 1 - Хроматограмма экстракта горца японского

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.1>

Примечание: 1 – ресвератролозид; 2 – полидастин; 3 – транс-ресвератрол

Глюкозинолаты являются одной из ключевых групп биологически активных соединений брокколи, определяющих ее функциональные свойства. Определение их содержания проводили методом молекулярной абсорбции, основанным на способности глюкозинолатов после предварительного щелочного гидролиза восстанавливать феррицианид в фосфатном буфере [13]. Образующиеся в ходе реакции тиоловые соединения легко окисляются, что сопровождается формированием окрашенных продуктов. Интенсивность окраски регистрировали спектрофотометрически, а концентрацию глюкозинолатов рассчитывали по калибровочному графику в пересчете на синигрин [13], [14]. Полученные результаты позволили количественно оценить содержание глюкозинолатов в исследуемых образцах и проследить их сохранность на различных этапах технологического процесса.

Также спектрофотометрически с помощью реактива Фолина-Чокальтеу было определено общее содержание полифенольных соединений в исследуемых экстрактах брокколи и горца японского. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Содержание БАВ и антиоксидантная активность экстрактов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.2>

Объект исследования	Сумма фенольных соединений, мг/100 г сухого вещества	Содержание флавоноидов, мг/100 г сухого вещества	АОА, %	Содержание БАВ, мг/г
Экстракт соцветий брокколи	169,7±2,3	30,2±1,1	38,1± 1,2	Глюкозинолаты 1,45±0,06
Экстракт корня	192,1 ± 3,1	31,8 ± 0,09	82,1 ± 1,4	Ресвератролозид

Объект исследования	Сумма фенольных соединений, мг/100 г сухого вещества	Содержание флавоноидов, мг/100 г сухого вещества	АОА, %	Содержание БАВ, мг/г
горца японского				3,48 ± 0,04 Транс-ресвератрол 0,180 ± 0,003

На основе данных химического анализа и наличия стильбенов в составе полифенольных соединений, была предложена липосомальная форма инкапсулирования БАВ горца японского. Инкапсулирование фенольных соединений, в особенности стильбенов, обеспечивает их защиту от окисления и сохранение биодоступности [15], [16]. В научном исследовании [17] применяли комбинаторный подход к созданию нанолипосом с ресвератролом, где сочетались методы тонкопленочной гидратации и ультразвукового воздействия. Полученные нанолипосомы с ресвератролом отличались стабильностью с интенсивностью инкапсулирования до 86% *in vitro*, повышенной антиоксидантной способностью без заметного цитотоксического воздействия по сравнению с чистым веществом, представляя собой потенциальную структуру для доставки БАВ и применения в пищевой промышленности [18].

Процесс инкапсулирования фенольных соединений включал концентрирование полученного экстракта, с последующим формированием липосом с помощью методики ультразвуковой гомогенизации и финальную лиофилизацию. В результате были получены липосомы с экстрактом горца японского в сухой лиофилизированной форме, представленные на рисунке 2А. Липосомы имеют желтоватую окраску, вызванную аддитивным пигментным вкладом исходных компонентов — раствора соевого лецитина и концентрата корневого экстракта со стильбенами. Полученные цветовые профили учитывались как критический параметр сенсорного соответствия при внесении ингредиентов в пищевые матрицы, поскольку сохранение эстетических и потребительских характеристик готовой продукции обеспечивает конкурентоспособность на рынке. Для инкапсулирования экстракта соцветий брокколи было решено использовать экструзию в раствор-отвердитель с получением альгинатных микрокапсул, которые характеризовались правильной сферической формой и ярко-зеленой окраской, обусловленной сохранением природных пигментов и полифенольных соединений экстракта. На рисунке 2С представлена оценка размеров полученных микрокапсул (микроскоп Полар-1), а на рисунке 2Б видна интенсивность цвета микрокапсул, что может рассматриваться как косвенный показатель сохранности БАВ [19], [20].

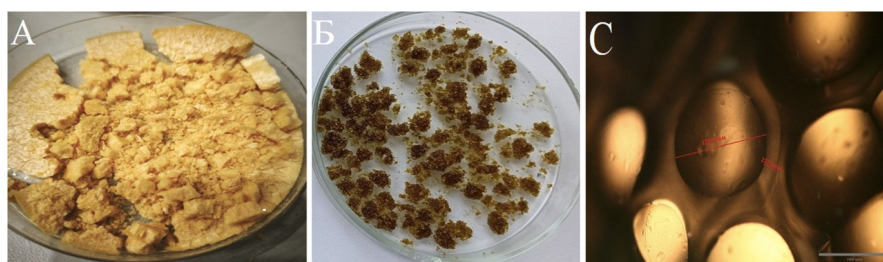


Рисунок 2 - Лيوфилизированные липосомы (А), микрокапсулы с экстрактом брокколи (Б) и оценка размера полученных микрокапсул (С)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.3>

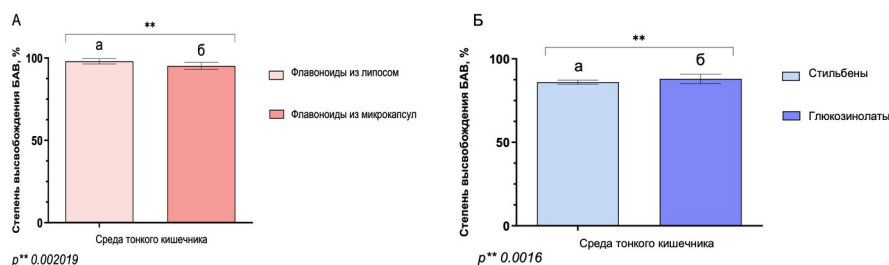
Эффективность инкапсулирования БАВ в составе полученных липосом и микрокапсул представлена в таблице 2. Сравнивая полученные данные, можно сказать, что эффективность инкапсулирования зависит от сложности состава действующих веществ [11]. Полученные значения сопоставимы с данными литературы по соответствующим типам инкапсулирования растительных экстрактов. Установлено, что степень удерживания действующих веществ определяется как условиями формирования частиц, так и сложностью компонентного состава экстракта. Многокомпонентная природа экстрактов обуславливает различия в распределении соединений внутри получаемых частиц и, как следствие, вариабельность показателя загрузки. В работе [21] подтверждалось, что процесс ко-экструзии позволяет получать стабильные микрокапсулы типа «ядро-оболочка», состоящие из гелеобразной оболочки из альгината и жидкого ядра без эмульсии, являясь эффективной модельной системой для инкапсулирования различных растительных компонентов и БАВ. Аналогично, в исследовании [22] отмечали приемлемость использования методов микроинкапсулирования (метод распыления/коагуляции) с целью сохранения антиоксидантной активности при использовании водных растительных экстрактов для повышения биологической активности различных пищевых продуктов (сыра).

Таблица 2 - Эффективность инкапсулирования БАВ экстракта горца японского в липосомах и экстракта соцветий брокколи в микрокапсулах

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.4>

БАВ горца японского	Флавоноидов	Стильбенов
Эффективность инкапсулирования, %	81,0 ± 1,6	62,0 ± 2,1
Содержание в липосомах, мг / г	1,78 ± 0,05	0,401 ± 0,007
Содержание в липосомах спустя 3 недели, 23 ± 1 °С, мг / 1 г	1,75 ± 0,04	0,398 ± 0,005
Размер частиц, нм	365 ± 5	
Индекс полидисперсности	0,232	
БАВ соцветий экстракта брокколи	Флавоноидов	Глюкозинолаты
Эффективность инкапсулирования, %	94,2 ± 1,7	84,7 ± 2,5
Содержание в микрокапсулах, мг / г	86,9 ± 1,4	10,8 ± 1,8
Содержание в микрокапсулах спустя 3 недели, 23 ± 1 °С, мг / 1 г	83,2 ± 1,2	9,6 ± 1,4
Размер капсул, мкм	1260 ± 5	

Для оценки биодоступности БАВ проводилось исследование на модельных растворах ЖКТ *in vitro*. В процессе исследования проводилось сравнение стабильности основных БАВ в экстрактах горца японского и брокколи при поэтапном переваривании и степени высвобождения представленных вариантов функциональных пищевых ингредиентов. Полученные данные представлены на рисунке 3.

Рисунок 3 - Динамика высвобождения БАВ в модельной системе *in vitro*:

А) флавоноидные соединения из липосом (а) и микрокапсул (б);

Б) стильбеновые соединения из липосом (а) и глюкозинолаты из микрокапсул (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.5>

При оценке липосомальных систем, отмечалось, что высвобождение стильбенов на этапах ротовой полости и желудка отсутствовало, обеспечивая защиту активных компонентов от преждевременного разрушения. Согласно полученным результатам, до 86% стильбенов высвобождалось в среде тонкого кишечника (рис. 3Б(а)), где происходит основная абсорбция полифенольных соединений. Также было определено, что на кишечной стадии модели ЖКТ *in vitro* происходило высвобождение до 98% флавоноидов. Полученные данные свидетельствуют об эффективности разработанных липосомальных носителей для транспорта групп метаболитов из корня горца японского.

Аналогичные эксперименты на моделях ЖКТ *in vitro* подтвердили, что альгинатные микрокапсулы с экстрактом брокколи обеспечивают высвобождение флавоноидов в среде тонкого кишечника 95,2% (рис. 3А(б)), при этом значительно повышая стабильности фенольных соединений (рис. 3Б(а)). Данное преимущество обусловлено структурными особенностями альгинатного геля: в кислой среде желудка (pH 1,5–2,5) альгинат кальция формирует плотную трёхмерную сетку за счёт ионных мостиков, которая служит эффективным диффузионным барьером для протонов и пищеварительных ферментов. Это замедляет проникновение гидролитических агентов к инкапсулированным полифенолам и снижает скорость их высвобождения в агрессивных условиях, благодаря чему значительная часть фенольных соединений сохраняется до достижения кишечного отдела. При переходе в среду с pH 6,5–7,5 происходит постепенное ослабление ионных связей, гель дезинтегрируется и обеспечивает контролируемое высвобождение полифенолов, что повышает их выход в кишечнике [19].

Для подтверждения сохранности БАВ при хранении липосом и микрокапсул образцы выдерживали при температуре 23 ± 1 °C в течение 3 недель в герметичных тарах. По истечении времени во всех образцах измеряли содержание БАВ. Данные представлены в таблице 2. Содержание БАВ в обоих видах систем доставки оставалось практически без изменений. В исследовании [23] сообщалось, что в пищевых продуктах, которые не подвергались воздействию высоких температур при хранении, липосомы с ресвератролом и свободными фитостеролами показали себя более эффективной системой для сохранения БАВ, чем их этерифицированные аналоги.

Результаты микробиологического анализа показали, что уровень КМАФАнМ в лиофилизированных липосомах и микрокапсулах не превышает 5×10^4 КОЕ/г, что соответствует требованиям ТР ТС 029/2012 к безопасности пищевых ингредиентов. В результате анализа БГКП, а также плесневые грибы и дрожжи обнаружены не были. Таким образом, продукт признан микробиологически безопасным для использования в качестве функционального пищевого ингредиента.

Оценку пригодности разработанных ингредиентов к использованию и их сравнительный анализ осуществляли на основе органолептических свойств капсул в составе ряженки и творожного сыра. Заявленные продукты выбраны по причине схожести цвета функциональных ингредиентов и возможного взаимодействия полифенолов и молочнокислых бактерий, что может способствовать усилению полезных для здоровья эффектов или подавлению роста патогенных микроорганизмов [16], [21]. Отмечается, что полифенолы способны подавлять широкий спектр патогенов и одновременно поддерживать рост пробиотических микроорганизмов, в то время как пробиотики в процессе ферментации осуществляют биотрансформацию полифенолов, повышая их биодоступность и сохраняя исходный фенольный профиль [24], [25]. В совокупности это создает значительный потенциал для разработки новых функциональных пищевых продуктов.

В соответствии с Методическими рекомендациями МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» суточной нормой адекватного потребления глюкозинолатов (индол-3-карбинол) 50 мг/сутки, а стильбенов 2 мг/сутки. Функциональным пищевым продуктом считается тот, в котором содержание функционального ингредиента варьирует в количестве от 15% до 50%. Образец без добавки (0%) использовали в качестве контрольного для обеспечения корректной сравнительной оценки полученных результатов. Липосомы вносили в количестве, обеспечивающем 16% и 32% адекватной суточной нормы потребления стильбенов на порцию ряженки 100 мл, что эквивалентно 0,32 мг и 0,64 мг ресвератрола и его гликозидов соответственно и 0,8 г и 1,6 г лиофилизированных липосом. Микрокапсулы с экстрактом брокколи вносили в творожный сыр в количестве 0, 1, 3 и 5% от массы продукта с целью установления закономерностей влияния дозировки функционального ингредиента на органолептические показатели продукта. Результаты оценки органолептических характеристик образцов творожного сыра, изготовленных без функционального ингредиента и с добавлением микрокапсул, как показано в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты определения органолептических показателей образцов творожного сыра без добавления функционального ингредиента и с добавлением (0 %, 1 %, 3 %, 5 %) микрокапсул

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.6>

Параметр оценивания	Органолептическая оценка			
	0 %	1 %	3 %	5 %
Образцы с микрокапсулами				
Общее впечатление	5*	4,6±0,4	4,6±0,5	4,5±0,5
Внешний вид	5*	4,7±0,4	4,5±0,5	4,4±0,6
Вкус	4,5±0,5	4,5±0,5	4,4±0,6	4,4±0,3
Запах	4,7±0,4	4,7±0,4	4,6±0,4	4,3±0,4
Консистенция	4,5±0,5	4,5±0,5	4,4±0,7	4,3±0,4

Примечание: на основе данных источника [1]

Концентрация 1% выбрана как минимально значимая с точки зрения проявления функциональных свойств и оценки порогового влияния на структуру и сенсорные характеристики. Уровень 3 % рассматривали как промежуточную технологически обоснованную дозировку, обеспечивающую выраженный эффект обогащения при сохранении потребительской приемлемости. Концентрация 5% для продукта с капсулами и 1,6 г для продукта с липосомами определена как верхний предел внесения, позволяющий оценить предельные изменения органолептических свойств без критического нарушения консистенции продукта. В 1 г капсул содержится 10,8 мг глюкозинолатов.

Органолептическая оценка показала различное воздействие добавок на сенсорные характеристики продуктов в зависимости от типа матрицы. Десяти отобраным испытателям, предлагалась дегустация по выбранным дескрипторам (общее впечатление, внешний вид, запах, вкус, консистенция) идентифицировать образцы с функциональными ингредиентами, указав их номер и доминирующие признаки в анкете. Почти 90% экспертов корректно распознали ряженку с добавкой, отметив в качестве ключевого отличия её слегка более желтоватый оттенок по сравнению с контрольным образцом. Отличительный желтоватый цвет пищевого ингредиента связан с

использованием лецитина и экстракта горца японского. Однако, согласно незначительным изменениям органолептических показателей качества в составе пищевой матрицы, полученные данные согласуются с результатами других исследователей. Например, в работе [26] все рецептуры с липосомами, включающие в себя экстракты семян чиа, имели минимальный синерезис, однако по оценкам органолептических свойств лидировал стандартный образец йогурта. Это демонстрирует, что обогащение продукта полезными ингредиентами часто идет вразрез с привычными вкусовыми стандартами [27]. В исследовании [28] липосомы с экстрактом граната также вносили в йогурт, и при органолептическом анализе были выявлены изменения цветовых и вкусовых характеристик продукта.

Таблица 4 - Результаты определения органолептических показателей образцов ряженки без добавления функционального ингредиента и с добавлением (0,8 % и 1,6 %) липосом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.55.7>

Параметр оценивания	Органолептическая оценка		
Образцы с липосомами	0%	0,8%	1,6%
Общее впечатление	5*	4,90±0,23	4,7±0,5
Внешний вид	4,8±0,3	4,8±0,3	4,90±0,23
Вкус	4,7±0,4	4,5±0,5	4,7±0,4
Запах	4,90±0,23	5*	4,90±0,23
Консистенция	4,90±0,23	5*	4,90±0,23

Примечание: * – между индивидуальными оценками дегустаторов различия не выявлены

Творожный сыр с ингредиентом распознали 85 % дегустаторов; по балльной шкале вкусовая оценка обогащенных образцов оказалась ниже, чем у образца ряженки с липосомальными капсулами. Органолептическая оценка показала, что образцы с внесением 1% и 3% микрокапсул сохраняли однородную кремообразную консистенцию, характерный кисломолочный вкус и аромат, однако при дозировке уже от 5% наблюдалось уплотнение текстуры и появление легкого растительного оттенка во вкусе готового продукта.

На основании комплексной оценки установлено, что рациональной является дозировка для творожного сыр 3% микрокапсул, обеспечивающая достижение функционального уровня без значимого ухудшения потребительских свойств. При добавлении липосомального пищевого ингредиента в количестве 0,8 и 1,6 г отмечается, что органолептические показатели изменяются незначительно, что подтверждает возможность его применения в пищевых продуктах в указанных дозах.

При сравнительном анализе установлено, что альгинатные микрокапсулы с экстрактом брокколи обеспечивают эффективную защиту глюкозинолатов и фенольных соединений при хранении и моделировании условий желудочно-кишечного тракта, а их внесение приемлемо для потребителя влияет на цвет и консистенцию творожного сыра, что делает данную форму удобной для использования в продуктах с нейтральными органолептическими характеристиками. В то время как липосомальная форма экстракта горца японского, напротив, продемонстрировала более высокую степень сохранности стильбенов (в том числе ресвератролозида и транс-ресвератрола) и улучшенную биодоступность *in vitro*, однако характеризуется выраженным бежево-коричневым оттенком, который следует учитывать при выборе пищевой матрицы [24], [28]. С учетом целевой задачи по повышению биодоступности малорастворимых фенольных соединений липосомальная система может быть охарактеризована как более предпочтительная для доставки стильбенов в составе функциональных продуктов, тогда как альгинатные микрокапсулы представляются более универсальной технологической платформой для обогащения широкого спектра пищевых продуктов, где критично сохранение привычных органолептических показателей.

Полученные данные подтверждают высокий внедренческий потенциал разработанных ингредиентов в пищевых системах. Минимальная заметность в ряженке на фоне улучшения вкусового профиля свидетельствует о перспективности применения липосом, как пищевого ингредиента, для функциональной обогащенности без ущерба для потребительских предпочтений. Микрокапсулы с экстрактом брокколи в дозировке до 3% оказались приемлемыми для использования в составе творожного сыра, что также подтверждает их технологическую совместимость.

Заключение

В результате проведенных исследований проводилась разработка функциональных пищевых ингредиентов на основе растительных экстрактов брокколи (*Brassica oleracea* var. *italica*) и горца японского (*Reynoutria japonica*). Основу составили флавоноиды, преимущественно соединения стильбенов и глюкозинолаты, успешно инкапсулированные в стабильные липосомальные формы (более 60%) и альгинатные микрокапсулы (85%). Основная доля стильбенов из липосом (86%) высвобождалась в среде тонкого кишечника, подтверждая эффективность липосомальной формы для доставки данной группы соединений. Альгинатные микрокапсулы также обеспечивали сохранность глюкозинолатов и флавоноидов, с их последующим высвобождением в среде тонкого кишечника. Стабильность инкапсулированных БАВ в обеих формах сохранялась в течение 3 недель хранения при температуре 23 ± 1 °C. Оценка органолептических показателей подтвердила отсутствие негативного влияния вносимых липосом (0,8–



1,6 г) и до 3% микрокапсул на характеристики качества ряженки и творожного сыра, соответственно. При этом данных дозирования обеспечивают 16–32% стильбенов и 40% глюкозинолатов от адекватной суточной нормы потребления.

В дальнейшем необходимо проведение комплексных исследований, направленных на углубленное изучение механизмов абсорбции, транспорта и метаболизма инкапсулированных биологически активных веществ. Особое внимание необходимо уделить фармакокинетическим параметрам систем доставки в ходе *in vivo* экспериментов. Кроме того, требуется разработка нормативно-технической документации, обеспечивающей стандартизацию, воспроизводимость и промышленное внедрение представленных функциональных пищевых ингредиентов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № FSER-2025-0008).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out as part of a state assignment (project № FSER-2025-0008).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Singh N. A review on health benefits of phenolics derived from dietary spices / N. Singh, S.S. Yadav // Current Research in Food Science. — 2022. — Vol. 5. — P. 1508–1523.
2. Li H. Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) / H. Li, Yu. Xia, H.Ya. Liu [et al.] // Trends in Food Science & Technology. — 2022. — Vol. 119. — P. 288–308.
3. Andrés C.M.C. The multifaceted health benefits of broccoli — A review of glucosinolates, phenolics and antimicrobial peptides / C.M.C. Andrés, J.M. Pérez De La Lastra, E.B. Munguira [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 11. — DOI: 10.3390/molecules30112262.
4. Zhao W. Effects of resveratrol on biochemical and structural outcomes in osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis of preclinical studies / W. Zhao, Yu. Zhu, S.K. Wong [et al.] // Heliyon. — 2024. — Vol. 10. — № 13. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34064.
5. Yan M. Quantification and diversity analyses of glucosinolates in 191 broccoli genotypes highlight valuable genetic resources for molecular breeding / M. Yan, Ch. Song, Sh. Su [et al.] // Agronomy. — 2023. — Vol. 13. — № 12. — DOI: 10.3390/agronomy13122928.
6. Alu'datt M.H. Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients / M.H. Alu'datt, M. Alrosan, S. Gammoh [et al.] // Food Bioscience. — 2022. — Vol. 50. — DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101971.
7. Jara-Quijada E. Liposomes loaded with green tea polyphenols — optimization, characterization, and release kinetics under conventional heating and pulsed electric fields / E. Jara-Quijada, M. Pérez-Won, G. Tabilo-Munizaga [et al.] // Food and Bioprocess Technology. — 2024. — Vol. 17. — № 2. — P. 396–408.
8. Хуссайне Р. Оптимизация условий экстракции для извлечения фенольных соединений и антиоксидантов из ароматических растений / Р. Хуссайне, Е.П. Сучкова, Т.П. Арсеньева // Вестник Международной академии холода. — 2024. — № 2. — С. 58–63. — DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-58-63.
9. Эминова Э.Р. Получение микроинкапсулированного экстракта проростков *Brassica oleracea* var. *italica* / Э.Р. Эминова, А.С. Сорокина, Л.А. Забодалова [и др.] // Ползуновский вестник. — 2024. — № 3. — С. 134–140. — DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.020.
10. Kurbonova M. Chitosan-coated liposomes of pomegranate-peel phenolic extract: Maximizing the bioaccessibility and antimicrobial activity in probiotic goat yoghurt / M. Kurbonova, M.M. El-Said, S.M.S. El-Shafei [et al.] // Journal of Stored Products Research. — 2025. — Vol. 112. — DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102600.
11. Suprun A.R. Analysis of Phenolic Compounds of *Reynoutria sachalinensis* and *Reynoutria japonica* Growing in the Russian Far East / A.R. Suprun, K.V. Kiselev, O.A. Aleynova [et al.] // Plants. — 2024. — Vol. 13. — № 23. — DOI: 10.3390/plants13233330.
12. Yan X. Zein-based nano-delivery systems for encapsulation and protection of hydrophobic bioactives: A review / X. Yan, M. Li, X. Xu [et al.] // Frontiers in Nutrition. — 2022. — Vol. 9. — DOI: 10.3389/fnut.2022.999373.
13. Bowen-Forbes C. Broccoli, kale, and radish sprouts: key phytochemical constituents and DPPH free radical scavenging activity / C. Bowen-Forbes, E. Armstrong, A. Moses [et al.] // Molecules. — 2023. — Vol. 28. — № 11. — DOI: 10.3390/molecules28114266.
14. Li D. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends / D. Li, Z. Wei, C. Xue // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. — 2021. — Vol. 20. — № 6. — P. 5345–5369. — DOI: 10.1111/1541-4337.12840.
15. Guldiken B. Physical and chemical stability of anthocyanin-rich black carrot extract-loaded liposomes during storage / B. Guldiken, M. Gibis, D. Boyacioglu [et al.] // Food Research International. — 2018. — Vol. 108. — P. 491–497. — DOI: 10.1016/j.foodres.2018.03.071.

16. Noor A. Alginate based encapsulation of polyphenols of Piper betel leaves: Development, stability, bio-accessibility and biological activities / A. Noor, M. Al Murad, A. Jaya Chitra [et al.] // Food Bioscience. — 2022. — Vol. 47. — DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101715.
17. Liu K. Nanoparticles prepared by polysaccharides extracted from Biyang floral mushroom loaded with resveratrol: Characterization, bioactivity and release behavior under in vitro digestion / K. Liu, Y. Liu, J. Lu [et al.] // Food Chemistry. — 2023. — Vol. 426. — DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136612.
18. Dikmetas D.N. Recent advances in encapsulation of resveratrol for enhanced delivery / D.N. Dikmetas, H. Yenipazar, A.C. Karaca // Food Chemistry. — 2024. — Vol. 460. — DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.140475.
19. Li D. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends / D. Li, Z. Wei, C. Xue // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. — 2021. — Vol. 20. — № 6. — P. 5345–5369. — DOI: 10.1111/1541-4337.12840.
20. Machado A.R. Alginate particles for encapsulation of phenolic extract from *Spirulina* sp. LEB-18: physicochemical characterization and assessment of in vitro gastrointestinal behavior / A.R. Machado, P.M.P. Silva, A.A. Vicente [et al.] // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — № 21. — DOI: 10.3390/polym14214759.
21. Marburger J. High-throughput millifluidics for monodisperse alginate milli-capsules filled with emulsions / J. Marburger, G.T. Vladislavljević, N. Leister // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2025. — Vol. 714. — DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136541.
22. Himed-Idir H. Effect of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) supplementation on fresh cheese: Physicochemical properties, antioxidant potential, and sensory attributes / H. Himed-Idir, Kh. Mouhoubi, El.H. Siar [et al.] // Journal of Food Processing and Preservation. — 2021. — Vol. 45. — № 1. — DOI: 10.1111/jfpp.15057.
23. Igielska-Kalwat J. Changes in Resveratrol Containing Phytosterol Liposomes During Model Heating / J. Igielska-Kalwat, M. Rudzińska, A. Grygier [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 23. — DOI: 10.3390/molecules30234645.
24. Sharma R. Probiotic fermentation of polyphenols: Potential sources of novel functional foods / R. Sharma, B. Diwan, B. P. Singh [et al.] // Food Production, Processing and Nutrition. — 2022. — Vol. 4. — № 1. — P. 1–16. — DOI: 10.1186/s43014-022-00101-4.
25. Wróblewska B. Bioactive dairy-fermented products and phenolic compounds: Together or apart / B. Wróblewska, A. Kuliga, K. Wnorowska // Molecules. — 2023. — Vol. 28. — № 24. — DOI: 10.3390/molecules28248081.
26. Gebremeskal Y.H. Chitosan-Coated Liposomes of Chia Seed (*Salvia hispanica* L.) Phenolic Extract: Maximising Bioaccessibility and Shelf-Life Stability in Functional Yoghurt / Y.H. Gebremeskal, L.A. Nadochii, N.B. Eremeeva [et al.] // Food and Bioprocess Technology. — 2025. — Vol. 18. — № 11. — P. 9854–9872. — DOI: 10.1007/s11947-025-04007-0.
27. Almasi K. Yogurt fortified with omega-3 using nanoemulsion containing flaxseed oil: Investigation of physicochemical properties / K. Almasi, S.S. Esnaashari, M. Khosravani [et al.] // Food Science & Nutrition. — 2021. — Vol. 9. — № 11. — P. 6186–6193. — DOI: 10.1002/fsn3.2571.
28. González-Ortega R. Liposomal encapsulation of oleuropein and an olive leaf extract: Molecular interactions, antioxidant effects and applications in model food systems / R. González-Ortega, L. Šturm, M. Skrt [et al.] // Food Biophysics. — 2021. — Vol. 16. — № 1. — P. 84–97. — DOI: 10.1007/s11483-020-09650-y.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Singh N. A review on health benefits of phenolics derived from dietary spices / N. Singh, S.S. Yadav // Current Research in Food Science. — 2022. — Vol. 5. — P. 1508–1523.
2. Li H. Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) / H. Li, Yu. Xia, H.Ya. Liu [et al.] // Trends in Food Science & Technology. — 2022. — Vol. 119. — P. 288–308.
3. Andrés C.M.C. The multifaceted health benefits of broccoli — A review of glucosinolates, phenolics and antimicrobial peptides / C.M.C. Andrés, J.M. Pérez De La Lastra, E.B. Munguira [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 11. — DOI: 10.3390/molecules30112262.
4. Zhao W. Effects of resveratrol on biochemical and structural outcomes in osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis of preclinical studies / W. Zhao, Yu. Zhu, S.K. Wong [et al.] // Heliyon. — 2024. — Vol. 10. — № 13. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34064.
5. Yan M. Quantification and diversity analyses of glucosinolates in 191 broccoli genotypes highlight valuable genetic resources for molecular breeding / M. Yan, Ch. Song, Sh. Su [et al.] // Agronomy. — 2023. — Vol. 13. — № 12. — DOI: 10.3390/agronomy13122928.
6. Alu'datt M.H. Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients / M.H. Alu'datt, M. Alrosan, S. Gammoh [et al.] // Food Bioscience. — 2022. — Vol. 50. — DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101971.
7. Jara-Quijada E. Liposomes loaded with green tea polyphenols — optimization, characterization, and release kinetics under conventional heating and pulsed electric fields / E. Jara-Quijada, M. Pérez-Won, G. Tabilo-Munizaga [et al.] // Food and Bioprocess Technology. — 2024. — Vol. 17. — № 2. — P. 396–408.
8. Hussaineh R. Optimizatsiya uslovij ehkstraksii dlya izvlecheniya fenol'nykh soedinenij i antioksidantov iz aromatischeskikh rastenij [Optimization of extraction conditions for the recovery of phenolic compounds and antioxidants from aromatic plants] / R. Hussaineh, E.P. Suchkova, T.P. Arsenyeva // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii kholoda [Bulletin of International Academy of Refrigeration]. — 2024. — № 2. — P. 58–63. — DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-58-63. [in Russian]
9. Eminova E.R. Poluchenie mikroinkapsulirovannogo ehkstrakta proroostkov *Brassica oleracea* var. *italica* [Microencapsulation of extracts obtained from *Brassica oleracea* var. *italica* sprouts] / E.R. Eminova, A.S. Sorokina, L.A.



- Zabodalova [and others] // Polzunovskij vestnik [Polzunov Bulletin]. — 2024. — № 3. — P. 134–140. — DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.020. [in Russian]
10. Kurbonova M. Chitosan-coated liposomes of pomegranate-peel phenolic extract: Maximizing the bioaccessibility and antimicrobial activity in probiotic goat yoghurt / M. Kurbonova, M.M. El-Said, S.M.S. El-Shafei [et al.] // Journal of Stored Products Research. — 2025. — Vol. 112. — DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102600.
11. Suprun A.R. Analysis of Phenolic Compounds of Reynoutria sachalinensis and Reynoutria japonica Growing in the Russian Far East / A.R. Suprun, K.V. Kiselev, O.A. Aleynova [et al.] // Plants. — 2024. — Vol. 13. — № 23. — DOI: 10.3390/plants13233330.
12. Yan X. Zein-based nano-delivery systems for encapsulation and protection of hydrophobic bioactives: A review / X. Yan, M. Li, X. Xu [et al.] // Frontiers in Nutrition. — 2022. — Vol. 9. — DOI: 10.3389/fnut.2022.999373.
13. Bowen-Forbes C. Broccoli, kale, and radish sprouts: key phytochemical constituents and DPPH free radical scavenging activity / C. Bowen-Forbes, E. Armstrong, A. Moses [et al.] // Molecules. — 2023. — Vol. 28. — № 11. — DOI: 10.3390/molecules28114266.
14. Li D. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends / D. Li, Z. Wei, C. Xue // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. — 2021. — Vol. 20. — № 6. — P. 5345–5369. — DOI: 10.1111/1541-4337.12840.
15. Guldiken B. Physical and chemical stability of anthocyanin-rich black carrot extract-loaded liposomes during storage / B. Guldiken, M. Gibis, D. Boyacioglu [et al.] // Food Research International. — 2018. — Vol. 108. — P. 491–497. — DOI: 10.1016/j.foodres.2018.03.071.
16. Noor A. Alginate based encapsulation of polyphenols of Piper betel leaves: Development, stability, bio-accessibility and biological activities / A. Noor, M. Al Murad, A. Jaya Chitra [et al.] // Food Bioscience. — 2022. — Vol. 47. — DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101715.
17. Liu K. Nanoparticles prepared by polysaccharides extracted from Biyang floral mushroom loaded with resveratrol: Characterization, bioactivity and release behavior under in vitro digestion / K. Liu, Y. Liu, J. Lu [et al.] // Food Chemistry. — 2023. — Vol. 426. — DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136612.
18. Dikmetas D.N. Recent advances in encapsulation of resveratrol for enhanced delivery / D.N. Dikmetas, H. Yenipazar, A.C. Karaca // Food Chemistry. — 2024. — Vol. 460. — DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.140475.
19. Li D. Alginate-based delivery systems for food bioactive ingredients: An overview of recent advances and future trends / D. Li, Z. Wei, C. Xue // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. — 2021. — Vol. 20. — № 6. — P. 5345–5369. — DOI: 10.1111/1541-4337.12840.
20. Machado A.R. Alginate particles for encapsulation of phenolic extract from *Spirulina* sp. LEB-18: physicochemical characterization and assessment of in vitro gastrointestinal behavior / A.R. Machado, P.M.P. Silva, A.A. Vicente [et al.] // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — № 21. — DOI: 10.3390/polym14214759.
21. Marburger J. High-throughput millifluidics for monodisperse alginate milli-capsules filled with emulsions / J. Marburger, G.T. Vladislavljević, N. Leister // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2025. — Vol. 714. — DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136541.
22. Himed-Idir H. Effect of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) supplementation on fresh cheese: Physicochemical properties, antioxidant potential, and sensory attributes / H. Himed-Idir, Kh. Mouhoubi, El.H. Siar [et al.] // Journal of Food Processing and Preservation. — 2021. — Vol. 45. — № 1. — DOI: 10.1111/jfpp.15057.
23. Igielska-Kalwat J. Changes in Resveratrol Containing Phytosterol Liposomes During Model Heating / J. Igielska-Kalwat, M. Rudzińska, A. Grygier [et al.] // Molecules. — 2025. — Vol. 30. — № 23. — DOI: 10.3390/molecules30234645.
24. Sharma R. Probiotic fermentation of polyphenols: Potential sources of novel functional foods / R. Sharma, B. Diwan, B. P. Singh [et al.] // Food Production, Processing and Nutrition. — 2022. — Vol. 4. — № 1. — P. 1–16. — DOI: 10.1186/s43014-022-00101-4.
25. Wróblewska B. Bioactive dairy-fermented products and phenolic compounds: Together or apart / B. Wróblewska, A. Kuliga, K. Wnorowska // Molecules. — 2023. — Vol. 28. — № 24. — DOI: 10.3390/molecules28248081.
26. Gebremeskal Y.H. Chitosan-Coated Liposomes of Chia Seed (*Salvia hispanica* L.) Phenolic Extract: Maximising Bioaccessibility and Shelf-Life Stability in Functional Yoghurt / Y.H. Gebremeskal, L.A. Nadtochii, N.B. Eremeeva [et al.] // Food and Bioprocess Technology. — 2025. — Vol. 18. — № 11. — P. 9854–9872. — DOI: 10.1007/s11947-025-04007-0.
27. Almasi K. Yogurt fortified with omega-3 using nanoemulsion containing flaxseed oil: Investigation of physicochemical properties / K. Almasi, S.S. Esnaashari, M. Khosravani [et al.] // Food Science & Nutrition. — 2021. — Vol. 9. — № 11. — P. 6186–6193. — DOI: 10.1002/fsn3.2571.
28. González-Ortega R. Liposomal encapsulation of oleuropein and an olive leaf extract: Molecular interactions, antioxidant effects and applications in model food systems / R. González-Ortega, L. Šturm, M. Skrt [et al.] // Food Biophysics. — 2021. — Vol. 16. — № 1. — P. 84–97. — DOI: 10.1007/s11483-020-09650-y.