Volume 8, Issue 2, 2025

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
FOOD SYSTEMS

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (On line)
http://www.fsjour.com

Национальный, рецензируемый журнал посвящен основным проблемам науки о пищевой промышленности. Основной миссией является: создание, агрегация, поддержка и распространение научного контента в области пищевой промышленности, объединение усилий исследователей научных центров, университетов, преодоление разрыва между изданиями регионального, национального и федерального уровней. Журнал призван освещать актуальные проблемы в пищевой и смежных отраслях, продвигать новые перспективные технологии в широкую аудиторию научных и практических работников, преподавателей, аспирантов, студентов, предпринимателей. Научная концепция издания предполагает публикацию новых знаний в области пищевых систем и научных основ ресурсосберегающих технологий глубокой переработки сельскохозяйственного сырья, прорывных технических решений для производства пищевых продуктов общего и специализированного назначения. В журнале публикуются научные и обзорные статьи, доклады, сообщения, рецензии, краткие научные сообщения (письма в редакцию), информационные публикации по направлениям: технология пищевых производств; процессы, оборудование и аппараты пищевых производств; гигиена питания; биотехнология; стандартизация, сертификация, качество и безопасность; экономика; автоматизация и информатизация технологических процессов. Подробная информация для авторов и читателей представлена на сайте: www.fsjour.com.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ
www.fsjour.com

Учредитель, издатель и типография
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26

РЕДАКЦИЯ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН
109316, Москва, Талалихина, 26
Тел.: +7-495-676-95-11, доб. 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре
Регистрационные данные:
ПИ № ФС77–71610 от 13.11.2017
ЭЛ № ФС 77–72022 от 26.12.2017
Издается с 2018 года.
Материалы публикуются на условиях лицензии CC BY 4.0
Цена свободная.
Периодичность — 4 номера в год.
Подписано в печать 27.06.2025.
Дата выхода в свет 30.06.2025.
Тираж 300 экз. Заказ № 60.

16+

© ФНЦПС, 2025
© Авторы, 2025

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:
Кузнецова Оксана Александровна — Доктор технических наук, Директор, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Лисицын Андрей Борисович — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, Научный руководитель, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:
Семенова Анастасия Артуровна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ:
Горлов Иван Федорович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, Научный руководитель, Поволжский научно-исследовательский институт производства и переработки мясомолочной продукции», Волгоград, Россия
Настасиевич Иван — Доктор, Адъюнкт-директор, Институт гигиены и технологии мяса, Белград, Сербия
Такеда Широ —Адьюнкт-профессор, Профессор лаборатории науки о пище, Институт ветеринарной медицины, Университет Азабу, Сагамихара, Япония
Просеков Александр Юрьевич — Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
Горбунова Наталия Анатольевна — Кандидат технических наук, Ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
Arif Nur Muhammad Ansori — PhD, Доктор ветеринарных наук, научный сотрудник, Университет Айрланга, Сурабая, Индонезия
Tarek Gamal Abedelmaksoud — Доктор пищевых наук, Адьюнкт-профессор Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

ВЫПУСКАЮЩИЙ РЕДАКТОР:
Захаров Александр Николаевич — Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Заведующий редакционно-издательским отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, РАН, Москва, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:
Абрамова Любовь Сергеевна — Доктор технических наук, профессор, Заместитель директора Департамента, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия
Баженова Баяна Анатольевна — Доктор технических наук, профессор, Профессор кафедры «Технология мясных и консервированных продуктов», Восточно-Сибирский университет технологии и управления», Улан-Удэ, Россия
Галстян Арам Генрихович — Доктор, технических наук, академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности РАН, Москва, Россия
Донник Ирина Михайловна — Доктор биологических наук, профессор, Академик РАН, Вице-президент РАН, Москва, Россия
Евдокимов Иван Алексеевич — доктор технических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Технология молока и молочных продуктов» Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия
Иванкин Андрей Николаевич — Доктор химических наук, профессор, Заведующий кафедрой «Химия», Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищи, Московская область, Россия
Кочеткова Алла Алексеевна — Доктор технических наук, профессор, Руководитель лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
Машенцева Наталья Геннадиевна — Доктор технических наук, доцент, профессор РАН, профессор, кафедра «Биотехнология и технология продуктов биоорганического синтеза» Московский государственный университет пищевых производств, Москва, Россия
Мирошников Сергей Александрович — Доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Ректор, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия
Римарева Любовь Вячеславовна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
Петров Андрей Николаевич — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Директор, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Видное, Московская область, Россия
Ребезов Максим Борисович — Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Главный научный сотрудник, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия
Чернуха Ирина Михайловна — Доктор технических наук, профессор, Академик РАН, Заведующий отделом, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, Москва, Россия

The national peer reviewed journal is dedicated to the main problems of food science. The main mission is to create, aggregate, support and distribute the scientific content in the field of the food industry, join the efforts of researchers from scientific centers and universities, bridge the gap between publications at the regional, national and federal levels. The journal serves to highlight topical problems in the food and related industries, promote new promising technologies among the wide audience of scientific and practical professionals, lecturers, students, postgraduate students and entrepreneurs. The scientific concept of the journal envisages publication of new knowledge in the field of food systems and scientific foundations of the resource saving technologies for deep processing of agricultural raw materials, breakthrough technical solutions for producing food of general and specialized purpose. The journal publishes scientific and review papers, reports, communications, critical reviews, short scientific communications (letters to the editorial office), information materials concerned with food technology, processes, equipment and apparatus for food production, nutritional hygiene, biotechnology, standardization, certification, quality and safety, economics, automation and informatization of technological processes. The detailed information is given on the site: www.fsjour.com.

Minister of Science and Higher Education of the Russian Federation

V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences (Gorbatov Research Center for Food Systems)

FOOD SYSTEMS
www.fsjour.com

Founder, Publisher and Printing Office:
Federal State Budgetary Scientific Institution "V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences"
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316

EDITORIAL OFFICE:
Federal State Budgetary Scientific Institution
"V.M. Gorbatov Federal Research Center
for Food Systems of Russian Academy of Sciences"
Talalikhina str. 26, Moscow, Russia, 109316
Tel.: +7-495-676-95-11 extension 300
e-mail: a.zakharov@fncps.ru

The Journal is registered in the Federal Service on Supervision in the sphere of communication industry, information technologies and public communications.
The certificate of registration is
PI № FS 77 – 71610 of 13.11.2017
EL № FS 77 – 72022 of 26.12.2017
Founded in 2018.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License
Free price.
Frequency — 4 issues a year.
Signed print 27.06.2025.
Released from press 30.06.2025.
Circulation — 300 copies. Order № 60.

16+

© FNCPS, 2025
© Authors, 2025

ISSN 2618-9771 (Print)
ISSN 2618-7272 (Online)
DOI-prefix: 10.21323/2618-9771

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:
Oxana A. Kuznetsova, Doctor of technical sciences, Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
Andrey B. Lisitsyn, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
Anastasiya A. Semenova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SCIENTIFIC EDITORS:
Ivan F. Gorlov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Academician of RAS, Scientific supervisor of Povolzhskiy Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russia
Ivan Nastasijevic, Doctor, Associate Director, Institute of Meat Hygiene and Technology, Belgrad, Serbia
Takeda Shiro, Associate Professor, Laboratory of Food Science School of Veterinary Medicine, Azabu University, Sagamihara, Japan
Aleksandr Yu. Prosekov, Doctor of technical sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
Natalia A. Gorbunova, Candidate of technical sciences, Academic Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Arif Nur Muhammad Ansori, Doctor, Doctor in Veterinary Sciences, Researcher, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia
Tarek Gamal Abedelmaksoud, PhD of Food Science, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

PRODUCTION EDITOR:
Aleksandr N. Zakharov, Candidate of technical sciences, Senior research worker, Head of the Department of Editorial and Publishing, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:
Liubov S. Abramova, Doctor of technical sciences, Professor, Deputy Director of the Department, Russian Federation Research Institute of Fishery and Oceanography, Moscow, Russia
Baiana A. Bazhenova, Doctor of technical sciences, Professor, Professor of the chair «Meat and canned product technology» of East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
Aram G. Galstyan, Doctor of technical sciences, Academician of RAS, Director, All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia
Irina M. Donnik, Doctor of biological sciences, Professor, Academician of RAS, Vice president of RAS, Moscow, Russia
Ivan A. Evdokimov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the chair "Technology of milk and dairy products", North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
Andrey N. Ivankin, Doctor of Chemical Sciences, Professor,Head of the chair of Chemistry, Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischi, Moscow region, Russia
Alla A. Kochetkova, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the «Laboratory of food biotechologies and specialized products», Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia
Natal'ya G. Mashentseva, Doctor of technical sciences, Professor RAS, Professor, Chair of Biotechnology and Technology of Products of Bioorganic Synthesis, Moscow State University of Food Production, Moscow, Russia
Sergey A. Miroshhikov, Doctor of biological sciences, Professor, Corresponding member of RAS, Rector, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Liubov V. Rimareva, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology — branch Federal Research Centre of nutrition, biotechnology and food safety, Moscow, Russia
Andrey N. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Director, All-Russian Research Institute of Canning Technology — Branch of V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS, Vidnoe, Moscow region, Russia
Maxim B. Rebezov, Doctor of agricultural sciences, Professor, Chief Researcher, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Irina M. Chernukha, Doctor of technical sciences, Professor, Academician of RAS, Head of the Department, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

Silvi Hafianti, Elizabeth F. Perez, Than Win, Arif N. M. Ansori, Hai T. Sam
INFLUENCE OF PRICE, HEALTH ASPECT, TASTE, AND SMELL ON MAKING DECISION OF MYANMAR'S PEANUT OIL PURCHASING 156

Кондратьев Н. Б., Руденко О. С., Осипов М. В., Белова И. А.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ КАКАО-ПРОДУКТОВ В КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЯХ ПО СОДЕРЖАНИЮ АЛКАЛОИДОВ 167

Ebtesam Farah Badran, Tarek Gamal Abedelmaksoud, Eizz Elden A. Elshazly, Sayeda Sayed Ahmed
IMPACT OF RED FLOUR BEETLE *TRIBOLIUM CASTANEUM* (HERBST) (COLEOPTERA: TENEBRIONIDAE) INFESTATION ON SOME QUALITY CHARACTERISTICS OF STORED WHEAT FLOUR 173

Степанова А. А., Асякина Л. К.
МИРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ БЕЛКА И КАЛОРИЙ: ВЗАИМОСВЯЗЬ С РАЦИОНОМ И ПРОДУКТЫ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФИЦИТА 180

Крюк Т. В., Тюрина Т. Г., Попова О. С., Романенко Н. А., Гончарук Г. П., Труш Е. Н.
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДОВ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ 189

Huda Ali Abd Alhussein, Alaa Jabbar Abd Al-Manhel
A COMPREHENSIVE OVERVIEW OF CYCLODEXTRINS IN TERMS OF PRODUCTION, PROPERTIES, AND APPLICATIONS 196

Gabdulla F. Kurbanov, Artem O. Prichepa, Anatoly P. Nepomnyashchy, Ekaterina Yu. Ivanova, Natalia Yu. Sharova
BIOTECHNOLOGY APPLICATIONS OF WHEAT BRAN. REVIEW 204

Nataliia V. Nepovinnykh, Sergey V. Kozlov, Irina V. Ziruk, Vasilissa S. Kutsenkova, Zohreh B. Ghorghi, Mohammad A. Hesarinejad, Samira Yeganehzad
ASSESSMENT OF SAFETY AND TOLERABILITY OF HYBRID GEL ORAL ADMINISTRATION IN AN EXPERIMENT ON WISTAR RATS. 213

Барковская И. А., Рябова А. Е., Рожкова И. В.
КОМПЛЕКСНАЯ МОДИФИКАЦИЯ БЕЛКОВОГО ПРОФИЛЯ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ КАК ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ОБОГАЩЕННЫХ БЕЛКОВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ 221

Abdalla S. M. Ammar
DATE (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.) FRUITS AND SEEDS NANOTECHNOLOGY: A MINI REVIEW 231

Рождественская Л. Н., Ломовский И. О., Чугунова О. В.
УНИФИКАЦИЯ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕЛОКСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БОБОВОГО СЫРЬЯ 235

Каримова Н. Ю., Алексеенко Е. В., Шаненко Е. Ф.
РАЗРАБОТКА ПОРОШКООБРАЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ДЛЯ БЕЗАЛКОГОЛЬНОГО НАПИТКА НА ОСНОВЕ СУБЛИМИРОВАННОГО СОКА ЧЕРНИКИ 244

Tarek Gamal Abedelmaksoud, Mennatalh A. Hassan, Mostafa T. M. Assous, Abd El-Rahman M. Khalaf-Allah
PROFILING OF VOLATILE COMPOUNDS IN FOUR EGYPTIAN DATE CULTIVARS 252

Соколова Д. В., Соловьева А. Е.
БИОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАЯ ИЗ ЛИСТЬЕВ АМАРАНТА (*AMARANTHUS CRUENTUS* L.) СОРТА «ФРАНТ» 260

Ivan V. Morshchinin
METHODS FOR QUANTITATIVE DETERMINATION OF MICROALGAL LIPID AND FATTY ACIDS CONTENT 267

Ульрих Е. В., Ключко Н. Ю., Агафонова С. В., Землякова Е. С., Сухих С. А., Качанова А. В., Федорова О. С.
МАКРОФИТЫ ЭКОСИСТЕМЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ КАК ИСТОЧНИК СЫРЬЯ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 276

Куликов Д. С., Королев А. А., Пчелкина В. А.
СВОЙСТВА И МОЛЕКУЛЯРНО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕНТАТИВНО-ГИДРОЛИЗОВАННЫХ БЕЛКОВ ГОРОХОВОГО ИЗОЛЯТА И ВТОРИЧНОГО КРАХМАЛО-БЕЛКОВОГО ПРОДУКТА 286

Мягконосов Д. С., Топникова Е. В., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИИ С ТРЕХФАЗНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ СВЕЖЕГО МОЛОКА ВОССТАНОВЛЕННЫМ СУХИМ МОЛОКОМ 296

Тарасов А. В., Заворохина Н. В., Чугунова О. В., Вяткин А. В.
КОРРЕЛЯЦИЯ ПЕНООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ НАПИТКОВ НА РАСТИТЕЛЬНОЙ ОСНОВЕ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ 306

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-156-166

Received 19.06.2024
Accepted in revised 25.03.2025
Accepted for publication 15.04.2025
© Hafianti S., Perez E. F., Win T., Ansori A. N.M., Sam H. T., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

INFLUENCE OF PRICE, HEALTH ASPECT, TASTE, AND SMELL ON MAKING DECISION OF MYANMAR'S PEANUT OIL PURCHASING

Silvi Hafianti[1], Elizabeth F. Perez[1,*], Than Win[2], Arif N. M. Ansori[3,4], Hai T. Sam[5]

[1] Department of Master in Bio Management, School of Business, International Institute for Life Sciences, Jakarta, Indonesia
[2] River Samon Institute of Management, Yangon, Myanmar
[3] Postgraduate School, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia
[4] Virtual Research Center for Bioinformatics and Biotechnology, Surabaya, Indonesia
[5] INTI International University and Colleges, Nilai, Negeri Sembilan, Malaysia

KEY WORDS:
peanut oil, purchasing decision, price impact, health influence

ABSTRACT

This study aims to investigate the factors that influence consumer purchasing decisions regarding peanut oil brands in Myanmar, specifically examining the impact of price, health benefits, and taste and smell on purchasing behavior. A quantitative research approach was employed to analyze the data collected from 255 participants who are social network friends' netizens living in Yangon region. The gathered data was analyzed by using the logistic regression statistical tool. Tests such as Likelihood Ratio test, Wald test, the Hosmer-Lemeshow test, Cox and Snell R-square, Nagelkerke R-square and Omnibus test were used in this study for the model fitting purpose to achieve its objectives. The results show that peanut oil price had a significant impact on consumer purchasing decisions, while health considerations also played a role in decision-making. However, taste and smell did not significantly contribute to the prediction of the relationship between the dependent and independent variables.

Поступила 19.06.2024
Поступила после рецензирования 25.03.2025
Принята в печать 15.04.2025
© Хафианти С., Перес Э. Ф., Вин Т., Анзори А. Н. М., Сэм Х. Е., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ВЛИЯНИЕ ЦЕНЫ, ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДОРОВЬЕ, ВКУСА И ЗАПАХА НА ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ПОКУПКЕ АРАХИСОВОГО МАСЛА В МЬЯНМЕ

Хафианти С.[1], Перес Э. Ф.[1],* Вин Т. [2], Анзори А. Н. М.[3,4], Сэм Х. Е.[5]

[1] Факультет магистратуры по био-менеджменту, Школа бизнеса, Международный институт естественных наук Джакарта, Индонезия
[2] River Samon Institute of Management, Янгон, Myanmar
[3] Отдел Аспирантура, Университет Айрлангга, Сурабая, Индонезия
[4] Виртуальный исследовательский центр биоинформатики и биотехнологий, Сурабая, Индонезия
[5] Международный университет и колледжи ИНТИ, Нилай, Негери-Сембилан, Малайзия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
арахисовое масло, принятие решения о покупке, влияние цены, воздействие на здоровье

АННОТАЦИЯ

Целью данного исследования было изучение факторов, влияющих на принятие потребителями решения о покупке брендов арахисового масла в Мьянме, изучая, в частности, влияние цены, пользы для здоровья, а также вкуса и запаха на покупательское поведение. Был использован количественный исследовательский подход для анализа данных, собранных от 255 участников, которые являются пользователями социальной сети друзей, живущих в районе г. Янгон. Собранные данные были анализированы путем использования статистического инструмента логистической регрессии. В этом исследовании были использованы такие тесты как тест отношения правдоподобия, тест Вальда, тест Хосмера-Лемешоу, R-квадрат Кокса и Снелла, R-квадрат Нагелькерке и универсальный критерий для адаптации модели для достижения её целей. Результаты показали, что цена на арахисовое масло оказывала значимое влияние на решение потребителей о покупке, в то же время соображения здоровья также играли роль в принятии решения. Однако вкус и запах не вносили существенный вклад в прогнозирование взаимоотношения между зависимыми и независимыми переменными.

1. Introduction

The global edible oil market has been characterized by unprecedented price fluctuations, influenced by various factors such as decreased output and increasing demand [1]. In Myanmar, edible oil is an essential component of daily life, often used for frying and mixed with food. The country has diverse edible oil types, including peanut, sesame, sunflower, palm, vegetable, olive, soybean, mustard, and mixed oil.

Htoon, K. L. [2] shows that from 2001 to 2017, Myanmar's peanut oil production increased significantly, with an average annual production of 270,000 tons. However, the edible oil industry has faced challenges in recent years, with 90 % of expeller mills ceasing operation due to the sale of lower-quality mixed edible oils and a lack of competition in the local market. While peanut oil production in Myanmar saw growth from 2001 to 2017, recent market trends have shifted significantly, causing a large proportion of production facilities to cease operations due to increased availability of cheaper, lower-quality oils and insufficient competition to drive improvement and viability in the market [3]. Furthermore, the palm oil industry has been criticized for its use of chemically modified peanut oil fragrances and lack of standardization, with the government attempting to regulate the sale of unhealthy and unstandardized oils. The country's reliance on imported palm oil has had a significant impact on the domestic edible oil industry, with monthly imports averaging 7,000 tons in the early 1990s and growing to 70,000 tons today [4]. Currently, local oil mills in Myanmar are struggling with declining production and high costs of electricity, raw materials, and labor, while the growing market for lower-quality mixed edible oils poses a significant challenge.

In Myanmar, oilseed crops cover approximately 16.4 % of the total agricultural land, with peanuts being one of the main crops. The production of peanut oil is a significant industry, but it faces challenges due to competition from imported palm oil. The Myanmar Edible Oil Dealers' Association and the Myanmar Edible Oil Manufacturers' Association have reported that the sudden imposition of import restrictions by India on beans and pulses led to a shift in farming practices, with many farmers

FOR CITATION: **Hafianti, S., Perez, E.F., Win, T., Ansori, A.N.M., Sam, H.T.** (2025). Influence of price, health aspect, taste, and smell on making decision of Myanmar's peanut oil purchasing. *Food Systems,* 8(2), 156–166. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-156-166

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Хафианти, С., Перес, Э.Ф., Вин, Т., Анзори, А.Н.М., Сэм, Х. Т.** (2025). Влияние цены, воздействия на здоровье, вкуса и запаха на принятие решения о покупке арахисового масла в Мьянме. *Пищевые системы*, 8(2), 156–166. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-156-166

switching to growing peanuts. However, this change has proven difficult due to the different skills required [5].

The demand for edible oil in Myanmar is high, with each person consuming an average of 9.3 kg of edible oil per year. The country imports significant amounts of palm oil to meet this demand, particularly from Malaysia. However, this has negatively affected the national economy and consumer base in Myanmar's oilseed crop industry. It is also important for consumers to be aware of the importance of eating nutritious oils, such as those found in peanuts, sesame seeds, and sunflower seeds [3]. According to a survey, peanut oil is the most popular edible oil in Myanmar, with 61.40 % of respondents selecting it as their preferred oil type [2].

Understanding consumer behavior is crucial for businesses to gain a competitive advantage in today's market. A consumer is defined as an individual with sufficient income to purchase goods or services, and their demand for superior services plays a significant role in the success or failure of an industry [6]. To thrive in a competitive market, businesses must understand and adapt to the decision-making processes and actions of their customers [7]. Consumer decision-making involves a complex process, including information search, evaluation of alternatives, purchase decision, and post-purchase evaluation, with various factors influencing the decision-making process [8]. According to Philip Kotler, customer behavior is the study of how individuals or groups choose, use, and reject goods, services, concepts, or encounters to satisfy their wants and needs [9]. Researchers have developed various models to depict the decision-making process involved in purchasing and the factors that affect it [8]. By understanding what consumers like to buy, where they buy, how much they buy, how often they buy, and why they buy, businesses can reorganize their decision-making process at different stages [10].

The buying process begins with need recognition, where a customer identifies a desire or issue, often triggered by internal and external stimuli, such as cultural and social factors [11]. This initial phase involves recognizing a gap between the ideal and current circumstances, creating demand, and the need to fulfill that desire [12]. Marketers may influence consumers to buy by highlighting the difference between their ideal and present circumstances, creating a sense of urgency [8]. Factors such as financial considerations, past decisions, family characteristics, social status, marketing campaigns, and personal preferences can impact the identification of needs [8]. The genuine condition is influenced by various factors, including evaluation after purchase, excitement, and inappropriate group. Scholars argue that a need can be something one needs rather than something one just wants to preserve one's way of life [11]. The problem is detected when a consumer observes a significant difference between their current circumstances and an ideal or preferred state.

Consumers seek information from various sources, including personal, commercial, public, and experimental sources, during the information search process, which is a crucial step in the buying decision-making process. This search is often triggered by an unconscious desire, and once consumers are aware that a product or service can satisfy their needs, they will evaluate whether to purchase it. The level of consumer interest determines the amount of information needed during the search process, with consumers being more likely to make a decision quickly if the product is readily available or instantaneously accessible [12]. Consumers have the right to access knowledge from multiple sources, including both private and public data [13]. As consumers seek to make informed decisions, they often search for experiences associated with products and similar products or services. They may also seek advice from friends, family, and acquaintances who have experience with the products or solutions they need. Positive customer feedback can significantly increase the likelihood of purchase, while external data can also aid in decision-making. Additionally, consumers can obtain information through various channels, such as magazines, TV, and online resources. For example, advertising on TV or the Internet can serve as important cues to make a purchase [14]. Another study on internal and external consumer behavior examines the influence of internal factors (such as personality and motivation) and external factors (such as culture and social class) on purchasing decisions at Keboen Rodjo Kediri Restaurant, highlighting the importance of understanding consumer behavior in a competitive market [15].

Consumers are faced with a vast array of options, which can lead to overwhelming decision-making. To alleviate this, businesses can simplify the process by highlighting their products' unique qualities and guiding consumers toward more informed purchases. During this process, customers evaluate all available options, develop a mental framework of brand associations, and consider various factors such as brand, quality, originality, and usefulness [14]. Businesses must identify reliable information sources and understand what aspects of their products or services resonate with customers to effectively navigate this complex decision-making process.

As they gather more information, they may elevate their standards for evaluation and categorize options based on shared qualities, with emotional connections influencing their perception of different choices [8].

During the evaluation stage, consumers weigh their options, considering factors such as social influences and unexpected situations, to form a purchase intention and rank their preferred brands [8]. As they reach the "end goal", they have to select the product they wish to purchase, guided by their needs, wants, and challenges [14]. Purchase decisions are influenced by various factors, including social relationships, reference groups, and personal preferences [3], with some customers opting for exclusive brand loyalty if they have a positive perception of the brand.

After purchasing a product, the customer's job is not done, as they will either be satisfied or dissatisfied and engaged in post-purchase behavior. Satisfaction depends on the gap between expectations and disappointment, and vendors must evaluate customer needs, satisfaction, and retention. Some buyers may make impulsive purchases, leading to dissatisfaction and returns, while others may feel guilty, ashamed, or helpless after making an extravagant purchase [11]. The customer assesses whether the product meets, exceeds, or falls short of their expectations [8], and their satisfaction is influenced by whether the product meets their needs, exceeds their expectations, or falls short.

The edible oil market has various different types of edible oil for consumers to choose. Several factors are affecting the purchasing decision-making regarding edible oil. Among them, price, health, smell, and taste are explored in detail in the following section.

Price is the only instrument employed by businesses to generate income from marketing mix elements, and as such, the prices that companies establish for their goods are essential to ensuring a good return on their investments. In a competitive marketplace, the price is acknowledged as a financial amount regardless of the level of quality of the goods [16]. Consumers perceive price as a measure of quality and use it to compare reference rates in a marketplace, where comparable products are sold at a variety of prices [17]. Many scholars believe that price has a significant influence on purchasing decisions [18], and research has shown that price and product quality play significant roles in consumers' decisions [19,20,21]. The findings of these studies indicate a relationship between price-related variables and consumer purchasing decisions, as well as the potential for a positive or negative relationship between price and purchasing probability. In Myanmar, consumers have expressed that the price is high for them to consume edible oil, but even if the price is low and income increases, they will not increase their consumption [3]. This suggests that price might influence consumer purchasing decisions in Myanmar, particularly in terms of switching to high-quality edible oils.

The consumption of edible oil in Myanmar is high, with an annual per capita consumption of 14.39 kg, which has increased by 64 % in recent decades [3]. However, this increase in consumption has led to a growing market demand for high-quality edible oils, which has resulted in the mixing of inexpensive oils and chemicals, leading to adulteration and health problems [22,23]. As a result, consumers are becoming more sensitive to the quality of edible oil they consume, and many countries are switching to healthier options. In Myanmar, consumers are complaining about the difficulty in distinguishing blended edible oil from contaminants and are demanding healthier options [24]. Previous studies aimed to create an oil blend that meets the recommended fatty acid ratio and to assess the impact of blending on the physicochemical properties of the resulting oil mixture. Groundnut oil was blended with palm oil and sunflower oil to achieve a balance of saturated fatty acids (SFA), monounsaturated fatty acids (MUFA), and polyunsaturated fatty acids (PUFA) as recommended by health agencies, ideally close to a 1:1 to 3:1 ratio [25]. These concerns highlight the importance of consumers finding brands and edible oil types that are healthier and more authentic.

Edible oils, particularly peanut oil, are refined to achieve a neutral flavor before consumption, but customers can detect even minute amounts of aromatic product residue. While flavorless oils are preferred in the United States and many Western countries, faint natural flavor notes, such as nutty, buttery, or oily, are acceptable and often necessary in African and Asian countries, for example, in Myanmar [26]. In Myanmar, peanut oil is a popular choice for cooking, frying, and adding flavor, with most variants having a mild, neutral flavor [3,27]. Myanmar people tend to appreciate nutty and oily smells and tastes, making peanut oil a suitable fit for their preferences. Additionally, people often use taste and smell as indicators of the state and quality of edible oil products, as each type of oil has its unique smell and flavor. For example, bad oil can have an acidic or peculiar smell, while a bitter or pungent taste can indicate an inferior product [28]. As a result, consumers are likely to choose edible oils based on their taste and smell.

Several studies have explored the factors influencing consumer purchasing decisions of edible oil, with one study conducted in Myanmar confirming that price, health, taste, and smell affect consumption rates, although the researchers noted that further research is needed to fully understand the effects of these variables [3]. A study in Kandy, Sri Lanka, found that price is the most significant factor influencing consumer purchasing decisions of edible oil, with consumers also considering how they use edible oil in a healthy way [18]. In another study in Surendranagar City, Gujarat, researchers found that taste and smell, health considerations, price, availability, and brand reputation are all factors influencing consumer purchasing decisions of edible oil, with consumers placing significant importance on health considerations and taste and smell [22]. These studies collectively suggest that health considerations, taste and smell, and price are all important factors influencing consumer purchasing decisions of edible oil.

A regression model can be used to predict consumer purchasing decision-making behavior, helping local peanut oil producers adjust their resources and remain competitive.

Therefore, this study was conducted to understand how price, health, taste and smell affect the consumer purchasing decision concerning peanut oil brands as well as the association and regression model to predict the consumer purchasing decision making in regard to the edible peanut oil brands.

Research questions:

Based on the above problem statement, the researchers attempted to answer the following questions:

1) How do price, health, taste, and smell affect consumer purchasing decisions when buying edible peanut oil?
2) What are the associations between edible peanut oil price, health, taste, and smell, and consumer purchasing decisions of peanut oil brands?
3) What recommendations can be provided to local edible peanut oil producers to improve their product offerings, packaging, and distribution strategies?

Drawing from existing research, literature, and reports, the conceptual framework presented here encompasses three independent variables: price, health, and taste and smell, with the dependent variable being consumer purchasing decision-making regarding edible peanut oil brands. This conceptual framework aims to explore the influence of price, health, taste, and smell on consumer purchasing decisions related to peanut oil brands (Figure 1).

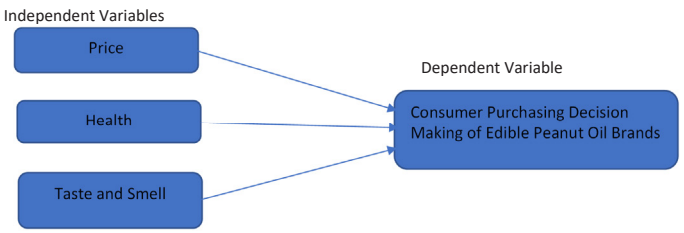


Figure 1. **Conceptual framework of the study**
Рисунок 1. **Концептуальная схема исследования**

This conceptual framework (Figure 1) is adapted from previous studies on consumer behavior and purchasing decision-making [28,29].

The study focuses on the binary logistic regression analysis of peanut oil brands and association between price, health, taste/smell and buying decision studied in the population of 760 social network users from thirty-nine townships in Yangon Region. This research was conducted to reveal a knowledge gap in understanding the consumer preference with regard to health, taste and smell when purchasing the edible peanut oil brands as well as the association between consumer preferences and health, taste and smell of the edible peanut oil brands.

2. Objects and methods

2.1. Problem statement

Myanmar is the fourth-largest peanut oil consumption country in the world [30]. Researchers have emphasized the need to identify the factors influencing consumer purchasing decisions toward peanut oil brands, including price, health, taste and smell as these factors can contribute to purchasing behavior [31]. As the import of edible oils continues to harm Myanmar's peanut oil producers, understanding the associations among these factors and their impact on consumer purchasing decisions has become crucial.

2. 2. Research methodology

This section describes the research design, data collections and methods as well as the explanation of a data analysis tool that was used in this study such as logistic regression.

2.2.1. Data analysis

The gathered data was analyzed using the logistic regression statistical tool. Tests such as the Likelihood Ratio test, Wald test, Hosmer-Lemeshow test, Cox and Snell R-square, Nagelkerke R-square, and Omnibus test were employed in this study for model fitting purposes. The statistical tools used in this study were explained in detail in the following section.

a. Logistic regression

Logistic regression is used to predict a discrete outcome, such as group membership, based on various continuous or categorical variables. *Typically, the dependent variable is dichotomous (e. g., price, taste and smell and health) and peanut oil consumption is the independent variable in this study.* Logistic regression is more flexible as it does not assume specific distributions for the predictor variables. This statistical modeling technique, initially developed for biomedical research, has expanded into fields such as business, finance, engineering, marketing, economics, and health policy. Its main applications are classification (predicting group membership) and profiling (differentiating between groups based on certain factors). The goal of logistic regression is to identify the best-fitting and most parsimonious model that describes the relationship between the dependent variable and independent variables. In logistic regression, the dependent variable is typically binary, taking a value of 1 (success) or 0 (failure), with probabilities represented as $P(Y=1)$ and $P(Y=0)=1-P(Y=1)$.

The binary logistic regression model in the usual form is

$$Y_i = E(Y_i) + \varepsilon_i. \quad (1)$$

Since the distribution of the error term ε_i depends on the Bernoulli distribution of the response Y_i. The expected value of each Y_i is

$$E(Y_i) = \pi_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 + X_1 + \ldots + \beta_i X_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 + X_1 + \ldots + \beta_i X_i)}, \quad (2)$$

where $E(Y_i)$ = conditional mean given the value of X_i; β_0 = the constant of the equation; β_1 = the coefficient of the predictor variable i.

An alternative form of the logistic regression equation is:

$$\log\log\left[\pi(X)\right] = \log\log\left[\frac{\pi}{1-\pi_i}\right] = \beta_0 + \beta_1 + X_1 + \ldots + \beta_i X_i. \quad (3)$$

b. Likelihood ratio test

The likelihood ratio test (LRT) is a statistical test used to compare the goodness of fit of two models: a null model (usually a simpler model) and an alternative model (usually a more complex model). The formula for the likelihood ratio statistic is given by

$$\Lambda = L_1/L_0, \quad (4)$$

where L_0 = maximum likelihood of the null model; L_1 = maximum likelihood of the alternative model.

c. Wald Test

Wald test is used as a test of significance for the coefficients in the logistic regression. Wald statistics follow a chi-square distribution and have stated that the likelihood-ratio test is more reliable for a small sample size than the Wald test.

$$W = S \cdot E\left(\hat{\beta}_i\right). \quad (5)$$

d. The Hosmer-Lemeshow test

Goodness-of-fit statistics assess the fit of a logistic model against actual outcomes. The inferential goodness-of-fit test for logistic model is the Hosmer-Lemeshow (H-L) test. The H-L statistic, $\hat{C}$ is a person chi-square statistic, calculated from $g \times 2$ table of observed and estimated frequencies, where g is the number of groups formed from the estimated probabilities. A formula defining the calculation of $\hat{C}$ is as follows:

$$\hat{C} = \sum_{k=1}^{g} \frac{\left(O_k - n'_k \bar{\pi}_k\right)^2}{n'_k \bar{\pi}_k \left(1 - \bar{\pi}_k\right)}, \quad (6)$$

where n'_k is the total number of subjects in k^{th} group, C_k denotes the number of covariate patterns in the k^{th} decile, $O_k = \sum_{j=1}^{ch} y_i$, is the number of responses among the C_k covariate patterns, and the average estimated probability is

$$\bar{\pi}_k = \sum_{j=1}^{ch} \frac{m_j \pi_j}{n'_k}. \quad (7)$$

e. Cox and Snell R-square

Cox and Snell's define R square is a transformation of the statistics of $-2\ln\left[L(M_{intersept})/(M_{Full})\right]$ that is used to determine the convergence of

a logistic regression. The ratio of the likelihoods reflects the improvement of the full model over the intercept model (the smaller the ratio, the greater the improvement).

$L(M)$ is the conditional probability of the dependent variable given the independent variables. If there are N observations, $L(M)$ is the product of N probabilities. Thus, taking the n^{th} root of the product $L(M)$ provides an estimate of the likelihood of each Y value. Cox and Snell's pseudo-R-square has a maximum value that is not 1. If the full model predicts the outcomes perfectly and has a likelihood of 1, Cox and Snell R-square will be $(1 - L(M_{Interc})^{2/N}$, which is less than one.

f. Nagelkerke R-square

It adjusts Cox and Snell's so that the range of possible values extends to 1. To achieve this, the Cox and Snell's R-square is divided by its maximum possible value,

$$1 - L\left(M_{intercept}\right)\frac{2}{N}, \tag{8}$$

$$R^2 = \frac{1 - \left[\frac{L\left(M_{intercept}\right)}{L\left(M_{Full}\right)}\right]\frac{2}{N}}{1 - \left(M_{intercept}\right)\frac{2}{N}}. \tag{9}$$

Then, if the full model perfectly predicts the outcome and has a likelihood of 1, Nagelkerke R-square will be equal to one.

g. Omnibus test

Omnibus tests are a kind of statistical test. They test whether the explained variance in a set of data is significantly greater than the unexplained variance, overall. In addition, the Omnibus test, as a general name, refers to an overall or a global test. Other names include F-test or Chi-square test. Omnibus test as a statistical test is implemented on an overall hypothesis regarding coefficients $\beta_1 = \beta_2 = . = \beta_k$ vs. at least one pair $\beta_j \neq \beta_j'$ in Multiple linear regression or in Logistic regression. Usually, it tests more than two parameters of the same type, and its role is to find the general significance of at least one of the parameters involved. Omnibus test commonly refers to either one of those statistical tests:

- ANOVA F-test to test significance between all factor means and/or between their variance's equality in Analysis of Variance procedure;
- The omnibus multivariate F-test in ANOVA with repeated measures;
- F-test for equality/inequality of the regression coefficients in Multiple Regression;
- Chi-square test for exploring significant differences between blocks of independent explanatory variables or their coefficients in a logistic regression.

These omnibus tests are usually conducted whenever one tends to test an overall hypothesis on a quadratic statistic (such as sum of squares or variance or covariance) or rational quadratic statistic (such as the ANOVA overall F test in Analysis of Variance or F-test in Analysis of covariance or the F-test in Linear Regression, or Chi-square in Logistic regression). While significance is found on the omnibus test, it does not specify exactly where the difference occurs, meaning, it does not bring specification on which parameter is significantly different from the other, but it statistically determines that there is a difference, so at least two of the tested parameters are statistically different. If significance was met, none of those tests will tell specifically which mean is different from the others (in ANOVA), which coefficient differs from the others (in Regression) etc. The model tested can be defined by y_i, whereas y_i is the category of the dependent variable for the i-th observation and x_{ij} is the j independent variable ($j = 1, 2...k$) for that observation, β_j is the j-th coefficient of x_{ij} and indicates its influence on and expected from the fitted model.

2.2.2. Research design

This study focuses on the impact of price, health, taste, and smell on consumers' decision-making regarding edible peanut oil. The authors employ a mixed-methods approach, combining both descriptive and analytical research methodologies. The descriptive approach is used to present demographic data from the respondents. Additionally, binary logistic regression analysis is employed to examine the relationship between price, health, taste of peanut oil, and peanut oil brands. To further investigate the associations between consumer behavior and taste, smell, health, and price of peanut oil, various statistical tests were conducted, including the Chi-square test, Hosmer and Lemeshow (H-L) tests, –2 Log Likelihood, Cox & Snell R-square, and Nagelkerke R-square tests. The analysis of the data was performed using the IBM SPSS statistical analysis tool, specifically designed for social science research.

A survey research strategy is preferred for its focused investigation, while a descriptive research approach provides a detailed data explanation. Structured questionnaires are used for their efficiency in gathering primary data, and a deductive approach is used to evaluate the study's hypotheses.

2.2.3. Population and sampling

The total population of this study includes all the consumers of edible oil. However, due to the limitation of time and cost, this study was only conducted on social network friends who live within the Yangon region. There were a total of 760 social network friends available to collect data. Thus, the study population was 760. Therefore, the sample size was based upon a 760 population with known population sample size calculation formula as follows.

N = Population size = 760

Z = Z score (confidence interval 95 %) = 1.96

E = margin of error (5 %) = 0.05

p = sample proportion uncertainty = 0.5, n = sample size

$$n = N\frac{\frac{z^2 \times p \times (1-p)}{e^2}}{\left[N - 1 + \frac{z^2 \times p \times (1-p)}{e^2}\right]} \tag{10}$$

$$n = N\frac{\frac{z^2 p(1-p)}{e^2}}{\left[N - 1 + \frac{z^2 p(1-p)}{e^2}\right]} \tag{11}$$

$n = 255.3987 \sim 255$

Therefore, the sample size for this study is 255.

2.2.4. Research instrument development

The participants completed a structured survey consisting of a series of questions. Survey methods commonly utilize structured questions. The primary aim of these questionnaires is to collect responses from participants while ensuring a systematic approach to addressing the questions and conducting the survey. In this study, the questionnaires utilized a five-point Likert scale.

The data were collected through a researcher-made instrument that was used in a peanut oil company. One of the researchers works in the sales and distribution department of this company. Due to time and financial constraints, the study was confined to the Yangon region. The sample size is therefore a limitation of this investigation.

Previous investigations serve as reviews for the questionnaires used in this study, helping to choose the questions that will best meet the goals and objectives of the investigation. Specifically, the survey questions have been used by a peanut oil company where a researcher works in the sales and distribution department. The survey was structured to follow a logical order, starting with demographic data, followed by questions related to smell and taste, price considerations, and health aspects influencing participants' decisions when purchasing edible peanut oil.

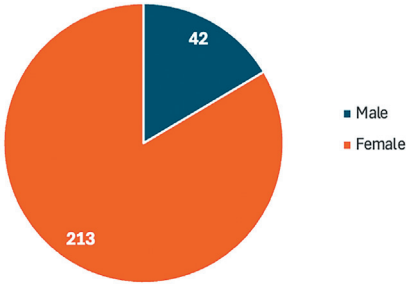
3. Results and discussion

This section analyzes the impact of brand image, taste, smell, price, and health on peanut oil consumption using regression analysis. The survey was conducted on a sample of social network friends from thirty-nine townships. Statistical analysis includes descriptive data analysis and regression analysis to identify key independent and dependent variables.

3.1. Socio-demographic characteristics of respondents

3.1.2. Respondents by gender

The socio-demographic characteristics of the respondents by gender for social network friends who are consuming peanut oil are in Figure 2.



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 2. **Respondents by gender**

Рисунок 2. **Распределение респондентов по полу**

In this survey, the total number of respondents was 255. There were 42 male respondents and 233 female respondents.

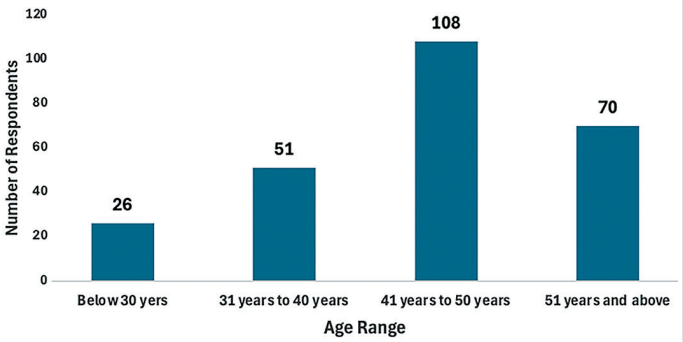
The data reveals a significant gender disparity among responders, with a male-to-female ratio of around 1:5.5. This notable gap indicates that the sample is not representative of the wider population in terms of gender, thereby affecting the overall findings and interpretations.

The predominance of female responders may create a bias in the findings. It is crucial to ascertain whether the preferences or behaviors of female consumers of peanut oil diverge from those of male customers, as this could distort the findings if generalizations are applied.

3.1.3. Total respondents by age range

The data indicates that consumers of peanut oil are primarily aged 41 to 50, with a significant portion over 50, suggesting a greater preference among middle-aged and older adults relative to younger groups (Figure 3). This indicates that marketing tactics ought to focus on these age demographics, highlighting the health advantages and culinary adaptability of peanut oil. Customized communication that aligns with their lifestyles and dietary awareness may significantly enhance engagement with this target demographic.

The limited presence of responders under 30 (10.2%) indicates a possible deficiency in attractiveness of peanut oil to younger customers, who may be influenced by modern dietary trends and brand recognition. To engage this population, marketing strategies can emphasize the adaptability and health advantages of peanut oil, utilizing platforms favored by younger consumers. Subsequent research could investigate the underlying factors of these consumption patterns and the potential evolution of preferences over time, guaranteeing that marketing efforts stay pertinent across various age demographics.



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 3. **Total respondents by age range**

Рисунок 3. **Распределение респондентов по возрастному диапазону**

3.1.4. Respondents by township

The chart shows the breakdown of 39 townships in survey (Figure 4).

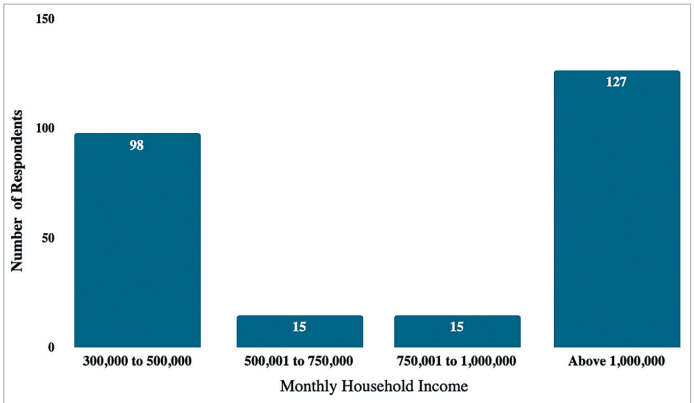
The data shows the regional distribution of respondents, reflecting differing levels of interest in the topic. Yankin had the most respondents (16), suggesting a higher population density or interest in the topic. Shwe Bo (11) and Tarmwe (13) also had notable replies, suggesting that community projects or targeted marketing methods boost involvement.

However, Kyimyinttine (2) and Mandalay (2) had low responder counts, raising questions about interest and accessibility. It is worth investigating whether these lower numbers are due to a lack of awareness, geographic isolation, or demographics that do not fit the study's goal. Magway (9) and Mingalardon (9), with moderate replies, may be good candidates for outreach or focused initiatives if they share qualities with high-participation areas.

The varied response rates across regions highlight significant disparities that warrant deeper analysis. Understanding the drivers behind high and low engagement levels can improve future surveys and enhance overall engagement in underrepresented areas, ensuring a more comprehensive understanding of the topic or product being studied.

3.1.5. Monthly income by households' range

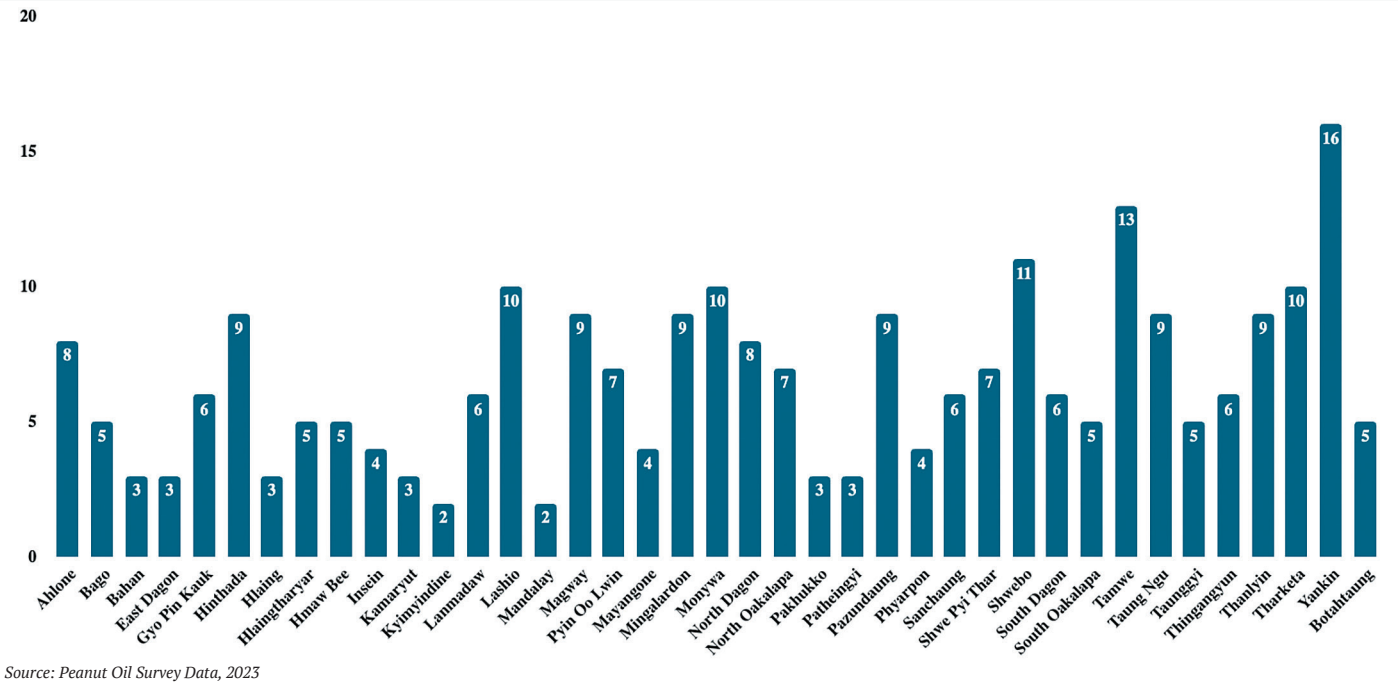
The survey results demonstrate a clear market segmentation based on household income, with a large concentration of respondents in the high-income category (above 1,000,000 kyats, or $500) and a significant representation in lower income categories (Figure 5). The high-income group has 127 respondents, whereas the two moderate income groups have 15. This suggests upper-class purchasing power and a chance to attract price-sensitive lower-income consumers.



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 5. **Monthly income by households' range**

Рисунок 5. **Распределение респондентов по диапазону дохода домохозяйств**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 4. **Respondents by Township**

Рисунок 4. **Распределение респондентов по месту жительства**

With 44% of respondents earning below 750,000 kyats (about $375), affordability may influence their purchases. For this population, marketing should highlight cost-effectiveness, while higher-income consumers (56% of respondents) may choose premium products and health benefits of peanut oil. This suggests that alternative marketing strategies can be used to meet these income groups' interests and financial needs.

3.1.6. Household size by range

The survey found that most peanut oil consumers (196 respondents) were from four- to six-person families (Figure 6). The peanut oil market may be pushed by mid-sized households due to their increased consumption needs and frequency of cooking oil-heavy meals.

Smaller households (one to three people) and bigger households (above seven members) make up only 42 and a small number of respondents, respectively, of the survey sample. This suggests that peanut oil marketing should focus on value and culinary variety for mid-sized families. Understanding this majority group's cooking habits and preferences can inform product offerings and promotional strategies.

3.2. Peanut oil usage by quality

Peanut oil users choose higher-quality goods, with 72% using medium (64 respondents) or very good (120 respondents) peanut oil (Figure 7). This shows that health concerns and the potential benefits of better-quality cooking oils are driving consumer awareness and demand for quality versus lower-grade options.

Only 28% of respondents use low-quality peanut oil, suggesting that a large minority may prefer cost over quality or be uninformed of the health risks. Marketers can educate customers about the benefits of higher-quality peanut oils to change the preferences of 28% of consumers. In addition, as most consumers value quality, brands may emphasize certifications, sourcing processes, or health benefits in their marketing.

This result opposes what Htar et al. [3] found when they looked at how people in Myanmar used vegetable oil and how they felt about brands, prices, and health issues. According to their research, Myanmar's peanut oil production went up from 2001 to 2017, but the market has changed a lot since then. Many factories have had to shut down because of the flood of cheaper, lower-quality oils, which makes the market less stable because there is not enough competition.

3.3. Peanut oil price range

With these results, peanut oil pricing should be converted from viss to kilograms, where 1 viss equals 1.6 kilograms, to examine consumer behavior in the local edible oil market (Figure 8).

Oils priced below 12,000 kyats per viss cost under $4.75 per kg, those between 12,000 and 18,000 cost between $4.75 and $6.55 per kg, those between 18,000 and 20,000 cost between $6.55 and $7.85 per kg, and those above 20,000 cost over $7.85 per kg.

The survey found that 49% of respondents choose peanut oil under $4.75 per kg, indicating economic price sensitivity. Additionally, 44% of consumers are willing to pay between $4.75 and $6.55 per kg for better quality, but few are buying oils above $6.55 per kg, indicating low interest in premium options. Marketers should target oils below $6.55 per kg to meet consumer preferences and enhance sales, as 93% of respondents prefer them. This information can help create effective marketing strategies and boost market competitiveness.

The findings support the result of the previous research that says that in a competitive market, price is seen as a monetary amount that has nothing to do with product quality. However, consumers see price as a quality measure for comparing similar items at different price points, which, along with product quality, has a big impact on buying choices [16–21].

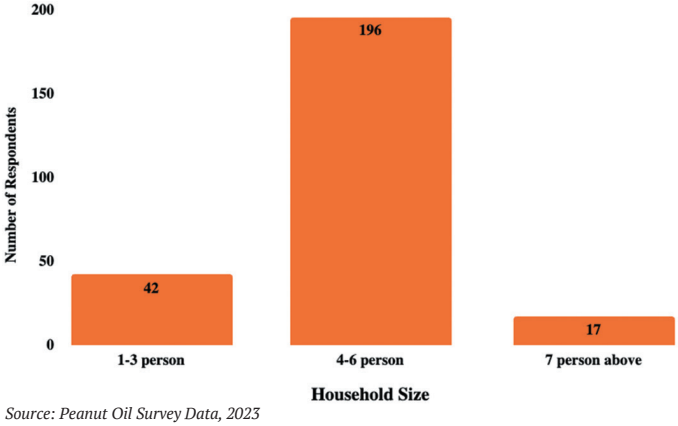
3.4. Buying place of peanut oil

Peanut oil consumption patterns show a fragmented market driven by convenience with various purchasing preferences. Respondents buy peanut oil from supermarkets, grocery stores, wet markets, oil wholesalers, and rice and oil outlets. This diversity shows how important accessibility is in consumer purchase decisions, as customers prefer convenient and reputable retail venues.

According to Figure 9, the results show that supermarkets are the most popular shopping choice, selected by 102 respondents. This likely stems from their wide variety of products, competitive pricing, and promotional offers that make them convenient and cost-effective.

Wet markets are the second choice, with 60 respondents favoring them, possibly for their fresh produce and local goods. However, the significant difference in numbers indicates that supermarkets are more appealing overall due to their convenience and selection.

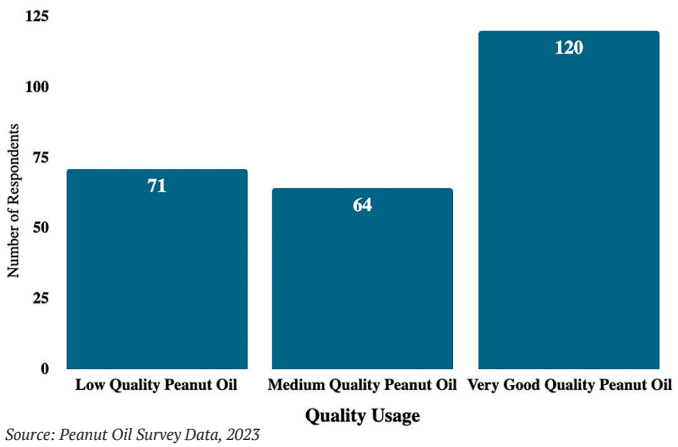
Other options, including nearest grocery stores (49 respondents), rice and oil outlets (19), and oil wholesalers (16), are less popular, likely due to their limited offerings and convenience compared to supermarkets. Nine



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 6. **Household size by range**

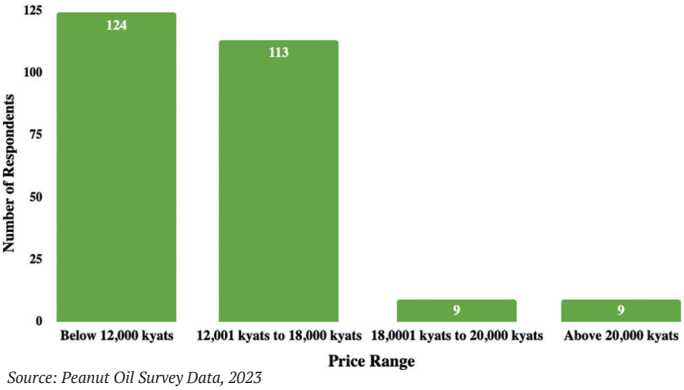
Рисунок 6. **Распределение респондентов по размеру домохозяйств**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 7. **Peanut oil usage by quality**

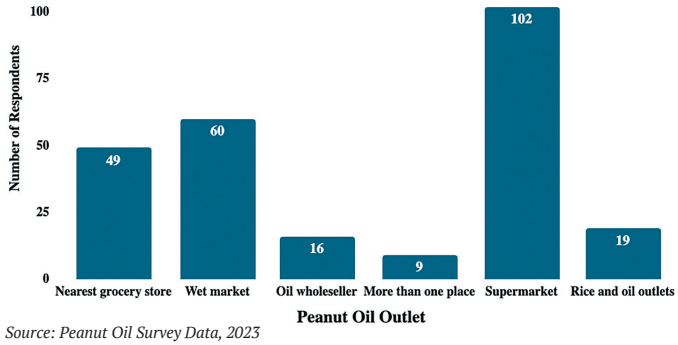
Рисунок 7. **Распределение использования арахисового масла по качеству**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 8. **Peanut oil price range**

Рисунок 8. **Диапазон цены арахисового масла**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 9. **Buying place of peanut oil**

Рисунок 9. **Место покупки арахисового масла**

respondents who shop at multiple locations may be trying to mix convenience with the freshness offered by wet markets.

While supermarkets are the clear favorite, there is still a segment of consumers who appreciate the unique benefits of other shopping options, underscoring the importance of convenience, variety, and pricing in consumer choices.

3.5. Peanut oil monthly consumption

Peanut oil consumption by month reflects consumer patterns in the examined population. Figure 10 shows that 74 % of respondents consume 1.5 viss to 2 viss of peanut oil per month, or 2.25 kg to 3 kg, as 1 viss equals 1.5 kg. Peanut oil is used by a large percentage of homes, indicating its relevance in cooking and eating. The majority of responders (184) consume this amount, indicating that this is the most common.

In contrast, 43 respondents (17 %) consume less than one viss (1.5 kg) of peanut oil each month, demonstrating a decreased reliance on this commodity. A minority of 28 respondents consume more than 2 viss, or 3 kg monthly, suggesting higher demand in homes that use peanut oil heavily. The data shows that peanut oil is essential to family consumption patterns, with a preference for moderate usage, and offers market expansion prospects targeting high-consuming areas.

This result is more than the percentage found in the survey made by Statista (2024), which says that peanut oil is the most popular edible oil in Myanmar, with 61.40 % of respondents selecting it as their preferred oil type [2].

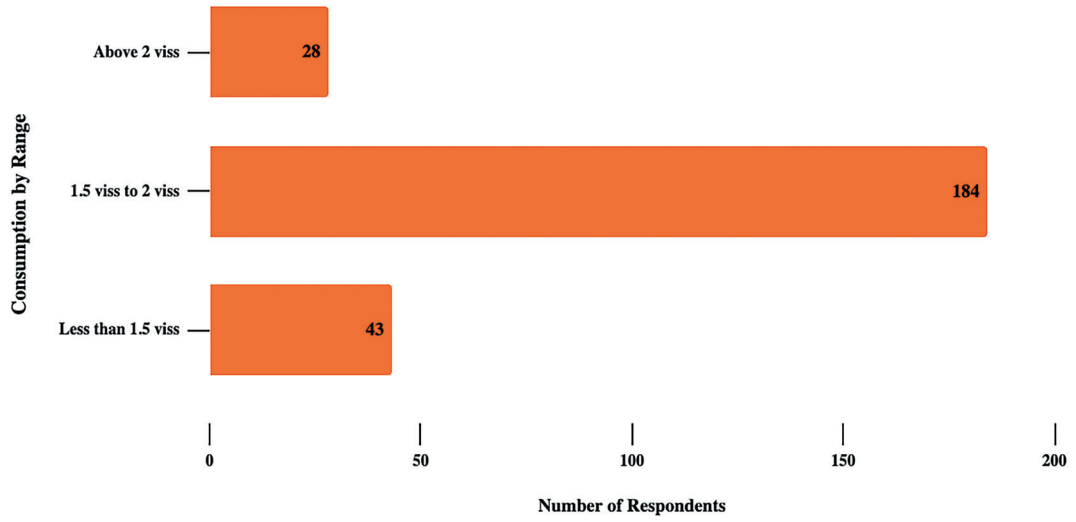
3.6 Brand orientation

The study results indicate a notable trend in brand preference among survey respondents (Figure 11). Brand development is a primary concern for marketers in diverse sectors. The study reveals that 59 % of respondents (150 persons) do not emphasize brand while choosing peanut oil, but 41 % (105 participants) demonstrated brand-oriented preferences. This indicates that for the majority of peanut oil users, brand loyalty is minimal, as they are inclined to move to an alternative brand if their chosen option is not accessible. Conversely, the brand-oriented segment exhibits heightened commitment to a certain brand, even when their preferred choice is unavailable. The research underscores the significance of branding, since a robust brand identity can facilitate sustained corporate expansion. Moreover, a favorable brand reputation can attract non-brand-oriented people to switch their loyalty to a particular brand.

3.7. Peanut oil brand currently used by respondents

The findings with respect to peanut oil brand utilization in the local market indicate a varied spectrum of customer preferences and competitive interactions. Figure 12 illustrates the diverse array of brands, highlighting a dynamic market environment influenced by regional preferences, product accessibility, and marketing tactics. Ngwe Tha Zin Min peanut oil is the preferred brand for 111 respondents, establishing its dominance. This substantial market presence indicates good positioning, likely resulting from vigorous marketing, perceived quality, and excellent distribution capabilities. The significant difference between Ngwe Tha Zin Min and its nearest competitor, Meizen peanut oil (with 47 mentions), signifies robust brand loyalty and customer confidence in Ngwe ThaZin Min.

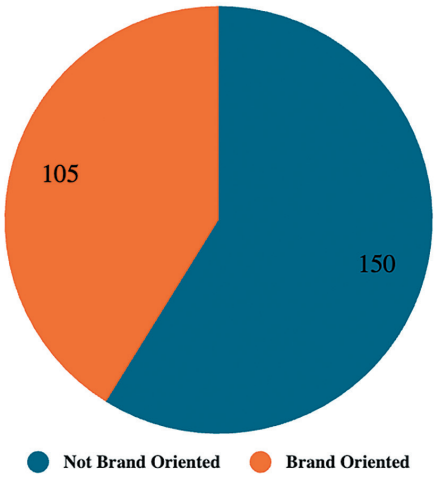
Although several brands are present in the market, most exhibit much reduced usage frequencies, leading to a fragmented consumer base. Brands such as Yangon and A May Htwar peanut oils have received merely 21 and 20 mentions, respectively, indicating that, except from Ngwe Tha



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 10. **Peanut oil monthly consumption**

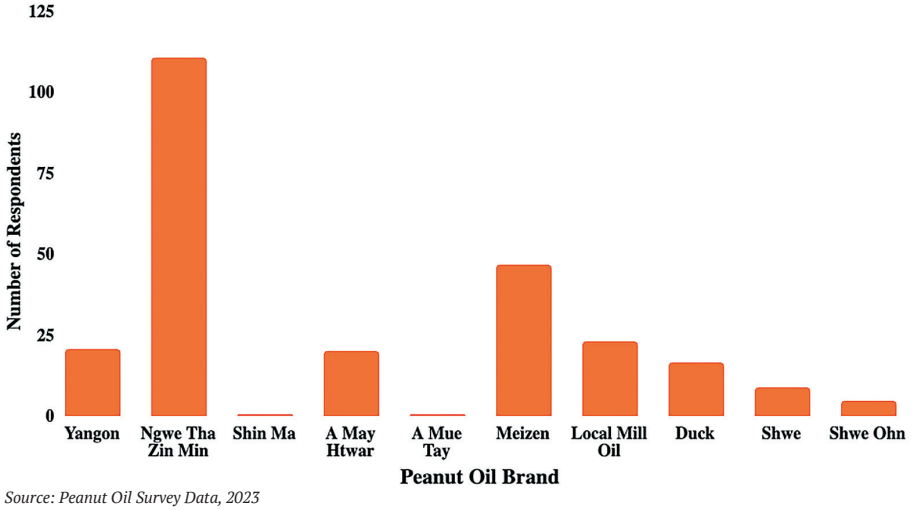
Рисунок 10. **Ежемесячное потребление арахисового масла**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 11. **Brand orientation**

Рисунок 11. **Ориентация на бренд**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 12. **Peanut oil brands currently used by respondents**

Рисунок 12. **Бренды арахисового масла, используемые респондентами в настоящее время**

Zin Min, no other brand commands a significant portion of the market. Comprehending the factors influencing consumer preferences, including affordability, perceived quality, and appeal of locally based items, may yield significant insights for marketers. The utilization of local mill peanut oil by 23 respondents indicates a preference for traditional or locally sourced products. In conclusion, although Ngwe Tha Zin Min is the market leader, the diversity of brands presents both problems and opportunities for differentiation, enabling other brands to effectively target certain consumer interests.

3.8. Peanut oil consumers' responses to price and quality

The results show that a strong 98% of consumers think that higher prices mean better quality (Figure 13). This suggests that many people use price as an instinctual way to judge a product's value. Customers are more likely to think this way when they do not know much about a product and think that a higher price usually means better quality.

For companies, this means that pricing their goods below what customers expect may make people doubt their quality, even if the quality is actually very good. Companies must carefully look at their pricing plans to make sure they match how customers see them. People who care about prices may be drawn to lower prices, but people who think that higher prices mean better quality may feel alienated. Businesses must put a high priority on maintaining a strong brand reputation and clearly explaining the value of their goods in order to build trust and boost sales.

3.9. Consumers' responses to peanut oil taste and smell

The results show that peanut oil has a very positive response, with 99% of people saying they like the way it tastes and smells (Figure 14). This strong preference shows that peanut oil is liked by consumers, which means it might be useful in cooking and making food items. Nearly everyone likes peanut oil, which could mean that it has a special place in the market and affects people's choices when they are looking for aromatic and flavorful food oils.

The one negative answer shows that there are not many people who disagree, which supports the idea that peanut oil could be a safe and popular choice for cooking. These results give businesses a chance to sell peanut oil with confidence, focusing on how good it tastes. However, it is important to think about the product's positioning and target audience, especially for people who may have peanut allergies or dietary limits. Overall, people's strong desire for peanut oil could help its marketing as an ingredient that can be used in many different foods.

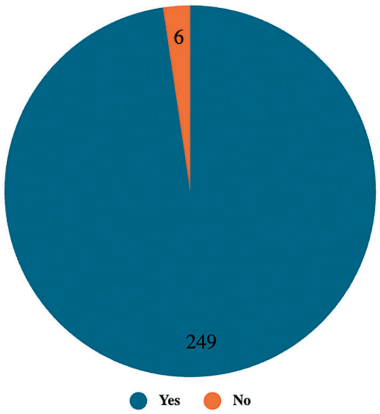
3.10. Health awareness of peanut oil consumers

The findings reveal that 90% of participants consider peanut oil advantageous for health, reflecting significant consumer awareness (Figure 15). This corresponds with the increasing emphasis on health regarding cooking oils. The uncertainty of 10% of respondents on the health advantages of peanut oil underscores the necessity for further education on the subject. This uncertainty may arise from insufficient knowledge regarding different cooking oils. This presents a chance to educate the public of the health advantages of peanut oil and to rectify any misunderstandings.

This result aligns with the 2023 report from Global New Light Myanmar, indicating an increased awareness among consumers about cooking oil quality and a desire for healthier options amid concerns about distinguishing blended oils from potentially harmful alternatives [24].

3.11. Suggestion by respondents

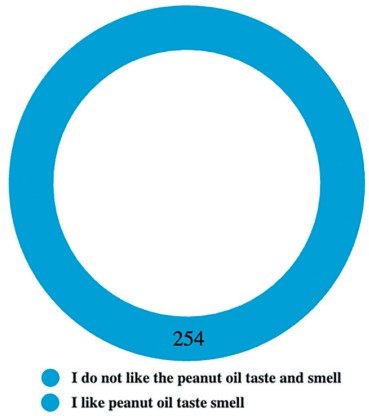
The results show that people who buy peanut oil are passionate about it, with a big focus on how delicious it is (Figure 16). Sixty-seven respondents especially mentioned how delicious peanut oil tastes in cooking



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 13. **Peanut oil consumers' responses to price and quality**

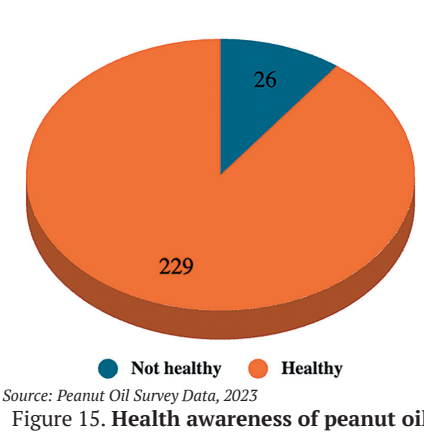
Рисунок 13. **Реакции потребителей арахисового масла на цену и качество**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 14. **Consumers' responses to taste and smell of peanut oil**

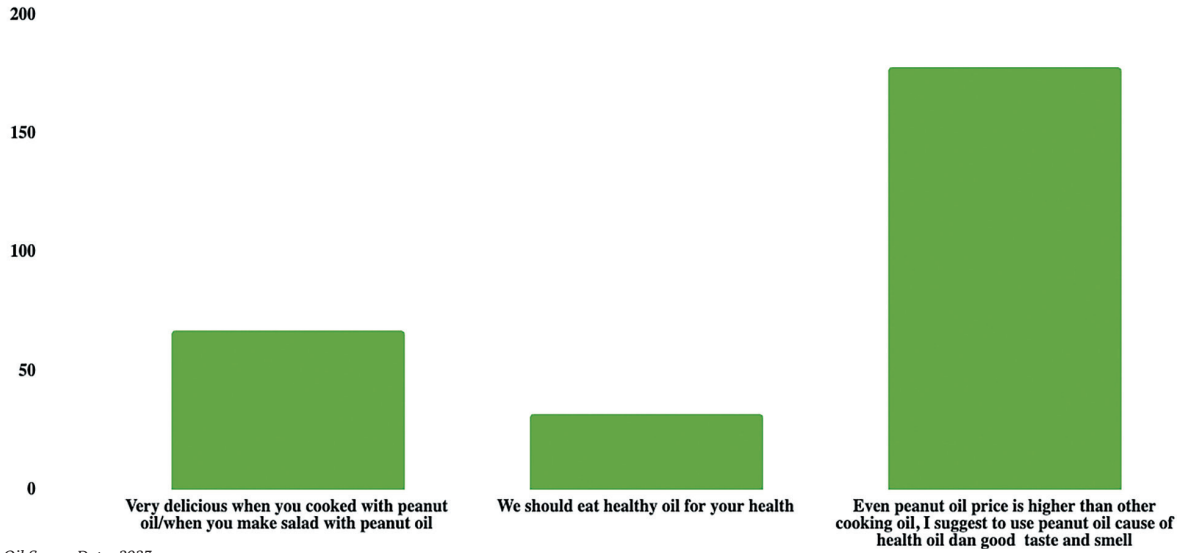
Рисунок 14. **Реакции потребителей на вкус и запах арахисового масла**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 15. **Health awareness of peanut oil consumers**

Рисунок 15. **Осведомленность потребителей арахисового масла о пользе для здоровья**



Source: Peanut Oil Survey Data, 2023

Figure 16. **Suggestion by respondents**

Рисунок 16. **Предложения потребителей**

and salads. This shows how versatile and tasty it is. Also, 32 responders talked about how good it is for health, which is a big selling point for consumers who might start using it. Notably, even though prices are going up, 178 of those who answered the survey still suggest peanut oil, showing that they value its benefits and perceived value more than cost. This means that there is a good chance that more people will start using peanut oil if the marketing is good and stresses both the taste and health benefits.

3.4. Binary logistic regression model of purchasing decision-making regarding peanut oil based on price, health, taste and smell

3.4.1. Variable in the binary logistic regression model

Based on the survey data of binary logistic regression analysis (Table 1), peanut oil consumption is considered as an independent variable and peanut oil price, taste and smell and health are considered as dependent variables. In this survey, the respondents are peanut oil consumers being friends in social network. Purchasing decision making regarding peanut oil brand is considered a dependent variable. Peanut oil price, peanut oil taste and smell, and health are considered independent variables.

Table 1. **Variables in binary logistic regression model**

Таблица 1. **Переменные в модели бинарной логистической регрессии**

Dependent variables	Independent variables
Peanut oil price, taste and smell and health	Peanut oil consumption

Source: Peanut Oil Survey Data.

3.4.2. Binary logistic regression analysis for purchasing decision making depending on price

The value of omnibus test of model coefficient given Chi-square, Hosmer and Lemeshow (H-L) tests, –2 Log Likelihood, Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square are included in the model fitting information for peanut oil price in Table 2.

Table 2. **Model fitting information for binary logistic regression model for price**

Таблица 2. **Информация по подгонке модели для модели бинарной логистической регрессии для цены**

Model fitting criteria	Chi-square	Df	p-value
Omnibus test of model coefficient	10.670	1	0.001ss
Hosmer and Lemeshow (H-L) tests	0.813	4	0.937
-2Log Likelihood		185.816	
Cox & Snell R-square		0.041	
Nagelkerke R-square		0.076	

Source: Peanut Oil Survey Data.

In the Omnibus tests of model coefficients, the inclusion of the four predictor variables yields a chi-square value of 10.670 with 1df, $p < 0.001$. Thus, the overall model is *statistically significant,* and the model *is a good fit,* which means that adding the pricing predictor variables to the model have significantly increased the ability to predict whether the pricing variable influences the purchasing decision making regarding peanut oil brands. There is no evidence of lacking fit based on the H-L statistics (Chi-square = 0.813, df = 4, p-value = 0.937). The Hosmer and Lemeshow test is a model fit test. P-value = 0.937 is greater than 0.05, it shows the model adequately fits the data. Hence, there is no difference between the observed and predicted model. Since –2 log likelihood statistic is 185.816, it can be said that the existence of a relationship between the independent variables and dependent variables is supported. The model fitting information includes two different ways of estimating *R*-square (Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square). This pseudo-*R* estimate indicates that 4.1 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil brands based on price and 7.6 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil brands based on peanut oil price can be explained by the variation in independent variables. The results of purchasing decision making regarding peanut oil brands based on peanut oil price in Binary Logistic with selected socio-economic and demographic characteristics model are shown in Table 3.

Binary logistic regression model is performed on the purchasing decision making regarding peanut oil brands based on price. The results are shown in Table 4.

According to the results, peanut oil price has a positive influence on purchasing decision making of peanut oil brand. Although peanut oil price is found to be statistically significant at 1 %, the 95 % confidence interval suggests that the magnitude of the effect could be anywhere from a 0.691 to a 0.914-fold decrease.

Table 4. **Variable in binary logistic regression model of purchasing decision making based on health benefits**

Таблица 4. **Переменная в модели бинарной логистической регрессии принятия решения о покупке на основе пользы для здоровья**

Dependent variables	Independent variables
Y_1 = *Purchasing depending on healthy oil* = 0, do not purchase, peanut oil is not healthy. = 1, I think peanut oil is healthy.	X_{i1} = Consumer purchasing decision making regarding peanut oil brands

Source: Peanut Oil Survey Data.

3.4.3. Binary logistic regression analysis for purchasing decision making based on health

The values of omnibus test of model coefficient given Chi-square, Hosmer and Lemeshow (H-L) tests, –2 Log Likelihood, Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square are included in the model fitting information for "peanut oil is healthy" in Table 5.

Table 5. **Model fitting information for binary logistic regression model for health**

Таблица 5. **Информация по подгонке модели для модели бинарной логистической регрессии для пользы для здоровья**

Model Fitting criteria	Chi-square	Df	p-value
Omnibus test of model coefficient	10.179	1	0.001
Hosmer and Lemeshow (H-L) tests	1.724	4	0.786
–2Log Likelihood		157.8	
Cox & Snell *R*-square		0.039	
Nagelkerke *R*-square		0.081	

Source: Peanut Oil Survey Data.

In the Omnibus tests of model coefficients, the inclusion of the four predictor variables yields a chi-square value of 10.179 with 1df, $p < 0.001$. Thus, the overall model is statistically significant, which means that adding the healthy predictor variables to the model has significantly increased an ability to predict whether the health variable influences the purchasing decision making regarding peanut oil brands. There is no evidence of lacking fit based on the H-L statistics (Chi-square = 1.724, df = 4, p-value = 0.786). The Hosmer and Lemeshow tests are model fit tests. P-value = 0.786 is greater than 0.05, it is showing the model adequately fits the data. Hence, there is no difference between the observed and predicted model. Since –2 log likelihood statistic is 157.800[a], it can be said that the existence of a relationship between the independent variables and dependent variables is supported. The model fitting information includes two different ways of estimating *R*-square (Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square). This pseudo-*R*-square estimate indicates that 3.9 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil brands based on health and 8.1 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil brands based on peanut oil healthy aspect can be explained by the variation in independent variables. The results of purchasing decision making of peanut oil brands based on peanut oil health aspect in binary logistic with selected socio-economic and demographic characteristics model are shown in Table 6.

Binary logistic regression model is performed on the purchasing decision making because of the healthy aspect of peanut oil brands. The results are shown in Table 6. According to the results, peanut oil is healthy which has influence on the purchasing decision making regarding peanut oil brand. It is found to be statistically significant at 2 %, the 95 %

Table 3. **Parameter estimates of binary logistic regression model for purchasing decision making based on peanut oil price**

Таблица 3. **Оценки параметров модели бинарной логистической регрессии принятия решения о покупке на основе цены на арахисовое масло**

	B	S. E	Wald	Df	Sig.	Exp(B)	95 % C.I. for EXP(B)	
							Lower	Upper
Constant	2.978	0.420	50.273	1	***0.000	19.641		
Purchasing decision making of peanut oil brands	-0.230	0.071	10.341	1	***0.001	0.795	0.691	0.914

Note: ***, **, * represent 1 %, 5 % and 10 % levels of significance.

confidence interval suggests that the magnitude of the effect could be anywhere from a 0.667 to a 0.911-fold increase.

Table 6. **Parameter estimates of binary logistic regression model purchasing decision making based on health considerations**

Таблица 6. **Оценки параметров модели бинарной логистической регрессии принятия решения о покупке на основе соображений здоровья**

	B	S. E	Wald	Df	Sig.	Exp(B)	95 % C.I. for EXP(B)	
							Lower	Upper
Constant	3.360	0.482	48.658	1	***0.00	28.792		
Purchasing decision making regarding peanut oil brands	0.249	0.08	9.761	1	***0.002	0.780	0.667	0.911

Note: ***, **, * represent 1 %, 5 % and 10 % levels of significance.

Table 7. **Variable in binary logistic regression model of purchasing decision making based on taste and smell**

Таблица 7. **Переменная в модели бинарной логистической регрессии принятия решения о покупке на основе вкуса и запаха**

Dependent Variables	Independent Variables
Y_1 = *Purchasing depending on Taste and Smell* = 0, purchase depending on taste and smell (taste and smell are good)) = 1, do not purchase depending on taste and smell.	X_{i1} = Consumer purchasing decision making regarding peanut oil brands

Source: Peanut Oil Survey Data.

3.4.4. Binary logistic regression analysis for purchasing decision making based on taste and smell

The value of omnibus test of model coefficient given Chi-square, Hosmer and Lemeshow (H-L) tests, –2 Log Likelihood, Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square are included in the model fitting information for "peanut oil has good taste and smell" (Table 8).

Table 8. **Model fitting information for binary logistic regression model for taste and smell**

Таблица 8. **Информация по подгонке модели для модели бинарной логистической регрессии для вкуса и запаха**

Model Fitting criteria	Chi-square	Df	p-value
Omnibus test of model coefficient	0.309	1	0.579
Hosmer and Lemeshow (H-L) tests	3.960	4	0.411
-2Log Likelihood		108.17	
Cox & Snell R-square		0.001	
Nagelkerke R-square		0.003	

Source: Peanut Oil Survey Data.

In the Omnibus tests of model coefficients, the inclusion of the four predictor variables yields a chi-square value of 0.309 with 1df, $p > 0.001$. Thus, the overall model is not statistically significant, which means that adding the taste and smell predictor variables to the model have not significantly increased an ability to predict whether the taste and smell variable influences purchasing decision making regarding peanut oil brands. There is no evidence of lacking fit based on the H-L statistics (Chi-square = 3.960, df = 4, p-value = 0.411). Since the –2-log likelihood statistics is 108.170[a], it can be said that the existence of a relationship between the independent variables and dependent variables is supported. The model fitting information includes two different ways of estimation *R*-square (Cox & Snell *R*-square and Nagelkerke *R*-square). These pseudo-*R*-square estimates indicate that 4.1 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil based on taste and smell and 7.6 % of variation in purchasing decision making regarding peanut oil based on peanut oil taste and smell can be explained by the variation in independent variables. The results of monthly consumption per person based on peanut oil price in Binary Logistic with selected socio-economic and demographic characteristics model are shown in Table 8.

Table 9. **Parameter estimates of binary logistic regression model for purchasing decision making based on taste and smell**

Таблица 9. **Оценки параметров модели бинарной логистической регрессии принятия решения о покупке на основе вкуса и запаха**

	B	S. E	Wald	Df	Sig.	Exp(B)	95 % C.I. for EXP(B)	
							Lower	Upper
Constant	2.608	0.498	27.381	1	***0.000	13.575		
Brands	0.061	0.111	0.298	1	0.585	1.063	0.854	1.322

Note: ***, **, * represent 1 %, 5 % and 10 % levels of significance.

The binary logistic regression model was used for the purchasing decision making based on taste and smell of peanut oil brands. According to the results, taste and smell of peanut oil (independent variable) was not significantly influenced by the purchasing decision making regarding peanut oil brands.

4. Conclusions

The study findings reveal several key insights regarding consumer behavior and preferences related to peanut oil.

Firstly, the majority of respondents have sufficient income to afford peanut oil for their daily consumption, with most prices falling within the range of 10,000 to 20,000 kyats or $3.57 to $7.14. Consumers strongly associate price with quality, indicating that they view price as a crucial indicator of product quality. Additionally, a significant portion of consumers (59 %) exhibit brand orientation, suggesting that brand loyalty plays a role in their purchasing decisions. However, fluctuations in prices may prompt non-brand-oriented consumers to switch to other brands.

Concerningly, 10 % of respondents perceive peanut oil as unhealthy, highlighting the importance of marketers' efforts to ensure that their products are perceived as part of the healthy oil category. On the contrary, 90 % of consumers are aware of health benefits of peanut oil and perceive it as a healthy option.

Regarding the factors influencing consumer decision-making, binary linear regression results indicate that while taste and smell are not significant predictors, both price and health considerations significantly impact consumer choices.

Even slight changes in price or health perceptions can lead to shifts in consumer purchasing decisions. Logistic regression analysis further confirms the significance of price and health concerns in influencing consumers' choices of peanut oil brands.

The data accuracy for these factors is high, indicating a strong relationship between price, health considerations, and brand preferences among consumers.

REFERENCES

1. Statista. (2024). Edible Oils — Myanmar. Retrieved from https://www.statista.com/outlook/cmo/food/oils-fats/edible-oils/myanmar Accessed March 20, 2024.
2. Htoon, K. L. (2018, February 6). Myanmar's edible oils sector bites back against palm oil. Frontier Myanmar. Retrieved from https://www.frontiermyanmar.net/en/myanmars-edible-oils-sector-bites-back-against-palm-oil-2/ Accessed March 20, 2024.
3. Htar, M. T., Myint, T., Soe, T. T., Moh, M., Aye, Y. N., Hnin, C. H. et al. (2022). Analysis of edible oil consumption in Myanmar: Consumers' perception towards brands, price and health aspects. FFTC Agricultural Policy Platform. Retrieved from https://ap.fftc.org.tw/article/3103 Accessed May 20, 2024.
4. Moh, M., Myint, T., Win, C.Z., Soe, T.T., Htin, C.H., Hnin, T. (2021). Does Myanmar Have Sufficient Edible Oil Production? Retrieved from https://ap.fftc.org.tw/article/2936 Accessed May 20, 2024.
5. Belton, B., Win, M. T. (2019). Food Security Policy Project (FSPP). The edible oil milling sector in Myanmar's dry zone. Michigan State University, 2019.
6. Singh, P., Arora, L., Choudhry, A. (2022). Consumer behavior in the service industry: An integrative literature review and research agenda. *Sustainability*, 15(1), Article 250. https://doi.org/10.3390/su15010250
7. Sbakhi, B., Esa, M., Mohd, W. M. S. (2018). Investigation study towards consumer behavior and purchasing decisions. *International Journal of Supply Chain Management*, 7(5), 559–563.
8. Ganlari, D. (2018). A study on consumer buying behavior of mobile phones. *Journal of Management in Practice (Online Only)*, 1(1), 1–26.
9. Kotler, P. (2020). The consumer in the age of coronavirus. *Journal of Creating Value*, 6(1), 12–15.
10. Kotler, P., Kartajaya, H., Setiawan, I. (2021). Marketing 5.0: Technology for humanity. John Wiley and Sons, 2021.
11. Chen, C.-M., Liu, H.-M., Ann, B.-Y. (2018). Product attributes and purchase intention for smartphones: A moderated mediation model. *International Journal of Mobile Communications*, 16(1), 1–23. https://doi.org/10.1504/ijmc.2018.088270
12. Stankevich, A. (2017). Explaining the consumer decision-making process: Critical literature review. *Journal of International Business Research and Marketing*, 2(6), 7–14. https://doi.org/10.18775/jibrm.1849-8558.2015.26.3001
13. Panwar, D., Anand, S., Ali, F., Singal, K. (2019). Consumer decision making process models and their applications to market strategy. *International Management Review*, 15(1), 36–44.

14. Kotni, V. V. D. P. (2020). An adapted model for the consumer decision making process of hand sanitizer products in COVID-19 scenario. *Dogo Rangsang Research Journal*, 10(10), 363–374.
15. Sri, A., Samari, Faisol. (2022). Internal and external factors of consumer behaviour: Phenomenon in buying decisions at the Keboen Rodjo Restaurant, Kediri. *EFEKTOR*, 9(1), 35–47. https://doi.org/10.29407/e.v9i1.16454
16. Akdogan, C. (September 11–12, 2021). *A Study on the effect of price on consumer purchase decision-making*. Conference: XVI. IBANESS Congress Series on Economics, Business and Management. İstanbul, 2021.
17. Yu, U.-J., Cho, E., Johnson, K. K. (2017). Effects of brand familiarity and brand loyalty on imagery elaboration in online apparel shopping. *Journal of Global Fashion Marketing*, 8(3), 193–206. https://doi.org/10.1080/20932685.2017.1284603
18. Weerasooriya, N. L., Mendis, E. (2023). Study on consumer knowledge, attitude and purchasing practices regarding edible fats and oil in Kandy. Preprints 2023, 2023081437. https://doi.org/10.20944/preprints2023
19. Auf, M. A. A., Meddour, H., Saoula, O., Majid, A. H. A. (2018). Consumer buying behavior: The roles of price, motivation, perceived culture importance, and religious orientation. *Journal of Business and Retail Management Research*, 12(4), 177–186. https://doi.org/10.24052/jbrmr/v12is04/art-18
20. Mohammed, R., Murova, O. (2019). The effect of price reduction on consumer's buying behavior in the US differentiated yogurt market. *Applied Economics and Finance*, 6(2), 32–42.
21. Qalat, S. A., Yuan, L. W., Iqbal, S., Hussain, R. Y., Ali, S. (2019). Impact of price on customer satisfaction: Mediating role of consumer buying behavior in telecom sector. *International Journal of Research*, 6(4), 150–164.
22. Jesadiya, B., Thorat, V. S., Choudhary, K., Kuthe, S. (2023). Consumers' awareness and buying behaviour for edible oils in Surendranagar city of Gujarat. *International Journal of Education and Management Studies*, 13(3), 292–296.
23. Pandey, R., Kumari, S., Kumari, K. (2022). Consumers preference in edible oil in Patna city, Bihar. *International Journal of Home Science*, 8(1), 8–12.
24. Global New Light of Myanmar. (2023). Consumers call for hazard assessment of edible oil oil Retrieved from https://www.gnlm.com.mm/consumers-call-for-hazard-assessment-of-edible-oil/ Accessed May 25, 2024.
25. Bajpai, P., Mogra, R. (December 8–10, 2016). *Effect of blending groundnut oil with palm and sunflower oil on physicochemical properties*. 8th International Conference on Clinical Nutrition. Dubai, UAE, 2016.
26. Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Archives of Toxicology*, 94(3), 651–715. https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3
27. Moncel, B. (2022). What is peanut oil? Spruce Eat. Retrieved from https://www.thespruceeats.com/what-is-peanut-oil-1328456 Accessed May 25, 2024.
28. How to judge the quality of edible vegetable oil Retrieved from https://www.seedoilpress.com/news/how-to-judge-quality-of-edible-vegetable-oil.html Accessed May 25, 2024.
29. Kotler, P. T., Armstrong, G. (2017). Principles of Marketing, eBook, Global Edition: Principles of Marketing. Pearson Education, 2017.
30. Index Mundi. (2023). Peanut Oil Food Use Domestic Consumption by Country in 1000 MT Retrieved from https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=peanut-oil graph=food-use-domestic-consumption Accessed May 20, 2024.
31. Solomon, M. R. (2020). Consumer behavior: Buying, having, and being. Pearson Education, 2020.

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Silvi Hafianti, Doctor in Business Administration, Department of Master in Bio Management, School of Business, Indonesia International Institute for Life Sciences (i3L) Jl. Pulomas Barat Kav. 88, Kayu Putih, Jakarta Timur 13210, Jakarta, Indonesia Tel.: +62–811–26–79–72 E-mail: silvi.hafianti@i3l.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1487-2647	**Хафианти Сильви** — доктор делового администрирования, факультет магистратуры по био-менеджменту, Школа бизнеса, Международный институт естественных наук 13210, Индонезия, Восточная Джакарта, Джакарта, Уайт-Вуд, Западная ул., 88 Тел.: +62–81–26–79–72 E-mail: silvi.hafianti@i3l.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1487-2647
Elizabeth Furio Perez, Doctor in Business Administration, Department of Master in Bio Management, School of Business, International Institute for Life Sciences (i3L) Jl. Pulomas Barat Kav. 88, Kayu Putih, Jakarta Timur 13210, Jakarta, Indonesia Tel.: +62–87–883–86–50–80 E-mail: elizabeth.perez@i3l.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9949-3072 * corresponding author	**Перес Эдизпбет Фурио** — доктор делового администрирования, факультет магистратуры по био-менеджменту, Школа бизнеса, Международный институт естественных наук 13210, Индонезия, Восточная Джакарта, Джакарта, Уайт-Вуд, Западная ул., 88 Тел.: +62–87–883–86–50–80 E-mail: elizabeth.perez@i3l.ac.id ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9949-3072 * автор для контактов
Than Win, Master of Business Administration, Department of Business Administration, River Samon Institute of Management Panchan Tower, Bagayar Road, Yangon Region Yangon, Myanmar Tel.: +95–942–116–19–02 E-mail: tan than.win1@dksh.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4556-3741	**Вин Тан** — магистр по направлению делового администрирования, Институт менеджмента Ривер-Самон Мьянма, регион Янгон, Янгон, Багаяр-роуд, Башня Панчан Тел.: +95–942–116–19–02 E-mail: tan than.win1@dksh.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4556-3741
Arif N. M. Ansori, Ph.D. in Veterinary Science, Researcher, Postgraduate School, Universitas Airlangga Jl. Airlangga 4–6, Surabaya, East Java, 60115, Indonesia Tel.: +628–214–464–78–32 E-mail: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-3904	**Анзори Ариф Нур Мухаммад** — PhD, Доктор ветеринарных наук, научный сотрудник аспирантуры, Университет Айрлангга 60115, Индонезия, Восточная Ява, Сурабая, округ Мулиорехо, Джл. Айрлангга 4–6 Тел.: +628–214–464–78–32 E-mail: ansori.anm@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1279-390
Hai T. Sam, PhD in Technology Management and Business, Professor, Faculty of Business and Communication, INTI International University and Colleges Persiaran Perdana BBN Putra Nilai, 71800 Nilai, Negeri Sembilan, Malaysia Tel: +60–12–711–73–67 E-mail: toonghai.sam@newinti.edu.my ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7145-5625	**Хай Тунг Сэм** — PhD Управление технологиями и бизнес, профессор, факультет бизнеса и коммуникаций, Международный университет и колледжей INTI 71800, Малайзия, Нигери-Сембилан, Нилай, Персиаран Пердана BBN Путра Тел: +60–12–711–73–67 E-mail: toonghai.sam@newinti.edu.my ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7145-5625

Contribution	Критерии авторства
Authors are equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.

Conflict of interest	Конфликт интересов
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-167-172

Поступила 03.11.2024
Поступила после рецензирования 17.04.2025
Принята в печать 21.04.2025
© Кондратьев Н. Б., Руденко О. С., Осипов М. В., Белова И. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОВОЙ ДОЛИ КАКАО-ПРОДУКТОВ В КОНДИТЕРСКИХ ИЗДЕЛИЯХ ПО СОДЕРЖАНИЮ АЛКАЛОИДОВ

Кондратьев Н. Б., Руденко О. С.,* Осипов М. В., Белова И. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *кондитерские изделия, теобромин, кофеин, капиллярный электрофорез, какао-бобы, какао-порошок, какао тертое, остаток какао*

АННОТАЦИЯ

Наличие алкалоидов группы метилксантинов, таких как кофеин, теобромин и теофиллин, характерно для продуктов переработки какао-бобов. Теобромин не содержится в других видах сырья, поэтому его содержание может служить индикатором определения какао-продуктов. Какао-продукты используются в различных видах кондитерских изделий для улучшения вкуса и аромата, однако методики, позволяющие определить содержание какао-продуктов в изделиях, кроме шоколадных, отсутствуют. Объектами исследования выбраны продукты переработки какао-бобов: какао-порошок, какао тертое и сахаристые кондитерские изделия, включая шоколад, кондитерские плитки и начинки для вафель, изготовленные с их использованием. Теобромин и кофеин определяли с использованием метода капиллярного электрофореза после кислотного гидролиза образцов. Определено содержание теобромина в какао-бобах, какао-порошке и какао тертом. На основе этих данных рассчитано содержание теобромина в пересчете на сухой обезжиренный остаток какао 1560 мг/100 г и предложена формула для расчета массовой доли сухого обезжиренного остатка какао. Разработанная методика с рассчитанными метрологическими показателями позволяет проводить измерение массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в сахаристых кондитерских изделиях, для изготовления которых использованы продукты переработки бобов какао. Предложенный подход может быть использован как эффективный экспресс-метод исследования состава многокомпонентных сахаристых кондитерских изделий для оценки их качества и определения содержания сухого обезжиренного остатка какао — важнейшего идентификационного критерия содержания продуктов переработки какао-бобов.

Received 03.11.2024
Accepted in revised 17.04.2025
Accepted for publication 21.04.2025
© Kondratev N. B., Rudenko O. S., Osipov M. V., Belova I. A., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE MASS FRACTION OF COCOA PRODUCTS IN CONFECTIONERY BY THE CONTENT OF ALKALOIDS

Nikolay B. Kondratev, Oxana S. Rudenko*, Maxim V. Osipov, Irina A. Belova

All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry, Moscow, Russia

KEY WORDS: *confectionery, theobromine, caffeine, capillary electrophoresis, cocoa beans, cocoa powder, cocoa mass, cocoa solids*

ABSTRACT

The presence of methylxanthine alkaloids such as caffeine, theobromine and theophylline is characteristic of cocoa bean processing products, but theobromine is not contained in other types of raw materials. Therefore, the theobromine content can be used as an indicator of the content of cocoa products. Cocoa products are used in various types of confectionery products to improve the taste and aroma; however, there are no methods to determine the content of cocoa products in confectionery products that do not belong to the chocolate group. Cocoa bean processing products such as cocoa powder, cocoa mass and sugar confectionery products, including chocolate, confectionery bars and wafer fillings made with their use, were objects of the study. Theobromine and caffeine were determined using the capillary electrophoresis method after acid hydrolysis of samples. The theobromine content in cocoa beans, cocoa powder and cocoa mass was determined. Based on these data, the theobromine content was calculated in terms of dry fat-free solids of cocoa of 1560 mg/100 g and a formula was proposed for calculating the mass fraction of dry fat-free solids of cocoa. The developed method with calculated metrological indicators allows measuring the mass fraction of dry fat-free solids of cocoa in sugar confectionery products made from cocoa bean processing products. The proposed approach can be used as an effective express method for studying the composition of multicomponent sugar confectionery products to assess their quality and determine the amount dry fat-free solids of cocoa, which is the most important identification criterion for the content of cocoa bean processing products.

1. Введение

Кондитерские изделия, изготовленные с использованием продуктов переработки какао-бобов, пользуются особенной популярностью у потребителей: шоколад, шоколадные пряники, вафли, печенье, начинки и др. Вопросы определения содержания какао-продуктов в кондитерских изделиях возникают при оценке качества при отсутствии инструментальных методик исследования [1], однако для определения содержания сухого обезжиренного остатка какао в шоколаде используется ГОСТ 31723-2012[1].

Для различных наименований шоколада разработаны требования к значениям идентификационных показателей и соответствующие методики их исследований. Эти методики основаны на классических методах выделения компонентов, газожидкостной хроматографии, а также на способе определения белка по Кьельдалю. На основе таких методик разработаны государственные стандарты. Однако методики и соответствующие государственные стандарты для многих других наименований кондитерских изделий в настоящее время не разработаны.

Содержание жирных кислот, триглицеридов, стеролов, алкалоидов и других компонентов в кондитерских изделиях могут служить маркерами используемого сырья. Их соотношение находится

[1] ГОСТ 31723-2012 «Изделия кондитерские. Метод определения содержания сухого обезжиренного остатка какао в шоколадных изделиях». М.: Стандартинформ, 2018. — 11 с.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Кондратьев, Н. Б., Руденко, О. С., Осипов, М. В., Белова, И. А.** (2025). Разработка методики определения какао — продуктов в кондитерских изделиях по содержанию алкалоидов. *Пищевые системы*, 8(2), 167–172. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-167-172

FOR CITATION: **Kondratev, N. B., Rudenko, O. S., Osipov, M. V., Belova I. A.** (2025). Development of a method for determining the mass fraction of cocoa products in confectionery by the content of alkaloids. *Food Systems,* 8(2), 167–172. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-167-172

в определенных диапазонах. Разработка методик идентификации пищевой продукции с использованием новых критериев идентификации является важной задачей для пищевой отрасли. Особое внимание уделяется комплексному подходу к идентификации пищевых продуктов [2], включая мед, с использованием инструментальных методов анализа, предложенных авторами работы [3].

Авторы [4] исследовали содержание теобромина и других алкалоидов в 17 образцах шоколада с использованием метода ВЭЖХ. Наблюдалась положительная корреляция между теобромином и кофеином. В работе [5] для определения кофеина, теобромина и теофиллина в шоколаде использована жидкостная хромато-масс-спектрометрия.

Авторами работы [6] также исследована возможность идентификации различных наименований шоколада по содержанию кофеина и теобромина. Изучено сырье и полуфабрикаты, используемые для производства шоколада различных наименований. Содержание теобромина в какао-бобах составляет 546–1047 мг на 100 г, в какао-порошке — 656–1694 мг на 100 г, в какаовелле — 779–1209 мг на 100 г. В масле какао алкалоиды практически отсутствуют. При увеличении количества какао-продуктов в шоколаде содержание теобромина и кофеина также возрастает, в горьком шоколаде определено 357–668 мг кофеина и 525–803 мг теобромина на 100 г продукта. Сделан вывод о возможности использования полученных данных для определения содержания какао-продуктов в кондитерских изделиях, содержащих продукты переработки какао-бобов.

Методика определения теобромина разработана для установления качества темного шоколада. Теобромин извлекают из водных вытяжек шоколада, экстракт анализируют методом спектрофотометрии при длине волны 272 нм [7].

Определение содержания продуктов переработки какао-бобов в кондитерских изделиях можно проводить с использованием результатов исследования качественного и количественного содержания веществ, обоснованных в качестве маркеров. Наличие алкалоидов группы метилксантинов, таких как кофеин, теобромин и теофиллин, характерно для продуктов переработки какао-бобов.

Вопросами содержания алкалоидов в пищевых продуктах занимаются многие исследователи. Например, изучением кофе занимались авторы работы [8], исследования кофеина и анализ рисков потребления кофеинсодержащих пищевых продуктов описаны в работе автора [9]. Уровень содержания кофеина в молочном шоколаде с цельным фундуком составил 103 мг/кг, в молочном шоколаде — 153 мг/кг, в горьком шоколаде 80 % какао — 652–665 мг/кг.

Проведена оценка содержания какао тертого в диапазоне 46–65 % по содержанию теобромина. Показано, что количество сухих обезжиренных веществ какао на основе содержания теобромина можно рассчитать, как 38,0 ×% теобромина (по массе). Изучено содержание полифенолов в нежировой части какао, оцениваемое по теобромину. Их уровень исследован в шоколаде с содержанием какао-продуктов от 20 до 100 %. Полученные результаты позволили предположить, что определение сухого обезжиренного остатка какао только по содержанию теобромина будет более точно характеризовать количество какао-продуктов [10].

Оценка флаванольного состава 41 образца коммерческого шоколада проводилась методом ВЭЖХ-DAD. Содержание теобромина использовалось в качестве косвенного показателя для обезжиренных сухих веществ какао, однако оно не является полноценным маркером содержания эпикатехина или флаванола [11].

Таким образом, для подтверждения количества использованного шоколадного сырья в шоколадных изделиях можно исследовать содержание теобромина как идентификационного соединения в шоколаде [4–7,10,11].

Существуют другие методы экстракции и определения кофеина и теобромина из растительного сырья [12,13]. Например, для чая, кофе, какао и БАДов разработаны методики М 04-61-2009 (ФР.1.31.2010.07017)[2] и М 04-60-2009 (ФР.1.31.2010.07016)[3].

Однако предложенные методы не позволяют определить содержание какао-продуктов в кондитерских изделиях, не относящихся к группе шоколада. Теобромин является обязательным компонентом какао-продуктов, но не содержится в других видах сырья, используемых при изготовлении кондитерских изделий. Поэтому содержание теобромина может быть использовано как индикатор содержания какао-продуктов.

Цель работы: разработка методики определения массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в кондитерских изделиях, в сырье и полуфабрикатах для их производства по содержанию алкалоидов.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись образцы сырья, полуфабрикатов шоколадного производства, такие как какао-бобы, какао-порошок, какао тертое, масло какао, какао велла, шоколадная глазурь, а также различные наименования шоколада и кондитерские плитки, которые были отобраны случайным образом. Какао-бобы, какао-порошок, какао тертое, масло какао, какао велла, шоколадная глазурь получены из торговой сети. Теобромин и кофеин из кондитерских изделий, полуфабрикатов и сырья определяют после кислотного гидролиза образцов. Исследования содержания кофеина и теобромина проведены с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель 105 М» (Россия) с фотометрическим детектором, при длине волны 270 нм по методике определения массовой доли теобромина и кофеина в кондитерских изделиях (МВИ 46-00334675-2015)[4]. Для приготовления контрольного образца теобромина использован теобромин фирмы SIGMA (⩾ 99,0 %).

Содержание алкалоида в образце (C, мг/100 г) рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{A \times C_c \times V}{A_c \times 10 \times m}, \quad (1)$$

где C_c — концентрация теобромина в контрольном образце, мг/л;
A — поглощение образца, %;
A_c — поглощение контрольного образца, %;
V — объем гидролизата/дистиллированной воды для растворения экстракта, мл;
m — масса навески, г.

При определении содержания теобромина проводят два измерения в условиях повторяемости ГОСТ ИСО 5725-1-2002[5]. Результат определения массовой доли алкалоидов представляли в виде формулы:

$$(C_{cp} \pm \Delta)\ \%\ \text{при}\ P = 0{,}95, \quad (2)$$

где Δ — абсолютная погрешность определений. Ее рассчитывали по формуле:

$$\Delta = \delta \cdot 0{,}01 \cdot C_{cp}, \quad (3)$$

где δ — граница относительной погрешности, равная 5,1 %.

Определение массовой доли жира в какао-бобах, какао тертом, какао-порошке проводили по ГОСТ 31902-2012[6], результат представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения ($Y_{cp} \pm \Delta$) при доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

Результаты экспериментов определения массовой доли сухого обезжиренного остатка какао представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M_{cp} \pm \Delta$) при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ ($M_{cp} \pm \Delta$)%. Математическое ожидание рассчитывали по формуле [14]:

$$M(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i p_i, \quad (4)$$

где x_i — результат при i-том эксперименте;
p_i — вероятность получения результата x;
n — количество экспериментов.

Метрологические характеристики методики: предел повторяемости, предел воспроизводимости, показатель точности (границы относительной погрешности) рассчитаны по формулам в соответствии с РМГ 61–2010[7].

Оценка установления правильности методики проведена с учетом применения однофакторных планов эксперимента [14] и в соответствии с РМГ 61–2010[7].

[2] Методика М 04-61-2009 (ФР.1.31.2010.07017). Определение кофеина и теобромина в чае и чайной продукции, кофе и кофепродуктах, какао-бобах и какао-продуктах, БАД: Группа компаний «Люмэкс»: дата введения 2009. — Москва: 2009. — 2 с.

[3] Методика М 04-60-2009 (ФР.1.31.2010.07016). Определение кофеина и теобромина в чае, кофе, какао и БАДах: Группа компаний «Люмэкс»: дата введения 2009. — Москва: 2009.

[4] Методика МВИ 46-00334675-2015. Определение массовой доли теобромина и кофеина в кондитерских изделиях: ФГБНУ ВНИИКП: дата введения 2015. — Москва: 2015. — 6 с.

[5] ГОСТ ИСО 5725-1-2024 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения». М.: Стандартинформ, 2002. — 21 с.

[6] ГОСТ 31902-2012 «Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли жира». М.: Стандартинформ, 2014. — 21 с.

[7] РМГ 61-2010. Государственная система обеспечения единства измерений показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки М.: Стандартинформ, 2013. — 62 с.

3. Результаты и обсуждение

Для установления зависимости содержания алкалоидов и сухого обезжиренного остатка какао в различных наименованиях кондитерских изделий проведены исследования какао-бобов, какао тертого и какао-порошка с известным количеством сухого обезжиренного остатка какао.

Установлено, что содержание кофеина и теобромина в сырье и полуфабрикатах шоколадного производства находится в широких диапазонах. Проведен пересчет содержания теобромина в какао-бобах на сухой обезжиренный остаток какао (СООК), содержащийся в образцах (Таблица 1).

Таблица 1. **Содержание кофеина и теобромина в какао-бобах**
Table 1. **Caffeine and theobromine content in cocoa beans**

Какао бобы	Массовая доля жира, %, ($Y_{ср} \pm \Delta$)	Содержание алкалоидов, мг/100 г ($C_{ср} \pm \Delta$)		Содержание теобромина в пересчете на СООК, мг/100 г, ($M_{ср} \pm \Delta$)
		кофеин	теобромин	
№ 1	51,5±0,8	65,2±3,3	706±36,0	1455,7±74,2
№ 2	49,8±0,8	138±7,0	847±43,2	1687,3±86,0
№ 3	50,2±0,8	204±10,4	775±39,5	1556,2±79,4
№ 4	50,3±0,8	121±6,2	894±45,5	1798,8±91,7
№ 5	51,2±0,8	172±8,8	811±41,3	1661,9±84,8
№ 6	53,2±0,8	59,7±3,0	646±32,9	1380,3±70,4
№ 7	51,4±0,8	36,3±1,8	832±42,4	1711,9±87,3
№ 8	51,8±0,8	92,2±4,7	794±40,4	1647,3±84,0
№ 9	51,6±0,8	75,1±3,8	822±41,9	1698,3±86,6
№ 10	51,5±0,8	112±5,7	844±43,0	1740,2±88,8
№ 11	51,8±0,8	98,0±5,0	779±39,7	1616,2±82,4
№ 12	52,0±0,8	120±6,1	823±41,9	1714,6±87,4
№ 13	51,7±0,8	107±5,5	787±40,1	1629,4±83,1
№ 14	51,5±0,8	90,0±4,6	815±41,5	1680,4±85,7

Таким образом, получены новые данные о содержании кофеина и теобромина в какао-бобах, а также содержание теобромина в пересчете на сухой обезжиренный остаток какао. В статье [10] авторы не нашли корреляцию между количествами полифенолов и теобромина. Анализ массива данных, приведённых в работе [10] и в базе данных USDA (Министерства сельского хозяйства США) по пищевой ценности пищевых продуктов (пункты 19902–19904) [15], указывает на корреляцию количества теобромина и сухого обезжиренного остатка какао.

Нами установлено, что содержание теобромина в пересчете на сухой обезжиренный остаток какао находится в относительно узком диапазоне от 1380 до 1798 мг/100 г, поэтому можно предположить, что полученные результаты позволяют оценивать содержание сухого обезжиренного остатка какао в продуктах по уровню теобромина.

Проведены исследования содержания алкалоидов и сделан пересчет содержания теобромина в других основных сырьевых ингредиентах, которые используются при производстве кондитерских изделий, в том числе в какао-порошке и в какао тертом на СООК (Таблицы 2, 3).

Таблица 2. **Содержание кофеина и теобромина в какао-порошке**
Table 2. **Caffeine and theobromine content in cocoa powder**

Какао порошок	Массовая доля жира, %, ($Y_{ср} \pm \Delta$)	Содержание алкалоидов, мг/100 г ($C_{ср} \pm \Delta$)		Содержание теобромина в пересчете на СООК, мг/100 г, ($M_{ср} \pm \Delta$)
		кофеин	теобромин	
№ 1	12,1±0,8	51,0±2,6	1325±67,5	1507,4±76,9
№ 2	10,9±0,8	62,9±3,2	1401±71,4	1572,4±80,2
№ 3	10,5±0,8	27,8±1,4	1273±64,9	1422,3±72,5
№ 4	13,4±0,8	22,2±1,1	1369±69,8	1580,8±80,6
№ 5	13,2±0,8	24,2±1,2	1299±66,2	1496,5±76,3
№ 6	10,2±0,8	33,1±1,7	1493±76,1	1662,6±84,8
№ 7	15,5±0,8	17,0±0,9	1306±66,6	1545,6±78,8
№ 8	14,3±0,8	28,9±1,5	1078±54,9	1257,9±64,2
№ 9	11,5±0,8	46,5±2,4	1504±76,7	1699,4±86,7
№ 10	12,2±0,8	128±6,5	1535±78,2	1748,3±89,2
№ 11	11,3±0,8	23,7±1,2	1120±57,1	1262,7±64,4
№ 12	14,1±0,8	25,6±1,3	1301±66,3	1514,6±77,2
№ 13	10,3±0,8	24,5±1,2	1046±53,3	1166,1±59,5
№ 14	12,8±0,8	28,2±1,4	1217±62,0	1395,6±71,2

Содержание теобромина в 11 образцах какао-порошка (без учета образцов № 8, 11, 13) в пересчете на сухой обезжиренный остаток какао также находится в относительно узком диапазоне от 1395 до 1748 мг/100 г, что также можно использовать для разработки методики определения массовой доли какао-продуктов в кондитерских изделиях по содержанию теобромина. Содержание кофеина варьируется от 23,7 до 128,5 мг/100 г, что делает его ненадежным показателем для разработки методики определения какао-продуктов.

Проведен пересчет содержания теобромина в какао тертом на СООК (Таблица 3).

Таблица 3. **Содержание кофеина и теобромина в какао тертом**
Table 3. **Caffeine and theobromine content in cocoa mass**

Какао тертое	Массовая доля жира, %, ($Y_{ср} \pm \Delta$)	Содержание алкалоидов, мг/100 г, ($C_{ср} \pm \Delta$)		Содержание теобромина в пересчете на СООК, мг/100 г, ($M_{ср} \pm \Delta$)
		кофеин	теобромин	
№ 1	51,7±0,8	26,3±1,3	633±32,2	1310,6±66,8
№ 2	50,5±0,8	52,1±2,7	760±38,7	1535,4±78,3
№ 3	51,4±0,8	62,9±3,2	765±39,0	1574,1±80,3
№ 4	50,4±0,8	59,0±3,0	704±35,9	1419,4±72,4
№ 5	51±0,8	58,5±3,0	725±36,9	1479,6±75,5
№ 6	50,7±0,8	58,1±3,0	644±32,8	1306,3±66,6
№ 7	52,1±0,8	68,3±3,5	707±36,0	1476,0±75,3
№ 8	52,3±0,8	43,7±2,2	738±37,6	1547,2±78,9
№ 9	51,8±0,8	34,8±1,8	892±45,4	1850,6±94,4
№ 10	51,2±0,8	38,7±2,0	945±48,1	1936,5±98,8
№ 11	51,3±0,8	47,9±2,4	696±35,4	1429,2±72,9
№ 12	52±0,8	28,6±1,5	753±38,4	1568,8±80,0
№ 13	51,4±0,8	54,3±2,8	877±44,7	1804,5±92,0
№ 14	50,3±0,8	29,8±1,5	741±37,7	1490,9±76,0

Содержание теобромина в 14 образцах какао тертого в пересчете на сухой обезжиренный остаток какао находится в диапазоне от 1306 до 1936 мг/100 г, из которых 9 образцов содержат сухой обезжиренный остаток какао в узком диапазоне от 1419 до 1574 мг/100 г. Содержание кофеина варьируется в диапазоне от 26,3 до 68,3 мг/100 г, при этом минимальные и максимальные значения различаются более чем в 2 раза.

Полученные различные диапазоны содержания теобромина обусловлены различным содержанием жира в жировой фазе исследованных продуктов.

Результаты определения содержания алкалоидов в какао-продуктах (какао-бобы, какао-порошок и какао тертое) соответствуют ранее полученным данным, представленным в работах [5,16–19]. Они подтверждают гипотезу о возможности использования данных по содержанию теобромина для разработки методики определения какао-продуктов в кондитерских изделиях по содержанию алкалоидов.

Полученные данные также согласуются с результатами работы [20], в которой предложен расчет количества сухих обезжиренных веществ какао на основе содержания теобромина. Однако у авторов этой работы нет четкого обоснования коэффициента пересчета.

Массив полученных данных по содержанию теобромина позволяет провести математическую обработку для установления коэффициента пересчета содержания теобромина на сухой обезжиренный остаток какао и расчета метрологических характеристик. Проведена математическая обработка полученных данных содержания теобромина в какао-бобах, какао тертом, какао-порошке по методу Гаусса (Рисунок 1).

Полученные результаты имеют нормальное распределение по Гауссу с непрерывным распределением вероятностей с пиком в центре, при котором основная доля образцов по содержанию теобромина (в пересчете на СООК) сосредоточена в диапазоне 1300–1700 мг/100 г. Распределение характеризуется математическим ожиданием 1560,5 мг/100 г, медианой 1562,5 мг/100 г и средним квадратичным отклонением 169,6 мг/100 г теобромина в пересчете на СООК.

Содержание кофеина в какао-масле находится в диапазоне от 10,2 мг/100 г до 24,3 мг/100 г. Содержание теобромина в какао-масле незначительное и находится в диапазоне от 0 до 8,0 мг/100 г (Таблица 4).

Рисунок 1. **Распределение количества образцов какао-продуктов по диапазонам массовой доли теобромина в пересчете на СООК**

Figure 1. **Distribution of the number of samples of cocoa products by range of mass fraction of theobromine in terms of dry fat-free solids of cocoa**

Таблица 4. **Содержание кофеина и теобромина в какао-масле**

Table 4. **Caffeine and theobromine content in cocoa butter**

Какао масло	Содержание алкалоидов, мг/100 г	
	кофеин	теобромин
№ 1	13,1 ± 0,7	0
№ 2	13,2 ± 0,7	0
№ 3	24,3 ± 1,2	5,2 ± 0,3
№ 4	10,2 ± 0,5	8,0 ± 0,4
№ 5	11,1 ± 0,6	4,2 ± 0,2
№ 6	12,2 ± 0,6	2,5 ± 0,1
№ 7	15,0 ± 0,8	0
№ 8	12,1 ± 0,6	4,7 ± 0,2
№ 9	14,4 ± 0,7	6,3 ± 0,3
№ 10	12,1 ± 0,6	0
№ 11	12,7 ± 0,6	5,5 ± 0,3
№ 12	14,5 ± 0,7	4,7 ± 0,2

Сухой обезжиренный остаток какао в жировой фракции какао-бобов (какао тертого), какао-порошка, представляющей собой чистое какао-масло, отсутствует.

Содержание кофеина в какао-бобах, какао-порошке, какао тертом находится в широких диапазонах, в то время как диапазоны содержания теобромина значительно меньше. Поэтому содержание теобромина может быть использовано как индикатор содержания какао-продуктов для количественной характеристики нежировых компонентов какао.

На основании полученных экспериментальных данных рассчитано содержание теобромина в пересчете на СООК, равное 1560 мг/100 г, и предложена формула для расчета массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в различных наименованиях сахаристых кондитерских изделий (М). При их изготовлении использованы продукты переработки какао-бобов, они позиционируются как изделия с какао-продуктами:

$$M = \frac{C \times 100}{C_{СООК}}, \quad (5)$$

где C — содержание теобромина в исследованном образце, мг/100 г;

$C_{СООК}$ — содержание теобромина в сухом обезжиренном остатке какао, мг/ 100 г;

100 — коэффициент пересчета на 100 г образца.

На основе результатов исследований разработана методика определения массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в сахаристых кондитерских изделиях. По содержанию теобромина предложено оценивать массовую долю сухого обезжиренного остатка какао. Разработанная методика позволяет проводить измерения массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в диапазоне от 0,01 % до 70 %, при этом были определены метрологические показатели методики, показатель точности (границы относительной погрешности) составил 4,9 %.

Получены экспериментальные значения содержания кофеина и теобромина в различных видах шоколада (Таблица 5).

Таблица 5. **Содержание кофеина и теобромина в различных наименованиях шоколада**

Table 5. **Caffeine and theobromine content in various types of chocolate**

№	Шоколад	Содержание алкалоидов, мг/100 г		Содержание СООК, %
		кофеин	теобромин	
1	темный № 1	9,0 ± 0,5	461 ± 23,5	29,5 ± 1,4
2	темный № 2	26,0 ± 1,3	336 ± 17,1	21,5 ± 1,1
3	темный № 3	11,0 ± 0,6	394 ± 20,1	25,2 ± 1,2
4	темный № 4	248 ± 12,6	239 ± 12,2	15,3 ± 0,7
5	темный с цельным миндалем	125 ± 6,4	275 ± 14,0	17,6 ± 0,9
6	темный с фруктово-ягодной начинкой	508 ± 25,9	243 ± 12,4	15,6 ± 0,8
7	темный с фундуком	274 ± 14,0	428 ± 21,8	27,4 ± 1,3
8	молочный с фундуком и печеньем	300 ± 15,3	137 ± 7,0	8,8 ± 0,4
9	молочный 32 % какао	473 ± 24,1	127 ± 6,5	8,1 ± 0,4
10	молочный с фундуком	89,0 ± 4,5	141 ± 7,2	9,0 ± 0,4
11	молочный с цельным фундуком	46,0 ± 2,3	89,0 ± 4,5	5,7 ± 0,3
12	молочный с дробленым фундуком	357 ± 18,2	157 ± 8,0	10,1 ± 0,5
13	белый пористый	2,0 ± 0,1	140 ± 7,1	2,0 ± 0,4

Темный шоколад характеризуется относительно высоким содержанием сухого обезжиренного остатка какао и содержанием теобромина от 239 мг/100 г до 461 мг/100 г. В молочном шоколаде содержится существенно меньшее количество теобромина — от 89,0 мг/100 г до 157 мг/100 г.

Содержание кофеина в плитке кондитерской составило (16,0–98,0) мг/100 г, а теобромина — (12,0–130) мг/100 г (Таблица 6).

Таблица 6. **Содержание кофеина и теобромина в плитке кондитерской**

Table 6. **Caffeine and theobromine content in confectionery bars**

Плитка	Содержание алкалоидов, мг/100 г		Содержание СООК, %
	кофеин	теобромин	
кондитерская без добавлений	98,0 ± 5,0	130 ± 6,6	8,3 ± 0,4
кондитерская с крупными добавлениями	16,0 ± 0,8	77,0 ± 3,9	4,9 ± 0,2
кондитерская молочная пористая	35,0 ± 1,8	12,0 ± 0,6	3,2 ± 0,2

Низкое содержание теобромина в плитке кондитерской обуславливает низкую массовую долю сухого обезжиренного остатка какао.

Стандартизованные методы, позволяющие определить содержание сухого обезжиренного остатка какао, в настоящее время отсутствуют. По разработанной методике определили содержание теобромина и сухого обезжиренного остатка какао в начинках для вафель, в которых по маркировке были заявлены продукты переработки какао-бобов.

Таблица 7. **Содержание теобромина и сухого обезжиренного остатка какао в различных наименованиях начинок для вафель**

Table 7. **Content of theobromine and dry fat-free solids of cocoa in various types of waffle fillings**

№	Начинки для вафель	Содержание теобромина, мг/100 г	Содержание СООК, %
1	с ароматом шоколада № 1	1,5 ± 0,1	0,1 ± 0,005
2	№ 2	6,4 ± 0,3	0,4 ± 0,02
3	со вкусом шоколада № 3	29,1 ± 1,5	1,9 ± 0,1
4	№ 4	45,1 ± 2,3	2,9 ± 0,1
5	№ 5	78,2 ± 4,0	5 ± 0,2
6	с шоколадной начинкой № 6	91,5 ± 4,7	5,9 ± 0,3
7	с жировой прослойкой, вкус шоколада № 7	162,2 ± 8,3	10,4 ± 0,5
8	№ 8	203,5 ± 10,4	13 ± 0,6
9	№ 9	272,5 ± 13,9	17,4 ± 0,9
10	с шоколадной начинкой № 10	298 ± 15,2	19,1 ± 0,9

Содержание теобромина в пересчете на СООК в начинках находилось в широком диапазоне от 0,1 мг/100 г до 19,1 мг/100 г. При этом выявлено, что некоторые образцы отличаются высоким содержанием теобромина в пересчете на СООК.

Исследованы 26 образцов кондитерских изделий, в том числе шоколад, кондитерские плитки, начинки для вафель, которые были включены в результаты данной работы и являются представителями значительного ассортимента сахаристых кондитерских изделий. Также были проведены исследования мучных кондитерских изделий, таких как «шоколадные» пряники, печенье, результаты которых не были использованы в данной работе.

Использованный подход позволяет определять массовую долю сухого обезжиренного остатка какао в полуфабрикатах и многокомпонентных кондитерских изделиях, для изготовления которых использованы какао-продукты и для которых не разработаны методики определения содержания какао-продуктов. Полученные результаты могут быть распространены и на другие группы сахаристых кондитерских изделий, для изготовления которых использованы продукты переработки какао.

4. Выводы

Теобромин является обязательным компонентом какао-продуктов, но не содержится в других видах сырья, используемых при изготовлении сахаристых кондитерских изделий, поэтому содержание теобромина может быть использовано как индикатор содержания какао-продуктов.

Установлена корреляция между содержанием теобромина и массовой долей сухого обезжиренного остатка какао. Содержание теобромина может быть использовано как индикатор содержания какао-продуктов. Получена формула расчета массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в сахаристых кондитерских изделиях.

Проведены исследования содержания теобромина и кофеина в шоколаде и сырье для его производства. На основе экспериментальных данных рассчитано содержание теобромина в пересчете на СООК, равное 1560 мг/100 г, и предложена формула для определения массовой доли СООК в различных сахаристых кондитерских изделиях.

Разработана методика определения массовой доли сухого обезжиренного остатка какао в кондитерских изделиях, позволяющая анализировать его содержание в шоколаде, кондитерских плитках, начинках и других сахаристых кондитерских изделиях, изготовленных с использованием какао-продуктов.

Предложенный подход может быть использован в качестве эффективного экспрессного способа исследований состава многокомпонентных сахаристых кондитерских изделий, проводимых при оценке их качества, для определения количества сухого обезжиренного остатка какао — важнейшего идентификационного критерия содержания продуктов переработки какао-бобов.

Дальнейшие исследования направлены на оценку качества мучных кондитерских изделий, изготовленных с использованием какао-продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Minifie, B. W. (1989). Chocolate, cocoa and confectionery: Science and technology. Springer Dordrecht, 1989. https://doi.org/10.1007/978-94-011-7924-9
2. Ageikina, I. I., Lazareva, E. G., Mikhailova, I. Yu., Semipyatny, V. K. (2020). Results designing and analysis when introducing new beverage identification criteria. *Food Systems*, 3(3), 4–7. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-3-3-4-7
3. Панасюк, А. Л., Кузьмина, Е. И., Свиридов, Д. А., Ганин, М. Ю. (2023). Индивидуальный комплексный подход к идентификации меда с использованием инструментальных методов анализа и статистической обработки результатов. *Пищевые системы*, 6(2), 211–223. [Panasyuk, A. L., Kuzmina, E. I., Sviridov, D. A., Ganin, M. Yu. (2023). Individual integrated approach to honey identification using instrumental methods of analysis and statistical processing of results. *Food Systems*, 6(2), 211–223. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-211-223
4. Bobková, A., Árvay, J., Šnirc, M., Belej, Ľ., Bobko, M., Brenkusová, H. et al. (2017). Evaluation of individual chemical components in different types of chocolate. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 50(2), 157–161.
5. Tanaka, T., Kimura, K., Kan, K., Shindo, T., Sasamoto, T. (2021). Determination of caffeine, theobromine, and theophylline in chocolate using LC–MS. *Food Hygiene and Safety Science*, 62(4), 119–124. https://doi.org/10.3358/shokueishi.62.119 (In Japanese)
6. Кондратьев, Н. Б., Белова, И.А., Мамонова, Ю. А., Парашина, Ф. И., Савенкова, Т. В., Аксенова, Л. М. (2015). Идентификация шоколада по содержанию кофеина и теобромина. *Кондитерское производство*, 6, 30–31 [Kondratyev, N. B., Belova, I. A., Mamonova, Yu. A., Parashina, F. I., Savenkova, T. V., Aksenova, L. M. (2015). Chocolate identification of the caffeine and theobromine. *Confectionery Production*, 6, 30–31. (In Russian)]
7. Коренман, Я. И., Мокшина, Н. Я., Кривошеева, О. А. (2012). Определение теобромина в темном шоколаде. *Аналитика и контроль*, 16(3), 285–288. [Korenman, Ya. I., Mokshina, N. Ya., Krivosheeva, O. A. (2012). Theobromine determination in dark chocolate. *Analytics and Control*, 16(3), 285–288. (In Russian)]
8. Кузьмина, Е. И., Ганин, М. Ю., Свиридов, Д. А., Егорова, О. С., Шилкин, А. А., Акбулатова, Д. Р. (2022). Использование современных инструментальных методов для идентификации кофе. *Пищевые системы*, 5(1), 30–40. [Kuzmina, E. I., Ganin, M. Yu., Sviridov, D. A., Egorova, O. S., Shilkin, A. A., Akbulatova, D. R. (2022). Using modern instrumental methods for coffee identification. *Food Systems*, 5(1), 30–40. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-1-30-40
9. Калинин, А. Я. (2014). Анализ рисков потребления кофеинсодержащих пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*, 7, 20–23. [Kalinin, A. Y. (2014). Risk analysis of caffeine-containing foods consumption. *Food Industry*, 7, 20–23. (In Russian)]
10. Cooper, K. A., Campos-Giménez, E., Jiménez Alvarez, D., Rytz, A., Nagy, K., Williamson, G. (2007). Predictive relationship between polyphenol and nonfat cocoa solids content of chocolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(1), 260–265. https://doi.org/10.1021/jf072153c
11. Alañón, M. E., Castle, S. M., Siswanto, P. J., Cifuentes-Gómez, T., Spencer, J. P. E. (2016). Assessment of flavanol stereoisomers and caffeine and theobromine content in commercial chocolates. *Food Chemistry,* 208(1), 177–184. http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.116
12. Марченко, Л. А., Мокшина, Н. Я., Пахомова, О. А., Соколова, А. В., Ниживенко, В. Н. (2021). Оптимизация экстракции кофеина и теобромина из различных сортов чая блок-сополимером плюроник. *Известия вузов. Пищевая технология,* 5–6(383–384), 32–36. [Marchenko, L. A., Mokshina, N. Ya., Pakhomova, O. A., Sokolova, A. V., Nizhivenko, V. N. (2021). Optimization extraction of coffeine and theobromine from various varieties of tea with pluronic block copolymer. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6(383–384), 32–36. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.6
13. Pavlovic, N., Jakovljevic, M., Miskulin, M., Molnar, M., Ackar, D., Jokic, S. (2019). Green extraction techniques of bioactive components from cocoa shell. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 11(1), 11–20. http://doi.org/10.17508/CJFST.2019.11.1.02
14. Грачев, Ю. П., Плаксин, Ю. М. (2005). Математические методы планирования экспериментов. М.: ДеЛи принт, 2005. [Grachev, Yu. P., Plaksin, Yu. M. (2005). Mathematical methods of experimental design. Moscow: DeLi print, 2005. (In Russian)]
15. USDA Database. Retrieved from https://www.usda.gov/ Accessed 07.05.2024.
16. Alifiya, F., Guntarti, A. (2022). Theobromine content in chocolate products: A review. *Journal of Halal Science and Research*, 2(1), 24–32. https://doi: 10.12928/jhsr.v2i1.4434https://doi.org/10.12928/jhsr.v2i1.4434
17. Eren, F. H., Kabaran, S. (2023). Evaluation of theobromine content and the relationship between cocoa percentages in dark chocolates. *Functional Foods in Health and Disease*, 13(10), 520–532. http://doi.org/10.31989/ffhd.v13i10.1141
18. Hasegawa, T., Takahashi, K., Saijo, M., Ishii, T., Nagata, T. (2009). Rapid determination of theophylline, theobromine and caffeine in dietary supplements containing guarana by ultra-performance liquid chromatography. *Journal of the Food Hygienic Society of Japan*, 50(6), 304–310. http://doi.org/10.3358/shokueishi.50.304 (In Japanese)
19. Brunetto, M. de R., Gutiérrez, L., Delgado, Y., Gallignani, M., Zambrano, A., A´lvaro Gomez, A. et al. (2007). Determination of theobromine, theophylline and caffeine in cocoa samples by a high-performance liquid chromatographic method with on-line sample cleanup in a switching-column system. *Food Chemistry,* 100(2), 459–467. http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.007
20. Сабирова, И. Б., Сивкова, Г. А. (2015). Химический анализ шоколада. *Символ науки: международный научный журнал*, 3, 3–4. [Sabirova, I. B., Sivkova, G. A. (2015). Chemical analysis of chocolate. *Symbol of Science: International Scientific Journal* 3, 3–4. (In Russian)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Кондратьев Николай Борисович — доктор технических наук, главный научный сотрудник, отдел современных методов оценки качества кондитерских изделий, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20 Тел.: + 7–495–963–54–75 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-332-9621	**Nikolay B. Kondratev**, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Department of Modern Methods of Quality Assessment of Confectionery Products, All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry 20, Electrozavodskaya Str., 107023, Moscow, Russia Tel.: + 7–495–963–54–75 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-332-9621
Руденко Оксана Сергеевна — кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20 Тел.: +7–495–962–17–40 E-mail: oxana0910@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2436-4100 * автор для контактов	**Oxana S. Rudenko**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Scientific Work, All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry 20, Electrozavodskaya Str., 107023, Moscow, Russia Tel.: +7–495–962–17–40 E-mail: oxana0910@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2436-4100 * corresponding author
Осипов Максим Владимирович — заведующий отделом, отдел современных методов оценки качества кондитерских изделий, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20 Тел.: + 7–495–963–54–75 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1316-259X	**Maxim V. Osipov**, Head of Department, Department of Modern Methods of Quality Assessment of Confectionery Products, All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry 20, Electrozavodskaya Str., Moscow, 107023, Russia Tel.: + 7–495–963–54–75 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1316-259X
Белова Ирина Александровна — инженер-исследователь, отдел современных методов оценки качества кондитерских изделий, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20 Тел.: +7–916–849–23–42 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8025-952X	**Irina A. Belova**, Research Engineer, Department of Modern Methods of Quality Assessment of Confectionery Products, All-Russian Research Institute of the Confectionery Industry 20, Electrozavodskaya Str., 107023, Moscow, Russia Тел.: +7–916–849–23–42 E-mail: conditerprom_lab@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8025-952X
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-173-179

Received 18.12.2024
Accepted in revised 21.04.2025
Accepted for publication 25.04.2025
© Badran E. F., Abedelmaksoud T. G., Elshazly, E.A., Ahmed S. S., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

IMPACT OF RED FLOUR BEETLE *TRIBOLIUM CASTANEUM* (HERBST) (COLEOPTERA: TENEBRIONIDAE) INFESTATION ON SOME QUALITY CHARACTERISTICS OF STORED WHEAT FLOUR

Ebtesam Farah Badran[1], Tarek Gamal Abedelmaksoud[2]*, Eizz Elden A. Elshazly[1], Sayeda Sayed Ahmed[1]

[1] Economic Entomology and Pesticides Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt
[2] Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

KEY WORDS:
flour beetles, infestation, loss, storage periods, flour

ABSTRACT

This study examines the impact of *Tribolium castaneum* infestation on the quality of stored wheat flour by assessing insect population growth, weight loss, moisture content, colour parameters, and chemical composition along various infestation levels (0, 10, 20, and 40 pairs/kg) and storage durations (4, 6, and 8 months). Results indicate that *T. castaneum* populations and weight loss in flour increased significantly with higher infestation levels and prolonged storage. After 8 months, the highest infestation (40 pairs/kg) resulted in a maximum insect population of 638.5 insects/kg and 42.54 % weight loss, underlining the importance of effective pest management. Moisture content also rose up along with infestation level and storage duration, reaching 14.56 % at 40 pairs/kg after 8 months. Colour analysis showed a decline in lightness (L*) and an increase in a* and b* values, indicating quality deterioration. Chemical composition analysis revealed protein, lipid, and ash levels increased with infestation, while carbohydrate and fiber content decreased. Statistical analysis demonstrated significant differences in all parameters across infestation levels and storage periods, with notable changes occurring as storage progressed. The findings highlight the progressive quality degradation in flour due to *T. castaneum* infestation, thus emphasizing the need for improved storage practices and monitoring in order to mitigate weight loss, moisture increase, and nutritional deterioration in stored wheat flour products. These insights contribute to understanding pest-induced losses and suggest preventive strategies to preserve flour quality in storage environments.

Поступила 18.12.2024
Поступила после рецензирования 21.04.2025
Принята в печать 25.04.2025
© Бадран Е. Ф., Абедельмаксуд Т. Г., Эльшазли, Е.А., Ахмед С. С., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ВЛИЯНИЕ ЗАРАЖЕНИЯ КРАСНЫМ МУКОМОЛЬНЫМ ЖУКОМ *TRIBOLIUM CASTANEUM* (HERBST) (COLEOPTERA: TENEBRIONIDAE) НА НЕКОТОРЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ НА ХРАНЕНИИ

Бадран Е. Ф.[1], Абедельмаксуд Т. Г.[2,*], Эльшазли, Е.А.[1], Ахмед С. С.[1]

[1] Кафедра экономической энтомологии и пестицидов, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет
[2] Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
мучные жуки, заражение, потери, периоды хранения, мука

АННОТАЦИЯ

В этом исследовании изучается влияние заражения красным мукомольным жуком *Tribolium castaneum* на качество хранящейся пшеничной муки путем оценки роста популяции насекомых, потери веса муки, содержания влаги, параметров цвета и химического состава муки при различных уровнях заражения (0, 10, 20 и 40 пар/кг) и продолжительности ее хранения (4, 6 и 8 месяцев). Результаты показывают, что популяции жука *T. castaneum* и потеря веса муки значительно росли при более высоких уровнях заражения и длительном хранении. Через 8 месяцев самая высокая степень заражения (40 пар/кг) была представлена максимальным ростом популяции насекомых численностью 638,5 насекомых/кг, и потерей веса муки в объеме 42,54 %, что подчеркивает важность эффективной борьбы с вредителями. Содержание влаги также росло наряду с уровнем заражения и продолжительностью хранения, достигнув 14,56 % при 40 парах/кг через 8 месяцев. Цветовой анализ показал снижение светлоты (L*) и увеличение значений a* и b*, что свидетельствует об ухудшении качества. Анализ химического состава показал, что уровни содержания белка, липидов и золы увеличились при заражении, в то время как содержание углеводов и клетчатки снизилось. Статистический анализ продемонстрировал значительные различия во всех параметрах муки в зависимости от уровней заражения и периодов хранения, при этом по мере хранения происходили весьма заметные изменения. Результаты доказывают прогрессирующее ухудшение качества муки, вызванное заражением жуком *T. castaneum*, тем самым подчеркивая необходимость улучшения методов хранения и контроля состояния продукта для снижения потерь веса, предотвращения увеличения влажности и ухудшения питательных свойств хранящихся продуктов из пшеничной муки. Эти данные способствуют пониманию объема потерь, вызванных вредителями, и предлагают превентивные стратегии для сохранения качества муки в условиях складского хранения.

1. Introduction

Wheat is a primary food source for humans, serving as the essential raw material for flour production. Egypt is the largest importer of wheat globally, with imports reaching approximately 12.85 million tons in 2021 year [1]. In developing countries, improper storage of cereal grains, particularly wheat, facilitates infestations by insects. These insects are categorized into primary and secondary types. Primary insects can infest intact wheat grains, while secondary insects target grains that have already been damaged by primary insects, as well as wheat flour and its processed products. Poor threshing, insufficient

FOR CITATION: **Badran E. F., Abedelmaksoud T. G., Elshazly, E. A., Ahmed S. S.** (2025). Impact of red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) infestation on some quality characteristics of stored wheat flour. *Food Systems,* 8(2), 173–179. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-173-179

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Бадран Е. Ф., Абедельмаксуд Т. Г., Эльшазли, Е. А., Ахмед С. С.** (2025). Влияние заражения красным мукомольным жуком *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) на некоторые качественные характеристики пшеничной муки, находящейся на хранении. *Пищевые системы*, 8(2), 173–179. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-173-179

drying, and improper handling can also contribute to infestations [2,3].

Insect infestations are a major threat, leading to both qualitative and quantitative losses in cereals products. These losses arise from both the contamination caused by insects and the actual material they consume [4,5]. On average, insect infestations lead to a 5–35 % weight loss in various stored grain products [6,7]. In some countries, weight losses in cereal grains due to insect pests can reach up to 50 % of the total harvest [8]. These infestations also lead to reductions in the nutritional value and changes in the flavor of wheat flour. In particular, infestations can affect the proteins, carbohydrates, and lipids, thereby altering the characteristics of the raw materials [9]. Furthermore, metabolic changes, such as increased levels of purines, quinones, and uric acid excreted by insects into wheat flour, can negatively impact the organoleptic properties and the suitability of the products for processing and consumption [10–12]. Infestations can also promote fungal growth, including fungi that produce mycotoxins, leading to contamination of commodities with insect bodies and other residues, some of which may be toxic, repulsive, or allergenic [13]. Consequently, infested grains or flour are unsuitable for human consumption [2,14].

Wheat flour is susceptible to attack by various insects, including flour beetles such as the flour mill beetle (*Cryptolestes turcicus*), yellow mealworm (*Tenebrio molitor*), large flour beetle (*Tribolium destructor*), confused flour beetle (*Tribolium confusum*), and red flour beetle (*Tribolium castaneum*). These insects infest wheat flour, cereal products, and foods stored in the mills or warehouses [2,15,16]. Among them, *Tribolium castaneum* (Herbst) is a common secondary pest of wheat, that often infests flour and other processed food products [17]. This beetle has been reported to cause significant damage to foodstuffs such as biscuits, nuts, beans, pasta, cornflakes, and dried fruits [18]. The infestation by adults of *T. castaneum* contaminates the flour, adversely affecting its characteristics, including its viscous and elastic properties, and producing an unpleasant taste and colour. These adult beetles can secrete benzoquinones (BQs) from specialized glands, where the main components is methyl-1,4-benzoquinone (MBQ) and ethyl-1,4-benzoquinone (EBQ) [16].

The storage period is a critical factor influencing the quality of stored products. Extended storage, up to six months, affects parameters such as 1000-grain weight, falling number, and moisture content. Additionally, infestation levels tend to increase along with longer storage periods [19]. Physicochemical characteristics may also change during storage, affecting the usability of wheat flour for the various applications [20].

This research aims to investigate the *T. castaneum* populations and infestation levels and their effects on the quality and quantity of wheat flour by measuring weight loss, moisture content, color changes, and alterations in chemical composition under various storage periods. The findings will contribute to the prevention of commercial fraud in wheat flour.

2. Materials and methods

2.1. Insect cultures

The stock of *T. castaneum* was obtained from infested flour and maintained in the laboratory of stored grain insects at the Department of Entomology, Faculty of Agriculture, Cairo University. Mixed-age cultures of adults were reared on a wheat flour-based diet, which was prepared according to the method described by Carvalho et al. [9]. This diet consisted of 1000 g wheat flour, 100 g dried yeast, and 100 g milk powder. About 50 pairs of adults were placed in glass jars with a 1 kg capacity, each jar containing 500 g of the ration. The jars were covered with muslin cloth secured with rubber bands to prevent escape and incubated under optimal conditions (30 ± 2 °C and 65 ± 5 % relative humidity) for 10 days to allow for egg laying. Eggs were collected daily by sieving through a 40 µm-mesh sieve. Approximately 500 eggs and 500 g of flour diet were then placed in glass jars and incubated under the same conditions until adult emergence. Adults (0–7 days old) were used for the trials in the experiments after three generations of rearing.

2.2. Experimental design

Wheat flour, obtained from a local market in the Giza governorate with an extraction rate of 72 %, was sieved through a 40 µm-mesh sieve to eliminate impurities. The chemical researched components of sample flour were moisture (8.4 %), ash (0.48 %), protein (10.84 %), lipid (0.92 %), fiber (0.87 %) and carbohydrates (68.9 %). The flour was then stored at 4 °C for approximately one week prior to use to prevent insect infestation [21].

To study the effect of flour beetle infestation on the properties of flour, three infestation levels with newly emerged adults of *T. castaneum* were created, and their effect was studied at 4, 6, and 8 months of storage periods. About 48 kg of sterilized wheat flour were divided into one kilogram each and put into a glass jar (15 cm diameter and 25 cm length). These jars were divided into three groups of 16 jars each (one group of jars/storage period). They were artificially infested by 0, 10,20, and 40 pairs of newly emergence adults of *T. castaneum*, which were added into four treatments (4 replicates for each treatment). The jars were sealed with muslin cloth and secured with rubber bands to prevent escape of insects. They were stored in the laboratory under controlled conditions (30 ± 2 °C and 65 ± 5 % relative humidity) for 4, 6, and 8 months, from March, 2022 to the end of October, 2022.

2.3. Weight loss

At the end of each storage period, i. e. in 4, 6 and 8 months, the jars containing the flour were sieved thoroughly wire 40 µm-mesh to separate and count the insect populations' progeny. Moisture content of each sample was measured by moisture meter tester Wile 55 (Farmcomp Oy, Finland) then the dry weight of infested and healthy ones and weight losses were calculated according to the following equations [22]:

$$\text{The Dry weight (\%)} = \frac{\text{The sample weight}\left(100 - \text{moisture content}\right)}{100}, \quad (1)$$

$$\text{Weight loss \%} = \frac{\text{Dry weight of non infested flour} - \text{Dry weight of infested flour}}{\text{Dry weight of non infested flour}}. \quad (2)$$

2.4. Colour change

The colour of flour infested with *T. castaneum* at various infestation levels was assessed by measuring the CIE colour parameters (L*, a*, b*) over storage periods of 4, 6, and 8 months. These measurements were taken using a Minolta CR400 colorimeter (Konica Minolta, Japan). Flour samples (50 g/ replicate) were placed in a sample-holding cup, covered with a lid, and analyzed for color changes [23,24]. The L value represents lightness, ranging from 0 (black) to +100 (white); the value indicates redness or greenness, with a range from −100 (greenness) to +100 (redness); and the b value denotes yellowness or blueness, spanning from −100 (blueness) to +100 (yellowness) [25–27].

2.5. Chemical composition

To assess the impact of *T. castaneum* infestation over various storage periods, approximately 100 g of sieved wheat flour from each replicate were collected at the end of each storage interval. Prior to analysis the dry matter content was determined using the weight-dryer method. Subsequent analyses were performed on the air-dry mass, including measurements of moisture, crude protein, crude fat, crude ash, and crude fiber, following the methods outlined by AOAC [28]. Dry matter was determined by drying samples at 105 °C until a constant weight was achieved (method 945.15). Crude fat (ether extract, EE) was quantified using the Soxhlet extraction method with diethyl ether as the solvent (method 2003.06). Crude ash (CA) was measured by sample incineration in a muffle furnace at 550 °C for 8 hours (method 920.153). Crude protein (CP) was calculated as N × 6.25 using the Kjeldahl method, with distillation performed on a Büchi B-324 distillation unit (BüchiLabortechnik AG, Switzerland) (method 945.18). Crude fiber (CF) was determined as the residue after sequential treatment with 1.25 % H_2SO_4 and 1.25 % NaOH, utilizing an ANKOM220 FiberAnalyzer (ANKOM Technology, New York, NY, USA). Total carbohydrates were then calculated based on these measurements.

$$\text{Nitrogen free extract (NFE) (\%)} = 100 - \text{\% (moisture + crude protein + crude fat + crude ash + crude fiber).} \quad (3)$$

2.6. Statistical analysis

Completely Randomized Design (CRD) was applied in this experiment. All data obtained for experiments were calculated and expressed as mean ± standard error and statistically analyzed by factorial analysis of variance (ANOVA) using (SPSS) software (Version 16, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) as described by Snedecor and Cochran [29]. Differences among mean values were separated according to Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test using one-way analysis to detect the significance among the different infestation levels and storage periods at $P < 0.05$ level.

3. Results

3.1. Insect population and product weight loss

The data in the Tables 1 and 2 demonstrate the progressive increase in *T. castaneum* population and associated weight loss in wheat flour across different infestation levels (0, 10, 20, and 40 pairs/kg) and storage periods

(4, 6, and 8 months). The results indicate that insect population and weight loss in flour both increased significantly with higher infestation levels and extended storage periods. Specifically, after 4 months, the insect populations quantity were recorded as 292.25 ± 6.2, 310.50 ± 7.33, and 318.15 ± 9.04 insects/kg at infestation levels of 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively, with a marked increase to 638.50 ± 24.32 insects/kg after 8 months at the highest infestation level (40 pairs/kg). Weight loss followed a similar trend; for instance, after 4 months, weight losses were 0.49 %, 14.42 %, 15.70 %, and 18.19 % at infestation levels of 0, 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively. This increased to 1.75 %, 34.60 %, 34.85 %, and 42.54 % after 8 months at the same infestation levels, thus highlighting a substantial deterioration in flour quality over time along with higher infestation rates.

Table 1. **Mean number of *T. castaneum* adults at different storage periods (month) and infestation levels (pairs/kg)**

Таблица 1. **Среднее количество взрослых особей *T. castaneum* при различных сроках хранения (по месяцам) и различных уровнях заражения (пар/кг)**

Storage periods (month)	Infestation levels (pairs/kg)			
	0	10	20	40
4	0.00 ± 0.00^{aD}	292.25 ± 06.2^{cC}	310.50 ± 07.33^{cB}	318.15 ± 09.04^{cA}
6	0.00 ± 0.00^{aC}	353.25 ± 21.49^{bB}	383.00 ± 11.60^{bAB}	397.50 ± 21.9^{bA}
8	0.00 ± 0.00^{aD}	461.75 ± 29.7^{aC}	501.75 ± 22.40^{aB}	638.50 ± 24.32^{aA}

Means followed by the different letters are significantly different from each other at *P<0.05* (Tukey HSD test); Capital letters represent differences between infestation levels and small letters represent differences between storage periods.

Table 2. **Weight loss (%) of flour at different infestation levels (pairs/kg) of *T. castaneum* and storage periods (month)**

Таблица 2. **Потеря веса (%) муки при различных уровнях заражения (пар/кг) *T. castaneum* и различных сроках хранения (по месяцам)**

Storage periods (month)	Infestation levels (pairs/kg)			
	0	10	20	40
4	0.49 ± 0.34^{bC}	14.42 ± 0.41^{cB}	15.70 ± 0.68^{cB}	18.19 ± 0.64^{cA}
6	1.25 ± 0.31^{abC}	20.76 ± 0.51^{bB}	26.10 ± 2.50^{bAB}	33.02 ± 2.63^{bA}
8	1.75 ± 0.12^{aC}	34.60 ± 2.39^{aB}	34.85 ± 1.62^{aB}	42.54 ± 1.56^{aA}

Means followed by the different letters are significantly different from each other at *P*<0.05 (Tukey HSD test); Capital letters represent differences between infestation levels and small letters represent differences between storage periods.

Statistical analysis reveals significant differences in insect population between the control sample (0 pairs/kg) and all infestation levels across storage periods. Additionally, significant differences in insect populations were evident between storage periods across all infestation levels. Weight loss differences were notably significant ($P < 0.0001$) between storage periods across all infestation levels and between infestation levels within each storage period, except between the 10 and 20 pairs/kg levels, which showed no statistically significant differences. These findings underscore the critical impact of infestation level and storage duration on both insect population growth and flour weight loss, suggesting the necessity for effective pest management in stored grain to preserve product quality.

3.2. Moisture content

Table 3 illustrates the effect of different infestation levels of *T. castaneum* and storage periods on the moisture content (%) of flour. A significant increase in moisture content was observed as both the storage time and infestation levels increased. The 4th month, the moisture content ranged from 12.59 % at 0 pairs/kg to 13.43 % at 40 pairs/kg, indicating that even at the initial stage of storage, insect infestation contributes to increased moisture levels, likely due to the metabolic activity of insects and associated microbial growth. By the 6th month, moisture content values significantly increased across all infestation levels, with values ranging from 13.03 % to 14.11 %. The highest moisture contents were recorded after 8 months of storage, with a maximum reaching of 14.56 % at the 40 pairs/kg infestation level. Statistically, small letters indicate the significant differences between storage durations, while capital letters denote differences between infestation levels. The results suggest that prolonged storage and higher infestation intensities synergistically elevate flour moisture content, which could accelerate quality deterioration and increase the risk of microbial contamination. This highlights the importance of pest control and moisture monitoring during flour storage to preserve its quality and safety.

Table 3. **Effect of infestation levels of *T. castaneum* and storage periods on flour moisture content (%)**

Таблица 3. **Влияние уровня заражения жуком *T. castaneum* и сроков хранения на влажность муки (%)**

Storage periods (month)	Infestation levels (pairs/kg)			
	0	10	20	40
4	12.59 ± 0.20^{bB}	12.85 ± 0.25^{cB}	13.10 ± 0.30^{bA}	13.43 ± 0.25^{bA}
6	13.03 ± 0.15^{aB}	13.51 ± 0.10^{bB}	14.02 ± 0.20^{aA}	14.11 ± 0.15^{aA}
8	13.20 ± 0.10^{aC}	14.04 ± 0.10^{aB}	14.45 ± 0.25^{aA}	14.56 ± 0.20^{aA}

Means followed by the different letters are significantly different from each other at *P*<0.05 (Tukey HSD test); Capital letters represent differences between infestation levels and small letters represent differences between storage periods.

3.3. Colour

The data presented in the Table 4 demonstrates the impact of storage period and infestation levels by *Tribolium castaneum* on the colour parameters (L*, a*, and b*) of flour. The L* value, indicating lightness, significantly decreased along with increased infestation levels and longer storage durations. Flour stored for 4 months under non-infested conditions preserved the highest lightness (94.02 ± 0.47), whereas the lowest L* value (81.59 ± 0.58) was observed after 8 months at the highest infestation level (40 pairs/kg), indicating progressive darkening of the flour due to insect activity and associated degradation. The a* value, which reflects redness, showed a gradual increase with infestation and storage time. For instance, at 0 infestation, a* values remained relatively stable (3.55–3.64), but under 40 pairs/kg infestation, the value increased significantly to 5.01 ± 0.17 after 8 months, indicating increased browning likely due to enzymatic reactions or insect contamination. Similarly, the b* values, representing yellowness, followed an increasing trend with storage time, particularly under high infestation. Notably, the highest b* value (8.82 ± 0.76) was recorded in non-infested flour after 8 months, while the infested samples showed inconsistent but generally lower b* values, indicating that infestation may interfere with natural pigment stability or contribute to pigment loss. Statistical analysis revealed significant differences ($P < 0.05$) among both storage periods (lowercase letters) and infestation levels (uppercase letters), emphasizing the combined effect of time and biotic stress on flour color quality. It is important to consider that the natural color of wheat can vary between the grain varieties, which may complicate the use of color changes as the sole indicator of quality degradation due to insect infestation. Therefore, color monitoring should be combined with other quality parameters — such as odor, moisture content, microbial load, and nutritional composition — for a more accurate and comprehensive assessment of flour quality during its storage.

Table 4. **Effect of storage periods and infestation levels with *T. castaneum* on the colour of flour**

Таблица 4. **Влияние сроков хранения и степени заражения жуком *T. castaneum* на цвет муки**

Storage periods (month)	Infestation levels (pairs/kg)			
	0	10	20	40
			Colour "L*"	
4	94.02 ± 0.47^{aA}	91.52 ± 0.37^{aB}	91.08 ± 0.44^{aB}	90.05 ± 0.54^{aB}
6	93.31 ± 0.96^{aA}	89.52 ± 0.43^{aB}	88.52 ± 0.31^{bB}	88.1 ± 0.20^{bB}
8	91.12 ± 0.77^{aA}	87.48 ± 0.68^{bB}	84.80 ± 0.17^{cC}	81.59 ± 0.58^{cD}
			Colour "a*"	
4	3.55 ± 0.05^{aB}	4.14 ± 0.06^{bA}	4.28 ± 0.01^{bA}	4.18 ± 0.02^{bA}
6	3.62 ± 0.15^{aB}	4.61 ± 0.07^{aA}	4.71 ± 0.08^{abA}	4.54 ± 0.09^{abA}
8	3.64 ± 0.13^{aB}	4.76 ± 0.14^{aA}	4.87 ± 0.23^{aA}	5.01 ± 0.17^{aA}
			Colour "b*"	
4	6.78 ± 0.19^{bA}	5.18 ± 0.14^{bB}	6.23 ± 0.09^{bA}	6.11 ± 0.22^{bA}
6	7.21 ± 0.24^{abA}	6.04 ± 0.17^{bB}	6.16 ± 0.20^{bB}	7.05 ± 0.34^{abBA}
8	8.82 ± 0.76^{aA}	7.05 ± 0.33^{aAB}	7.02 ± 0.16^{aB}	7.10 ± 0.12^{aAB}

Means followed by the different letters are significantly different from each other at *P*<0.05 (Tukey HSD test); Capital letters represent differences between infestation levels and small letters represent differences between storage periods.

3.4. Chemical composition

The chemical composition of wheat flour infested by *T. castaneum* was analyzed at varying infestation levels (0, 10, 20, and 40 pairs/kg) across the various storage durations (4, 6, and 8 months), as summarized in Figure 1. Results show distinct changes in the chemical composition correlated with both infestation levels and storage period. Generally, the

levels of protein, lipid, and ash increased with infestation and duration, whereas carbohydrate and fiber content decreased.

Protein content, initially, protein content in control sample (0 pairs/kg) was 10.84%. After 4 months, protein levels increased to 11.65%, 11.93%, and 12.14% at 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively. This trend continued, reaching 12.29%, 12.65%, and 12.98% after 6 months, with the highest protein content of 15.66% recorded after 8 months at 40 pairs/kg (Figure 1a). Lipid content, lipid levels in healthy, uninfested flour were 0.92%. Infested samples showed a gradual lipid increase, with levels of 1.01%, 1.19%, and 1.32% at 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively, after 4 months. Lipid content further rose up to 1.12%, 1.35%, and 1.52% in the 8-month samples at the same infestation levels (Figure 1b). Fiber content, fiber content in control was 0.87%. Infestation levels of 10, 20, and 40 pairs/kg showed fiber levels of 0.75%, 0.65%, and 0.45%, respectively, after 4 months. Fiber continued to decline over storage time, with values of 0.56%, 0.32%, and 0.27% at these same infestation levels after 8 months (Figure 1c). Ash content, ash percentage also increased with infestation and storage. The control sample's ash level was 0.48%, while at 40 pairs/kg infestation, it rose to 0.55% after 4 months and reached 0.68% by 8 months (Figure 1d). Carbohydrate content, carbohydrate percentages decreased with infestation level and storage duration. Starting at 86.9% in control sample, carbohydrates fell down to 85.48%, 84.71%, and 83.88% after 4 months at 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively. This reduction continued over time, with carbohydrate levels as low as 82.81%, 79.54%, and 77.94% after 8 months (Figure 1e). Statistical analysis showed that differences in all chemical compositions were significant across infestation levels and storage durations, though control values remained consistent over time without significant change.

4. Discussion

This study revealed a difference in qualitative and quantitative losses caused by various infestation levels with *Tribolium castaneum* during a long storage period. Generally, the insect population of this species increased with higher artificial infestation levels and extended storage

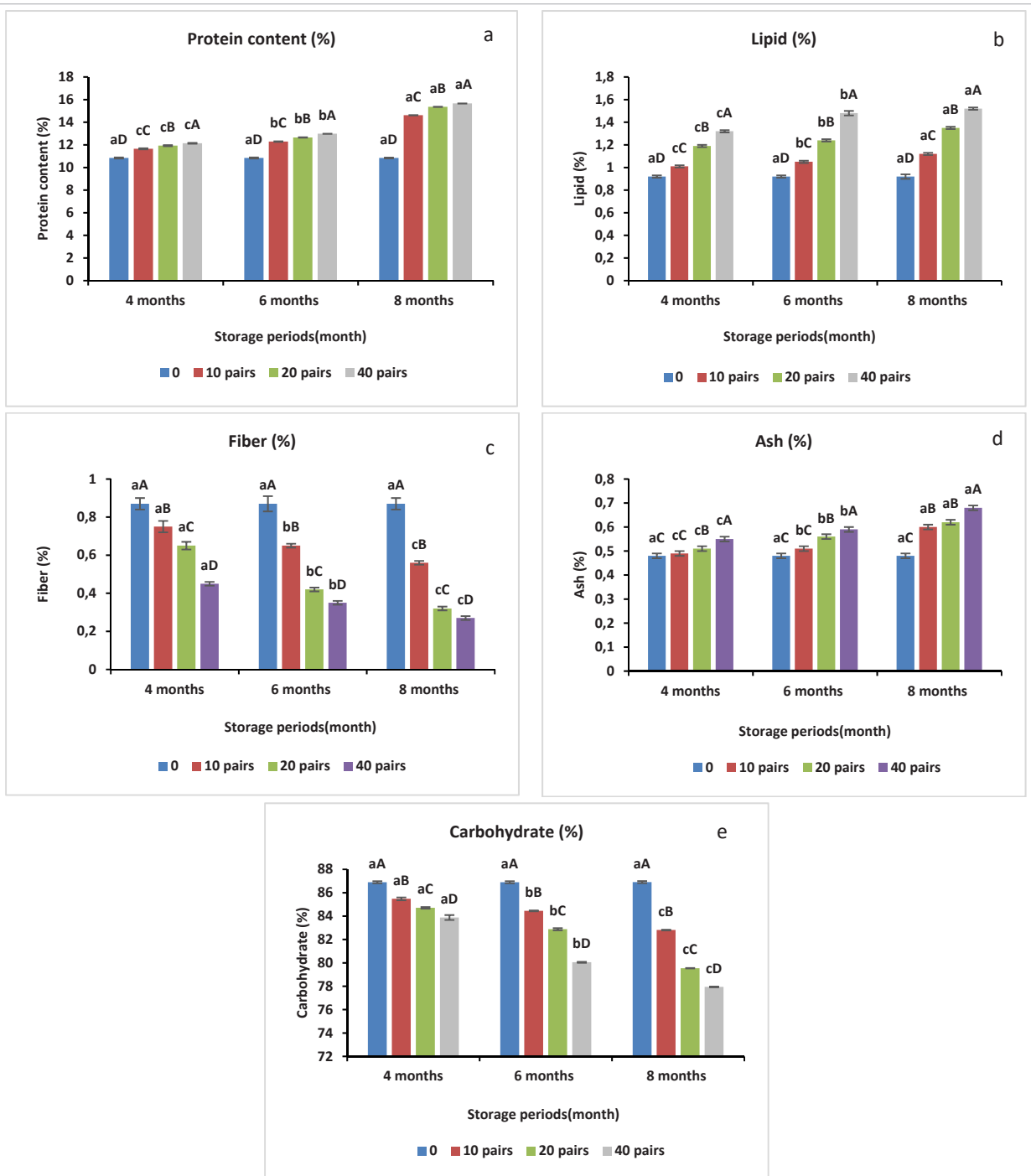


Figure 1. **Effect of flour infestation level (pairs/kg) with *T. castaneum* and storage periods (month) on chemical composition of flour**

Рисунок 1. **Влияние зараженности муки (пар/кг) жуком *T. castaneum* и сроков хранения (месяцы) на химический состав муки**

Capital letters represent differences between infestation levels and small letters represent differences between storage periods.

periods. The number of adult insects reached the highest population (638.50 insects) at the highest level of infestation (40 pairs/kg) at the end of the storage period (8 months). Our results agree with Gabarty and Abou El Nour [11], who found that the population of *Tribolium confusum* recorded 865 adults after two months of storage. In a study conducted by Keskin and Ozkaya [8], it was observed that the number of adult weevils (*Sitophilus granarius*) remained almost unchanged during the first two months, but when the storage period was extended to three months, the number of insects increased significantly.

In the present study, the weight losses caused by *T. castaneum* infestation were defined, revealing a positive correlation between the insect population and the product weight losses. At six months of storage, the weight losses were 20.76% at the low level of infestation (10 pairs/ kg) and reached 33.02% at level 40 pairs/kg. Also, our results indicate that the weight losses increased along with increasing storage periods. The weight loss caused by *T. castaneum* was 14.4% after 4 months of storage, then it reached 34.6% after 8 months at the same infestation level. These results agree with those of Musa and Lawal [30] who found the infestation with *T. castaneum* caused a 52.67% weight loss after four months. The increases in weight losses may be due to the difference in storage conditions or infestation levels. Also, Gabarty and Abou El Nour [11] stated that *T. confusum* caused an 11% weight loss after 2 months of storage. Additionally, Keskin and Ozkaya [8] found that *S. granarius* caused 39.25% weight loss after six months of storage. Hussain et al. [22] found that *Oryzaephilus surinamensis* caused weight losses of 18.11%. Also, Tadele et al. [31] found that maize weevil caused a loss of 5.47% in wheat flour, respectively. Odeyemi et al. [32] reported that the percentage of weight loss due to *T. castaneum* infestation in products manufactured from wheat flour ranged between 0.01–2.24%.

Moisture content is a critical parameter affecting the quality of stored products. In our study, we found that the moisture content of wheat flour increased with higher levels of infestation by *T. castaneum*, reaching 13.43% at 40 pairs/kg flour. The increase in moisture of wheat flour may be due to fragments and insect activity that facilitate the growth of microorganisms. This result aligns with the findings of Negi et al. [26], who reported that the moisture content of wheat flour increased up to 11.7% after infestation by *T. castaneum*. Additionally, Babarinde et al. [33] mentioned that the same insect increased moisture content in plantain chips. We found that moisture content increased with longer storage periods, from 13.43% after 4 months to 14.56% after 8 months. Our results agree with Mwazha [19] and Yigezu et al. [1], who mentioned that moisture content increased in correlation with longer storage periods in barley and wheat.

Colour is a crucial quality parameter of wheat flour, directly influencing consumers' preference and acceptability. Flour colour significantly impacts the colour of the end products [24,34]. The parameters L*, a*, and b* are used to assess product quality. Our results indicate that lightness (L*) decreased with increasing storage time in both healthy and *T. castaneum* infested flour. This means that the flour colour became pale. While a* and b* values increased along with longer storage periods. Increasing a* means that the flour became reddish in colour, and this may be due to increased benzoquinones secreted by *T. castaneum* adults. These findings are consistent with those of Anandakumar et al. [35], who observed a decrease in L* values in turmeric over certain time. Similarly, Fernandes et al. [36] reported significant increases in a* and b* values in chestnut samples during storage. Hashem et al. [37] recorded that the lightness value of chamomile flowers decreased to 54.9 degrees after 6 months of storage. Our study also confirmed that lightness decreased with higher levels of infestation with *T. castaneum*. The lightness value was 94.02 degrees in healthy flour, decreasing to 90.05 degrees at 40 pairs/kg. These results agree with Negi et al. [26], who recorded that infestation with *T. castaneum* decreased the lightness (L*) of flour. Furthermore, Duarte et al. [16] reported that infestation with *T. confusum* affected the colour of flour. The presence of insects, their fragments, excretions, and cast skins can alter the colour of wheat flour from white to pale white, resulting in slightly darker shade of the infested flour compared to uninfested flour [26]. The colour change also reduces the quality of the flour as well as the products made from it, which leads to its unsuitability to the consumer [9].

The chemical compositions in wheat flour are critical parameters for evaluating quality [38,39]. In this study, results confirmed that infestation by *T. castaneum* altered the chemical composition of wheat flour, with changes observed according to infestation level and storage period. Specifically, protein, lipid, and ash contents increased with higher infestation levels, while carbohydrate and fiber levels decreased. These findings align with the prior research by Taddese et al. [40], who noted increased protein and ash levels in wheat grains infested by *S. granarius* during 6-month storage. Similarly, Ahmedani et al. [41] found that *Trogoderma granarium* larvae infestation raised protein, lipid, and ash content in wheat grains after six months, while Babarinde et al. [33] observed the increased protein and fat in plantain chips infested by *T. castaneum*. Gabarty and Abou El Nour [11] also recorded increased protein in wheat infested by *C. cephalonia*, *E. kuehniella*, and *T. confusum*. These increases in protein, lipid, and ash content in infested grains may be attributed to presence of insect body parts, metabolic waste, and insect feeding habits [8]. Duarte et al. [10] recorded that the percentage of fat in *T. castaneum* adult reaches 7.24%, while the percentage of protein reaches 16.97%. The reduction in endosperm due to larval and adult feeding on grains can further explain the rise in protein content [42,43]

In this study, protein content increased progressively with storage, reaching 14.62%, 15.36%, and 15.66% at infestation levels of 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively, after 8 months. Lipid content, which was initially 0.92% in the control, increased with infestation and storage period, reaching 1.12%, 1.35%, and 1.52% after 8 months of storage for infestation levels of 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively. Mwazha [19] observed similar patterns in barley grains, and Naguib et al. [44] and Jood et al. [45] reported the comparable findings in wheat grains. Variations in lipid levels during storage may stem from lipid breakdown through hydrolytic reactions when moisture content exceeds 14% in flour stored in improper conditions, followed by oxidative rancidity [46].

Carbohydrate and fiber content showed a declining trend in infested flour compared to control sample. Initially, carbohydrate content in the control sample was 86.90%, but it decreased to 82.81%, 79.54%, and 77.94% at infestation levels of 10, 20, and 40 pairs/kg, respectively, after 8 months of storage. Similarly, fiber content, initially 0.87% in the control sample, dropped to 0.56%, 0.32%, and 0.27% after 8 months at the same infestation levels. These findings align with those of Ahmedani et al. [41], who observed carbohydrate reductions in *T. granarium* infested wheat from 81.04% to 74.97% over six months. Gabarty and Abou El Nour [11] also reported reductions in monosaccharides and disaccharides due to infestation by *C. cephalonia*, *E. kuehniella*, and *T. confusum*. Babarinde et al. [33] noted lower fiber levels in *T. castaneum* infested plantain chips compared to control samples, although Ahmedani et al. [41] found increased fiber content in *T. granarium* infested wheat grains over six months.

5. Conclusion

The study concludes that *Tribolium castaneum* infestation significantly deteriorates the quality characteristics of wheat flour. Higher infestation levels and longer storage times directly correlate with increased insect populations, weight loss, and moisture content. Also, even minimal *T. castaneum* infestations can substantially impact flour quality as affecting its colour, and chemical composition. This emphasizes the need for stringent pest management in the stored grain products to maintain flour quality.

REFERENCES

1. Yigezu, Y. A., Moustafa, M. A., Mohiy, M. M., Ibrahim, S. E., Ghanem, W. M., Niane, A. -A. et al. (2021). Food losses and wastage along the wheat value chain in Egypt and their implications on food and energy security, natural resources, and the environment. *Sustainability*, 13(18), Article 10011. https://doi.org/10.3390/su131810011
2. 2. Kumar, A., Gowda, G. B., Sah, R. P., Sahu, C., Biswal, M., Nayak, S. et al. (2020). Status of glycemic index of paddy rice grain (*Oryza sativa* L.) on infestation by storage pest *Sitotroga cerealella*. *Journal of Stored Products Research*, 89, Article 101697. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101697
3. Petre, M.V., Popa, M.E. (2021). Effect of storage condition on wheat quality parameters — A mini review. *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, 24(2), 25–30.
4. Duarte, S., Magro, A., Tomás, J., Hilário, C., Alvito, P., Ferreira, R. B. et al. (2021). The interaction between *Tribolium castaneum* and mycotoxigenic *Aspergillus flavus* in maize flour. *Insects*, 12(8), Article 730. https://doi.org/10.3390/insects12080730
5. Hassan, M. W., Sarwar, G., Farooqi, M. A., Jamil, M. (2021). Extent and pattern of damage in wheat caused by three different species of storage insect pests. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41, 593–599. https://doi.org/10.1007/s42690-020-00246-0
6. Madhukar, P., Pandey, L. M., Dixit, U. S. (2025). Post — harvest grain storage: Methods, factors, and eco-friendly solutions. *Food Control*, 174, Article 111236. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111236
7. 7. Bharathi, S. V. K., Priya, V.V., Eswaran, V., Moses, J. A., Sujeetha, A. R. P. (2017). Insect infestation and losses in stored food grains. *Ecology, Environment and Conservation*, 23(1), 286–291.
8. Keskin, S., Ozkaya, H. (2015). Effect of storage and insect infestation on the technological properties of wheat. *CyTA — Journal of Food,* 13(1), 134–139. https://doi.org/10.1080/19476337.2014.919962

9. Carvalho, M.O., Sonia, H.G., Graça, D.C, Sousa, I.D. (2023). Impact of red flour beetle infestations in wheat flour and their effects on dough and bread physical, chemical, and color properties. *Journal of Stored Products Research*, 102, Article 102095. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102095
10. Duarte, S., Limão, J., Barros, G., Bandarra, N. M., Roseiro, L. C., Gonçalves, H. et al. (2021). Nutritional and chemical composition of different life stages of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Stored Products Research*, 93(2), Article 101826. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101826
11. Gabarty, A., Abou El Nour, S. (2016). Impact of wheat flour infestation by some insects on its quantity and quality loss, fungal contamination and mycotoxins. *International Journal of Agriculture and Biology,* 18, 1122–1130. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0233
12. Stathas, I.G., Sakellaridis, A.C., Marina Papadelli, M., Kapolos, J., Papadimitriou, K., Stathas, G.J. (2023). The effects of insect infestation on stored agricultural products and the quality of food. *Foods*, 12(10), Article 2046. https://doi.org/10.3390/foods12102046
13. Abuelnnor, N. A., Jones, P. R. H., Ratcliffe, N. M., Costello, B. D. L., Spencer-Phillips, P. T. N. (27 June to 2 July 2010). *Investigation of the semiochemicals of confused flour beetle Tribolium confusum Jaquelin du Val and grain weevil Sitophilus granarius (L.) in stored wheat grain and flour.* Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection. Estoril, Portugal. https://doi.org/10.5073/jka.2010.425.089
14. Srivastava, S., Mishra, H. N. (2021). Ecofriendly nonchemical/nonthermal methods for disinfestation and control of pest/fungal infestation during storage of major important cereal grains: A review. *Food Frontiers*, 2(1), 93–105. https://doi.org/10.1002/fft2.69
15. Maurya, A., Yadav, A., Soni, M., Paul, K. K., Banjare, U., Jha, M. K. et al. (2024). Nanoencapsulated essential oils for post-harvest preservation of stored cereals: A review. *Foods*, 13(24), Article 4013. https://doi.org/10.3390/foods13244013
16. Duarte, S., Magro, A., Tomás, J., Hilário, C., Ferreira, R. B., Carvalho, M. O. (2022). Antifungal activity of benzoquinones produced by *Tribolium castaneum* in maize-associated fungi. *Insects*, 13(10), Article 868. https://doi.org/10.3390/insects13100868
17. Gao, F., Qi, Y., Hamadou, A. H., Zhang, J., Manzoor, M. F., Guo, Q. et al. (2022). Enhancing wheat-flour safety by detecting and controlling red flour beetle *Tribolium castaneum* Herbst (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 17, 113–126. https://doi.org/10.1007/s00003-022-01371-3
18. Khater, K. S., Shoukry, I. F., Abdel-Aziz, A. -A. E., Saad, N. A. (2023). Influence of some biological control measures on Tribolium castaneum (Coleoptera: Tenebrionidae). *Catrina: The International Journal of Environmental Sciences*, 28(1), 61–71.
19. Mwazha, M., Mugadza, D. T., Manhokwe, S., Njini, M., Jombo, T. Z. (2022). Comparison of the changes in seed germination vigour with prolonged postharvest storage for hordeum vulgare varieties, hope and sierra malting barley varieties, in Zimbabwe. *Journal of Food Quality,* 2022(1), Article 9612855. https://doi.org/10.1155/2022/9612855
20. Lü, J., Guo, Y., Huang, Z. (2022). Influence of *Tribolium castaneum* (Herbst) infestation on farinographical properties of wheat flour dough. *Journal of Food and Nutrition Research*, 10(3), 175–179. https://doi.org/10.12691/jfnr-10-3-1
21. Naroz, M. H., Ahmed, S. S., Abdel-Aziz, S. Y., Abdel-Shafy, S. (2019). First record of *Acanthoscelides obtectus* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) in Egypt: Development and host preference on five species of legume seeds. *The Coleopterists Bulletin*, 73(3), 727–734. https://doi.org/10.1649/0010-065X-73.3.727
22. Hussain, H. H. B., Zinhoum, R. A., Kassem, E. M. K. (2020). Suitability of different types of foodstuffs for mass rearing of rice moth, *Corcyra cephalonica* (Stainton) and saw-toothed grain beetle, *Oryzaephilus surinamensis* (L.) under laboratory conditions. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 98(2), 288–301. https://doi.org/10.21608/ejar.2020.120322
23. Mohammadi, A., Rafiee, S., Emam-Djomeh, Z., Keyhani, A. (2008). Kinetic models for colour changes in kiwifruit slices during hot air drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4(3), 376–383.
24. Bilgiçli, N., Levent, H. (2014). Utilization of lupin (*Lupinus albus* L.) flour and bran with xylanase enzyme in cookie production. *Legume Research — an International Journal,* 37(3), 264–271. https://doi.org/10.5958/j.0976-0571.37.3.040
25. Artes, F., Escalona, V. H., Artes-Hdez, F. (2002). Modified atmosphere packaging of fennel. *Journal of Food Science,* 67(4), 1550–1554. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10320.x
26. Negi, A., Pare, A., Manickam, L., Rajamani, M. (2022). Effects of defect action level of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) fragments on quality of wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 102(1), 223–232. https://doi.org/10.1002/jsfa.11349
27. Tlay, R.H., Abdul-Abbas, S.J., El-Maksoud, A.A.A., Altemimi, A. B,, Abedelmaksoud, T. G. (2023). Functional biscuits enriched with potato peel powder: Physical, chemical, rheological, and antioxidants properties. *Food Systems,* 6(1), 53–63. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-53-63
28. AOAC. (2019). Official methods of analysis of the AOAC (21st ed.). Gaithersburg, MD: AOAC.
29. Snedecor, G. W. Cochran, W.G. (1967). Statistical methods. 6th Ed. Ames, IA, USA: Iowa State University Press, 1967.
30. Musa, A., Lawal, T. (2013). Proximate composition of ten types of biscuits and their susceptibility to *Tribolium castaneum* Herbst (Coleoptera: Tenebrionidae) in Nigeria. *Food Science and Quality Management,* 14, 33–41.
31. Tadele, T., Stephen, M., Paddy, L. (2011). Effects of insect population density and storage time on grain damage and weight loss in maize due to the maize weevil *Sitophilus zeamais* and the larger grain borer *Prostephanus truncatus*. *African Journal of Agricultural Research,* 6(10), 2249–2254. https://doi.org/10.5897/AJAR11.179
32. Odeyemi, O.O., Oyedare, B.M., Ashamo, M.O. (2005). Resistance of seven biscuits types to infestation by *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Zoological Research*, 26(3), 300–304.
33. Babarinde, S. A., Babarinde, G. O., Olasesan, O. A. (2010). Physical and biophysical deterioration of stored plantain chips (*Musa sapientum* L.) due to infestation of *Tribolium castaneum* Herbst (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Plant Protection Research,* 50(3), 302–306. https://doi.org/10.2478/v10045-010-0052-y
34. Oliver J, Blakeney A., Allen, H. (1992). Measurement of flour color in color space parameters. *Cereal Chemistry*, 69, 546–551.
35. Anandakumar, S., Subhasini, S., Alagusundaram, K., Abirami, K. (2016). Effect of ozone fumigation on *Laioderma serricorne* (F) and quality of turmeric rhizome. *Indian Journal of Entomology,* 78(S), 126–132. https://doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00034.1
36. Fernandes, L., Pereira, E. L., Céu Fidalgo, M. D., Gomes, A., Ramalhosa, E. (2020.) Effect of modified atmosphere, vacuum polyethylene packaging on physicochemical and microbial quality of chestnuts (*Castanea sativa*) during storage. *International Journal of Fruit Science,* 20(sup2), S785-S801. https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1768619
37. Hashem, M. Y., Ahmed, S. S., Khalil, S. S. H., El-Attar, A. B., Abdelgawad, K. F. (2024). Application of modified atmospheres to control *Stegobium paniceum* and *Lasioderma serricorne* infestation of stored chamomile and coriander and its effect on product quality. *Journal of Crop Health,* 76, 49–63. https://doi.org/10.1007/s10343-023-00936-y
38. Kumar, P., Yadava, R. K., Gollen, B., Kumar, S., Verma, R.K., Yadav, S (2011). Nutritional contents and medicinal properties of wheat: A review. *Life Sciences and Medicine Research*, 2011, Article LSMR-22.
39. Stathers, T. E., Arnold, S. E.J., Rumney, C. J., Hopson, C. (2020). Measuring the nutritional cost of insect infestation of stored maize and cowpea. *Food Security*, 12(2), 285–308. https://doi.org/10.1007/s12571-019-00997-w
40. Taddese, M., Dibaba, K., Bayissa, W., Hunde, D., Mendesil, E., Kassie, M. et al. (2020). Assessment of quantitative and qualitative losses of stored grains due to insect infestation in Ethiopia. *Journal of Stored Products Research*, 89, Article 101689. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101689
41. Ahmedani, M. S., Haque, M. I., Afzal, S. N. (2009). Varietal changes in nutritional composition of wheat kernel (*Triticum aestivum*) caused by khapra beetle infestation. *Pakistan Journal of Botany,* 41(3), 1511–1519.
42. Nawrot, J., Warchalewski, J. R., Piasecka — Kwiatkowska, D., Niewiada, A., Gawlak, M., Grundas, S. T. et al. (October 15–18, 2006). *The effect of some biological and technological properties of wheat grain on granary weevil (Sitophilus granarius L.) (Coleoptera: Curculionidae) development*. 9th International Working Conference on Stored Product Protection. Sao Paulo, Brazil, 2006.
43. Niewiada, A., Nawrot, J., Szafranek, J., Szafranek, B., Syanak, E., Jelen, H. et al. (2005). Some factors affecting egg-laying of granary weevil (*Sitophilus granarius* L.). *Journal of Stored Products Research*, 41(5), 544–555. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2004.11.001
44. Naguib, A. N., Mohamed, E. A. I., El-Aidy, N. A. (2022). Effect of storage period and packaging material on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed viability and quality. *Egyptian Journal of Agricultural Research,* 89(4), 1481–1497. https://doi.org/10.21608/ejar.2011.179081
45. Jood, S., Kapoor, A. C. Singh, R. (1995). Amino acid composition and chemical evaluation of protein quality of cereals as affected by insect infestation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 48,159–167. https://doi.org/10.1007/BF01088312
46. Sutar, S. A., Thirumdas, R., Chaudhari, B. B., Deshmukh, R.R., Annapure. U.S. (2021). Effect of cold plasma on insect infestation and keeping quality of stored wheat flour. *Journal of Stored Products Research*, 92(6), 101–114. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101774

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Ebtesam F. Badran, MSc Student, Department of Entomology and Pesticides, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0111–178–67–80 E mail: ebtsamfarah88@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8704-9786	**Бадран Эбтисан Ф.** — Магистрант, Кафедра экономической энтомологии и пестицидов, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0111–178–67–80 E mail: ebtsamfarah88@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8704-9786
Tarek G. Abedelmaksoud, Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0110–144–12–80 E mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * corresponding author	**Абедельмаксуд Т. Г.** — адъюнкт-профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0110–144–12–80 E mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * автор для контактов
EizzElden A. Elshazly, Professor, Department of Entomology and Pesticides, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0100–362–37–56 E mail: ezzzt86@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6313-2978	**Эльшазли ЭйзЭльдин А.** — Профессор, Кафедра экономической энтомологии и пестицидов, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0100–362–37–56 E mail: ezzzt86@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6313-2978
Sayeda S. Ahmed, Professor, Department of Entomology and Pesticides, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0100–922–36–83 E mail: Sayeda01@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4875-400X	**Ахмед Сайед С.** — Профессор, Кафедра экономической энтомологии и пестицидов, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0100–922–36–83 E mail: Sayeda01@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4875-400X
Contribution	**Критерии авторства**
Authors are equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-180-188

Поступила 11.01.2025
Поступила после рецензирования 22.04.2025
Принята в печать 28.04.2025
© Степанова А. А., Асякина Л. К., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

МИРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ БЕЛКА И КАЛОРИЙ: ВЗАИМОСВЯЗЬ С РАЦИОНОМ И ПРОДУКТЫ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФИЦИТА

Степанова А. А., Асякина Л. К.
Кемеровский Государственный Университет, Кемерово, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *питание, рацион, белки, калории, полезные продукты, питательные вещества*

АННОТАЦИЯ
Здоровое питание со сбалансированным рационом и достаточной калорийностью способствует долголетию и борьбе с неинфекционными заболеваниями. Оно также повышает устойчивость к стрессам, нагрузкам и неблагоприятным воздействиям окружающей среды. Цель исследования — анализ динамики мирового потребления белка и калорий и их взаимосвязи с рационом населения различных регионов, а также оценка продуктов питания, способных восполнить недостаток белка, пищевых волокон и других питательных веществ. Анализ данных Росстата и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций показал, что в Африке наблюдается самый низкий уровень потребления белка и калорий по сравнению с мировыми показателями. Это обусловлено преимущественно растительным рационом. В Азии показатели потребления белка и калорий приближены к мировым значениям. В рацион входит значительное количество рыбы и морепродуктов, растительная пища и цельнозерновые продукты. Одни из самых высоких показателей обнаружены в Америке, Океании, Европе и России: рацион населения более сбалансированный, однако он включает значительное количество насыщенных жиров и простых углеводов. Анализ набора данных, содержащих информацию о ста самых полезных продуктах питания, взятых с Kaggle и обработанных в программе Power BI, смог выявить наиболее богатые белком, клетчаткой и витамином С продукты, а также определить антиоксидантный индекс продукта, его калорийность и географию происхождения. Именно питание обеспечивает физическую и умственную активность человека, его настроение и качество жизни, поэтому по энергетической ценности и набору используемых в суточном рационе продуктов питание должно соответствовать возрасту, полу, профессиональной деятельности, общему состоянию здоровья человека и климатогеографической зоне, в которой он проживает.

Received 11.01.2025
Accepted in revised 22.04.2025
Accepted for publication 28.04.2025
© Stepanova A. A., Asyakina L. K. 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

GLOBAL CONSUMPTION OF PROTEIN AND CALORIES: INTERRELATION WITH THE DIET AND PRODUCTS FOR ELIMINATION OF DEFICIENCY

Anna A. Stepanova, Lyudmila K. Asyakina
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

KEY WORDS: *nutrition, diet, proteins, calories, healthy foods, nutrients*

ABSTRACT
Healthy nutrition with a balanced diet and sufficient caloric content facilitates longevity and control of non-communicable diseases. It also increases resistance to stress, pressures and unfavorable effects of the environment. The aim of the research was to analyze the dynamics of the global consumption of protein and calories and their interrelation with the diets of the population from various regions, as well as to assess food products that are able to make up for a deficiency in protein, dietary fiber and other nutrients. Analysis of data from the Rosstat and Food and Agriculture Organization of the United Nations showed that the lowest level of consumption of protein and calories was observed in Africa compared to world indices. This is conditioned by mainly plant-based diets. In Asia, indices of protein and calorie consumption are close to the world values. Diets include a significant amount of fish and seafood, plant-based foods and whole grain products. The highest indices were found in America, Oceania, Europe and Russia. Diets of their populations are more balanced; however, they include significant amounts of saturated fats and simple carbohydrates. Analysis of the data array containing information about 100 healthiest foods taken from Kaggle and processed in the program Power BI was able to reveal products that are most rich in protein, dietary fiber and vitamin C, as well as to detect the antioxidant index of products, their caloric content and geographical origin. It is nutrition that ensures the physical and mental activities of humans, their mood and quality of life. Therefore, by energy value and sets of products used in daily diets, nutrition should correspond to the age, gender, occupation, general health state of humans and the climate and geographical zones where they live.

1. Введение

Изменение климата, связанное с мировым сельским хозяйством, рост населения и неинфекционные заболевания (НИЗ) — глобальные проблемы, определяющие связь окружающей среды и здоровья населения. Здоровое питание рассматривается как жизненно необходимое средство, оказывающее содействие в борьбе с тремя глобальными проблемами [1].

Мировое сельское хозяйство существенно влияет на окружающую среду: зачастую используемые агрохимикаты загрязняют пахотные земли, пастбища и воду, а вырубка и расчистка лесов, саванн и лугов угрожает разным видам животных вымиранием. В настоящее время на сельское хозяйство приходится более 30% от общего объема выбросов парниковых газов, что считается основным фактором изменения климата [2]. Согласно прогнозу Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, к 2050 году мировое производство продовольствия увеличится более чем на 60%, что связано с активным ростом населения в мире. Это создает серьезную угрозу здоровью людей и экосистемам планеты [3]. Кроме того, текущие тенденции в питании значительно увеличивают заболеваемость неинфекционными заболеваниями, которые составляют до 72% мировой смертности [4].

Хотя здоровое питание играет ключевую роль в противодействии негативным последствиям вышеупомянутых трех проблем, реализа-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Степанова, А. А., Асякина Л. К.** (2025). Мировое потребление белка и калорий: взаимосвязь с рационом и продукты для устранения дефицита. *Пищевые системы*, 8(2), 180–188. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-180-188

FOR CITATION: **Stepanova, A. A., Asyakina, L. K.** (2025). Global consumption of protein and calories: Interrelation with the diet and products for elimination of deficiency. *Food Systems,* 8(2), 180–188. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-180-188

ция здорового питания является весьма сложной задачей, если учитывать взаимодействие человеческих, социально-экономических, экологических и политических факторов [5].

За последние десятилетия в странах с низким и средним уровнем дохода растет распространенность ожирения и связанных с питанием неинфекционных заболеваний, таких как диабет, гипертония, ишемическая болезнь сердца и некоторые виды рака [6]. По данным ВОЗ, неинфекционные заболевания являются причиной смертей, составляющих 70% всех случаев, из них более 85% — преждевременные [7]. Для изменения сложившейся ситуации необходимо менять пищевую культуру, снижать потребление вредной пищи, содействовать здоровому питанию как с помощью фискальной политики, так и путем стимулирования продаж функциональных продуктов. В ряде стран есть логотипы, ориентированные только на здоровую пищу, такие как Keyhole в Скандинавии и избирательная зеленая маркировка в Израиле [6].

Технологии функциональных продуктов питания наиболее активно развиваются в следующих отраслях пищевой промышленности [8]:

- молочная промышленность — продукты, содержащие пробиотики, пребиотики, витамины и минералы (йогурты, молоко, кефир, творог и др.) [9];
- хлебопекарная и кондитерская промышленность — хлебобулочные изделия с пищевыми волокнами, клетчаткой, антиоксидантами и микронутриентами, зерновые продукты (цельнозерновой хлеб, печенье, батончики-мюсли, протеиновые батончики, зефир и др.) [9];
- мясоперерабатывающая промышленность — функциональные мясные и колбасные изделия с низким содержанием жира и соли, с добавлением пищевых волокон, витаминов и минералов [10];
- масложировая промышленность — продукты со сбалансированным жирно-кислотным составом, обогащенные ненасыщенными жирными кислотами, витаминами, пищевыми волокнами (витаминизированные растительные масла с добавлением экстрактов из растительного сырья, соусы, спреды) [10];
- производство напитков — функциональные напитки с добавлением витаминов, экстрактов растений и других БАВ (энергетический чай, сок, спортивные напитки, коктейли, ферментированные напитки и др.) [11].

Выделяют отдельную категорию функциональных продуктов питания, которые не требуют дополнительного обогащения, а изначально содержат в своем составе большое количество витаминов, антиоксидантов, минералов, жиров, клетчатки, белка и других БАВ [12]. Эта категория включает следующие продукты:

- ягоды (черника, ежевика, малина, голубика и др.) [13];
- орехи и семена (миндаль, фундук, грецкий орех, семена льна, чиа и горчицы и др.) [13];
- цельнозерновые продукты (цельнозерновой хлеб, гречка, овсянка, киноа, макароны и спагетти из цельнозерновой пшеницы, цельнозерновые хлопья и мюсли, рис и др.) [14];
- ферментированные продукты (йогурт, кефир, квашеная капуста, кимчи и др.) [15];
- зеленые овощи (шпинат, брокколи, капуста, руккола, кинза, лук, чеснок и др.) [15];
- пряности и специи (куркума, имбирь, корица, перец и др.) [15].

Включение в рацион здоровой, сбалансированной пищи, обеспечение населения полноценным продовольствием и функциональными продуктами, а также поддержание оптимальной калорийности рациона — путь к здоровому питанию в стране. Поэтому цели настоящей работы — рассмотреть динамику потребления населением основных продуктов питания, белка и калорий; оценить полезные продукты согласно содержанию в них белка, пищевых волокон (клетчатки), витамина С и антиоксидантного индекса и выделить основные питательные свойства и преимущества продукта; рассмотреть географию происхождения наиболее полезных продуктов; проанализировать взаимосвязь основного рациона населения континентов с потреблением белка и калорий.

Анализ перечисленных элементов может способствовать составлению здорового рациона согласно предпочтениям населения и понять сложившуюся ситуацию с потреблением важных питательных веществ населением по всему миру.

2. Объекты и методы

В работе используются методы анализа статистических данных Росстата и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций по потреблению белка и калорий в России, в мире и на континентах. Применяются методы анализа набора данных, взятых из источника Kaggle [16], обработанных в программе Power BI. В них содержится информация о ста самых полезных продуктах питания. Кроме того, в наборе данных представлены сведения о калорийности, о полезных свойствах, об антиоксидантном индексе, о содержании белка, пищевых волокон и витамина С, а также о регионе происхождения. Вся информация была систематизирована и обобщена.

3. Результаты и обсуждение

Потребление основных продуктов питания в РФ, включая функциональные продукты, характеризуется статистикой, представленной в Таблице 1 [17].

Таблица 1. **Потребление основных продуктов питания в Российской Федерации на душу населения в год, кг**

Table 1. **Consumption of basic food products in the Russian Federation per capita per year, kg**

Основные продукты питания	2019	2020	2021	2022	2023
Мясо и мясопродукты в пересчете на мясо	75	76	77	78	80
в том числе мясо и мясопродукты без субпродуктов II категории и жира-сырца	69	70	71	72	74
Молоко и молочные продукты в пересчете на молоко	232	238	239	241	247
Яйца и яйцепродукты (шт)	283	281	279	288	290
Рыба и рыбопродукты в живом весе (весе сырца)	21,0	19,9	21,0	19,2	22,6
Сахар	39	39	38	39	39
Масло растительное	13,9	13,8	13,5	13,8	13,8
Картофель	88	86	83	84	86
Овощи и продовольственные бахчевые культуры	107	106	103	104	105
Фрукты и ягоды	61	61	62	63	66
Хлебные продукты (хлеб и макаронные изделия в пересчете на муку, мука, крупа и бобовые)	115	114	113	113	112

Из Таблицы 1 следует, что в течение пяти лет потребление основных продуктов характеризуется неоднозначными результатами. Так, потребление мяса и мясопродуктов, молока и молочных продуктов, фруктов и ягод постепенно увеличивалось в период 2019–2023 гг. Показатель потребления яиц ежегодно снижался вплоть до 2021 г., а затем в 2022 г. превысил уровень 2019 г., и в 2023 г. его рост продолжился. Похожая ситуация наблюдалась с рыбой и рыбопродуктами. Показатели потребления сахара и растительного масла почти не менялись в течение всего периода рассмотрения. А вот потребление хлебных продуктов снижалось на протяжении пяти лет, но незначительно. Показатели потребления картофеля и овощей имеют схожую динамику — снижение объемов потребления с 2020 г и их увеличение с 2022, однако уровня 2019 г. достигнуть в 2023 г. не удалось.

Показатели потребления белка населением Российской Федерации, мира и континентов с 2010 по 2022 гг. представлены на Рисунке 1. На протяжении всего периода заметен рост показателя по миру, что говорит о введении в рацион потребителя пищи, богатой белком. Если рассматривать ситуацию по континентам, то показатели разнятся. Например, в Азии, Европе и России, как и по всему миру, наблюдается увеличение показателя потребления белка, однако в Африке и Океании (Австралия и Новая Зеландия) отмечается тенденция к уменьшению включения белка в рацион. В Америке за весь период заметны рост и спад и потребления белка [18].

По количеству потребления белка Российская Федерация близка и даже превосходит средние показатели Европы. Меньше всего белка в рационе населения отмечается в Африке. В Азии показатели приближены к общемировым, но заметно ниже, чем в Америке, Океании и Европе [18].

При этом, согласно методическим рекомендациям МР 2.3.1.0253-21[1], физиологическая потребность в белке для взрослого населения составляет 12–14% от энергетической суточной потребности: от 75 до 114 г/сутки для мужчин и от 60 до 90 г/сутки для женщин. Физиологические потребности в белке детей до 1 года — 2,2–2,9 г/кг массы тела, детей старше 1 года (с увеличением возраста) — от 39 до 87 г/сутки. На Рисунке 1 выведены численные показатели потребления белка, которые в целом соответствуют нормам потребления в России.

[1] МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации». Москва: ЦЕНТРМАГ, 2023. — 80 с.

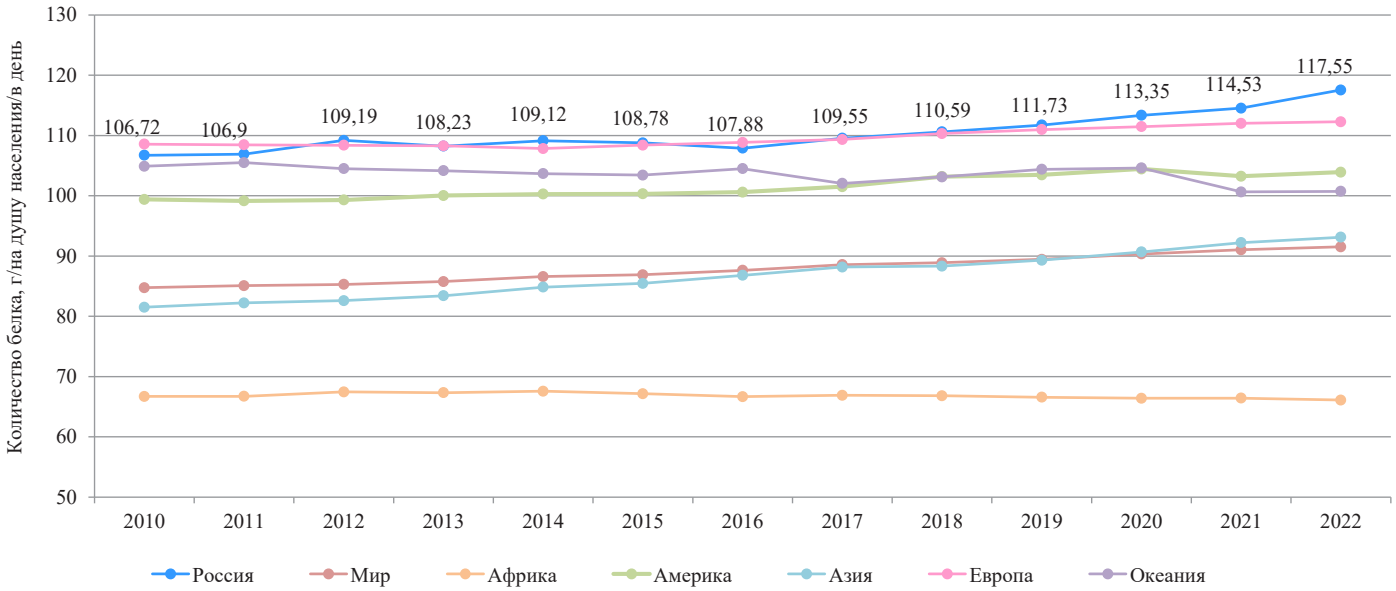


Рисунок 1. **Потребление белка, г/на душу населения/в день**
Figure 1. **Protein consumption, g/capita/day**

Употребление высокобелковой пищи — это путь к здоровому питанию. Ткани и органы нашего организма построены из белков, соответственно, протеины участвуют в росте и развитии организма. Белки поддерживают нашу иммунную систему, а также участвуют в важных реакциях.

Сбалансированное питание определяется калорийностью и составом рациона. Физиологическая потребность в энергии складывается из величины основного обмена (Таблица 2, МР 2.3.1.0253-21[1]) и суточных энергозатрат. Величина основного обмена — это минимальное количество энергии, необходимое для осуществления жизненно важных процессов организма: физиологических, биохимических, функционирования органов и систем. Суточные энергозатраты рассчитываются из суммы затрат энергии на конкретные виды деятельности. Потребность в энергии — это уровень потребляемой с пищей энергии, который обеспечивает энергетический баланс. На потребность в энергии влияют размеры тела, его состав, возраст, а также уровень физической активности.

Исходя из данных величины основного обмена и энергетических затрат закладывают норму физиологической потребности в энергии для взрослых: для мужчин она составляет 2150–3800 ккал/сут, для женщин — 1700–3000 ккал/сут. Для детей до 1 года норма калорийности рациона составляет 110–115 ккал/кг массы тела и 1300–2900 ккал/кг (с увеличением возраста) для детей старше 1 года при адекватном уровне физической активности.

Таблица 2. **Средние величины основного обмена взрослого населения РФ**
Table 2. **Average values of the basal metabolic rate of the adult population of the Russian Federation**

Возраст	Величина основного обмена, ккал/сут	
	мужчины	женщины
18–29	1692–1746	1337–1392
30–44	1615–1684	1269–1338
45–64	1490–1583	1166–1259
65–74	1405–1449	1091–1136
⩾75	1362 и менее	1045 и менее

На Рисунке 2 приведены данные потребления калорий с 2010 по 2022 гг. по миру, континентам и отдельно по России [18].

По калорийности рациона среди всех континентов Африка показывает наименьшие значения — показатели не превышают 2600 ккал/сут на душу населения. Значительный рост потребления калорий за 13 лет произошел в Азии — с 2703 до 2944 ккал/сут. Мировое потребление калорий также показало значительный рост. Однако показатели в Океании на протяжении последних восьми лет снижались, но находились в границах 3100–3200 ккал/сут на душу населения. В Америке, как и в Европе, наблюдается увеличе-

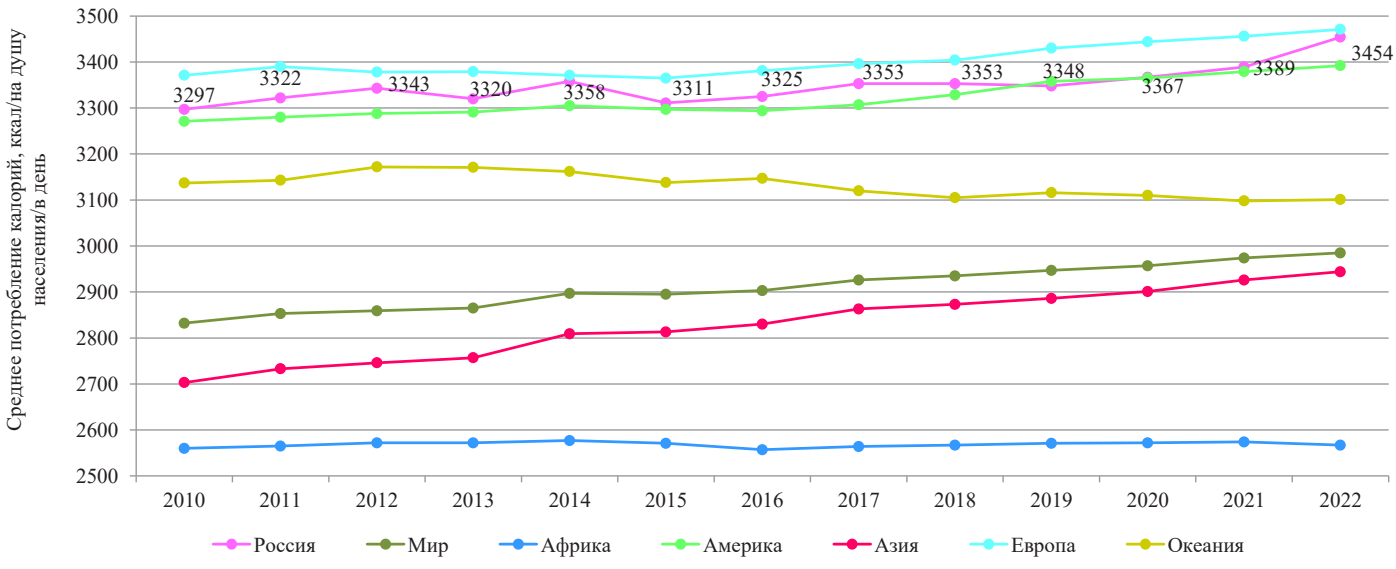


Рисунок 2. **Средняя величина потребления калорий**
Figure 2. **Average calorie consumption**

ние калорийности рациона. В Европе зафиксированы максимальные значения: калорийность за 2022 г. составила 3471 ккал/сут. В России потребление калорий близится к средним показателям Европы. Это достаточно высокие показатели относительно других стран.

Сбалансировать рацион и обогатить питание макро- и микронутриентами могут продукты с высоким содержанием белка, витаминов, пищевых волокон. Такие продукты считаются полезными — именно они обеспечивают организм энергией и «строительными материалами», являясь источниками аминокислот, клетчатки, витаминов, жирных кислот и минералов [19]. В Таблице 3 представлены одни из самых полезных продуктов с описанием питательных свойств и преимуществ при включении в рацион [16].

Из Таблицы 3 можно увидеть, что салаты и овощи питательны за счет высокого содержания клетчатки и витаминов. Рыба богата жирными кислотами и протеинами. Фрукты и ягоды содержат большое количество антиоксидантов и витаминов, красные фрукты и овощи содержат каротиноидные вещества, придающие продуктам соответствующий цвет. Орехи полезны благодаря присутствию в составе минералов, жирных кислот и витаминов. Ферментированные продукты и напитки богаты пробиотиками.

Наиболее калорийными являются масла, которые содержат полезные жиры. Далее идут орехи, калорийность которых обусловлена присутствием полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот. Семена льна, чиа и тыквы также достаточно калорийны. Наименьшей калорийностью обладают растительные продукты: зелень и овощи — сельдерей, огурец, редис, эндивий, кольраби, баклажан, капуста, рукола, цветная капуста, помидоры, радиккио, шпинат, спаржа, квашеная капуста, бок-чой, цуккини. Их низкая калорийность определена высоким содержанием пищевых волокон и воды, а также в состав входит большое количество витаминов и минеральных веществ.

На Рисунке 3 представлена диаграмма содержания белка и пищевых волокон в продуктах питания в граммах на 100 грамм [16].

Наиболее богатыми белком продуктами являются рыба и морепродукты: сардины (22,7), лосось (22,1), моллюски (22,0), тунец (22,0), скумбрия (20,8), а также растительные продукты: бобы эдамаме (18,4), чечевица (17,9), темпе (17,0), фасоль красная (15,3), фасоль черная (15,0), нут (14,5). Греческий йогурт также отличается высоким содержанием белка (17,3).

Чечевица является одним из лидеров по содержанию пищевых волокон (15,6) среди овощей и фруктов. Далее идет черная фасоль (15,0), авокадо (13,5), нут (12,5), гранат (11,3), фасоль красная (11,3), семена чиа (10,6).

Наиболее сбалансированными продуктами по обеим позициям являются растительные продукты: чечевица, черная фасоль, нут, фасоль красная, бобы эдамаме.

Рассматриваемые продукты были проанализированы на содержание витамина С в мг на 100 г продукта. Продуктом с самым высоким содержанием витамина С является красный болгарский перец — в нем находится 190 мг/100 г. Чуть меньше витамина содержится в папайе (168 мг) и помело (115). Витамина С не обнаружено в рыбе, семенах, орехах и некоторых растительных продуктах (Рисунок 4) [16].

Антиоксидантный индекс — мера антиоксидантных свойств продукта; чем выше данный показатель, тем больше антиоксидантов содержится в том или ином продукте. Специи являются продуктами с более высоким антиоксидантным индексом, чем остальные. Например, антиоксидантный индекс корицы составляет 131 420 ед., куркумы — 127 068, кайенского перца — 50 314. У других представленных продуктов антиоксидантный индекс намного ниже (Рисунок 5) [16].

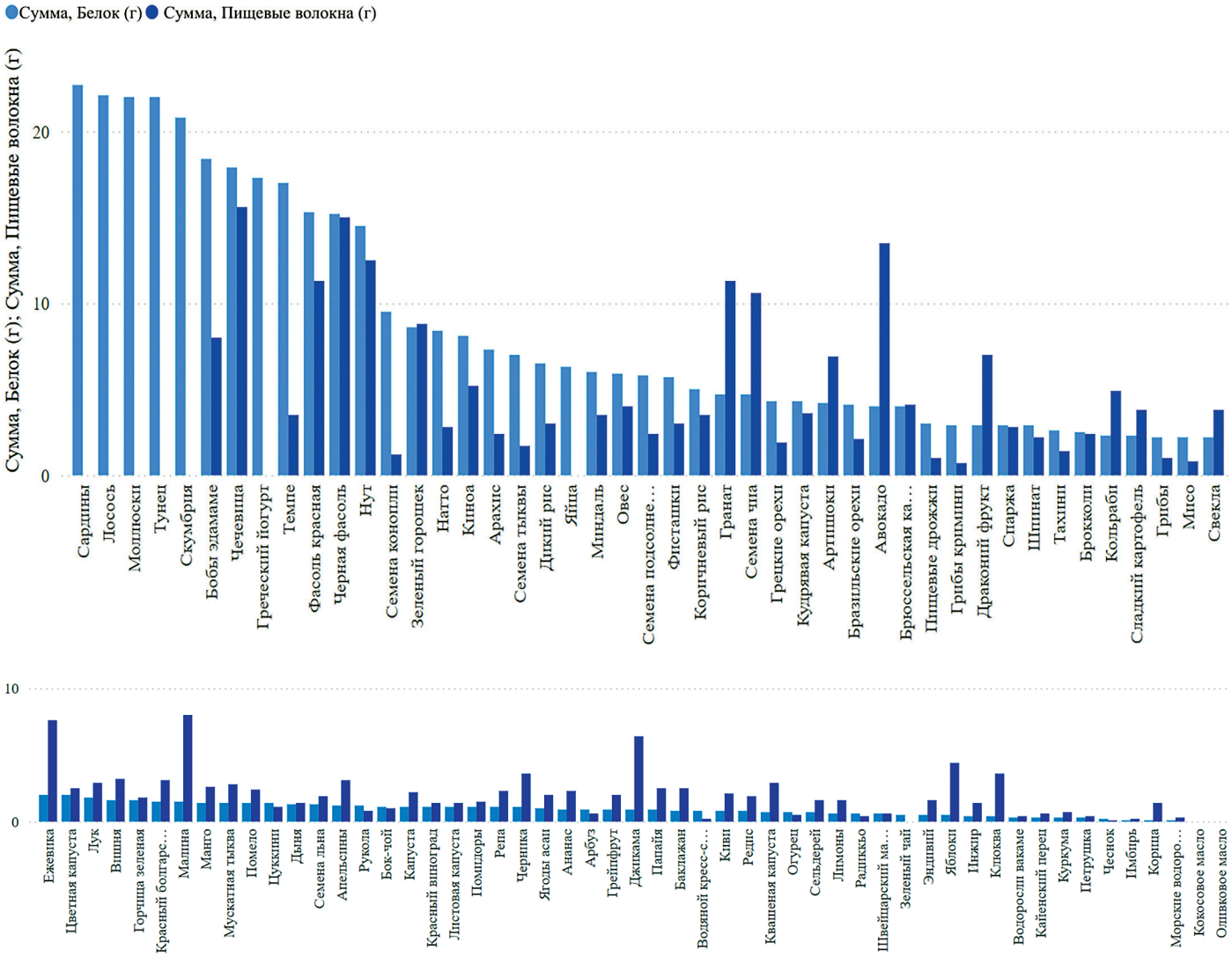


Рисунок 3. **Содержание белка и клетчатки в пищевых продуктах**
Figure 3. **Protein and fiber content in food products**

Таблица 3. **Продукты с основными питательными свойствами и их калорийность**

Table 3. **Products with basic nutritional properties and their caloric content**

Наименование продукта	Основные питательные свойства или преимущества продукта	Энергетическая ценность, ккал/100 г
Оливковое масло	Богато мононенасыщенными жирами	884
Кокосовое масло	Содержит триглицериды средней цепи	862
Бразильские орехи	Высокое содержание селена	656
Грецкие орехи	Хороший источник омега-3	607
Тахини	Хороший источник кальция	595
Семена подсолнечника	Высокое содержание витамина Е	584
Миндаль	Хороший источник витамина Е	576
Семена конопли	Хороший баланс омега-3 и омега-6	572
Арахис	Хороший источник биотина	567
Фисташки	Хороший источник витамина В6	562
Семена льна	Высокое содержание лигнанов	534
Семена чиа	Высокое содержание омега-3 и клетчатки	486
Семена тыквы	Богаты магнием	446
Овес	Богат бета-глюканом	389
Нут	Высокое содержание белка и клетчатки	364
Дикий рис	Высокое содержание белка и клетчатки	357
Черника	Высокое содержание антиоксидантов	341
Фасоль красная	Высокое содержание молибдена	333
Пищевые дрожжи	Хороший источник витаминов группы В	325
Кайенский перец	Содержит капсаицин	318
Куркума	Содержит куркумин	312
Скумбрия	Богата жирными кислотами омега-3	262
Корица	Может помочь снизить уровень сахара в крови	247
Натто	Высокое содержание витамина К2	212
Лосось	Богат жирными кислотами омега-3	205
Мисо	Богат пробиотиками	199
Темпе	Высокое содержание белка и пробиотиков	193
Сардины	Богата омега-3 и витамином D	166
Авокадо	Богат полезными жирами	160
Яйца	Полный источник белка	155
Чеснок	Содержит аллицин	149
Черная фасоль	Высокое содержание клетчатки и белка	132
Тунец	Высокое содержание белка и омега-3	130
Бобы Эдамаме	Хороший источник растительного белка	122
Киноа	Полный источник белка	120
Чечевица	Высокое содержание белка и клетчатки	116
Коричневый рис	Хороший источник марганца	111
Сладкий картофель	Богат бета-каротином	86
Гранат	Богат антиоксидантами	83
Имбирь	Противовоспалительные свойства	80
Моллюски	Высокое содержание витамина В12	77
Инжир свежий	Высокое содержание кальция	74
Зеленый горошек	Хороший источник витамина К	73
Красный виноград	Содержит ресвератрол	67
Ягоды асаи	Высокое содержание антоцианов	62
Киви	Высокое содержание витамина С	61
Манго	Высокое содержание витамина А	60
Греческий йогурт	Высокое содержание белка и пробиотиков	59
Малина	Высокое содержание эллаговой кислоты	53
Яблоко	Богато кверцетином	52
Ананас	Содержит бромелайн	50
Вишня	Содержит мелатонин	50
Кудрявая капуста	Высокое содержание витаминов А, С, К	49
Драконий фрукт	Хороший источник антиоксидантов	48
Апельсин	Богат витамином С	47
Артишок	Высокое содержание клетчатки	47
Клюква	Высокое содержание проантоцианидинов	46
Водоросли Вакаме	Высокое содержание фукоксантина	45
Мускатная тыква	Высокое содержание витамина А	45
Брюссельская капуста	Высокое содержание витамина К	43
Ежевика	Богата антиоксидантами	43
Морские водоросли	Богаты йодом	43
Папайя	Содержит фермент папаин	43
Свекла	Высокое содержание нитратов	43
Грейпфрут	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина С	42
Лук	Содержит кверцетин	40
Джикама	Хороший источник витамина С	38
Помело	Высокое содержание витамина С	38
Петрушка	Высокое содержание витамина К	36
Брокколи	Высокое содержание витаминов С и К	34
Дыня	Высокое содержание витамина А	34
Водяной кресс-салат	Высокое содержание витамина К	32
Листовая капуста	Высокое содержание витамина К	32
Арбуз	Высокое содержание ликопина	30
Лимоны	Высокое содержание витамина С	29
Красный болгарский перец	Высокое содержание витамина С	28
Репа	Низкокалорийная, с высоким содержанием витамина С	28
Горчица зеленая	Высокое содержание витамина К	27
Грибы Кримини	Хороший источник селена	27
Кольраби	Хороший источник витамина С	27
Баклажан	Низкокалорийный, с высоким содержанием клетчатки	25
Капуста	Низкокалорийная, с высоким содержанием витамина К	25
Руккола	Хороший источник нитратов	25
Цветная капуста	Низкокалорийная, высокопитательная	25
Помидоры	Высокое содержание ликопина	24
Радиккио	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина К	23
Шпинат	Высокое содержание железа и фолиевой кислоты	23
Спаржа	Высокое содержание фолиевой кислоты	20
Квашеная капуста	Богата пробиотиками	19
Швейцарский мангольд	Высокое содержание витаминов А и К	19
Цуккини	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина С	17
Эндивий	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина К	17
Редис	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина С	16
Грибы	Хороший источник селена	15
Огурец	Низкое содержание калорий, высокое содержание воды	15
Бок-чой	Высокое содержание витаминов А и С	13
Сельдерей	Низкокалорийный, с высоким содержанием витамина К	13
Зеленый чай	Высокое содержание катехинов	1

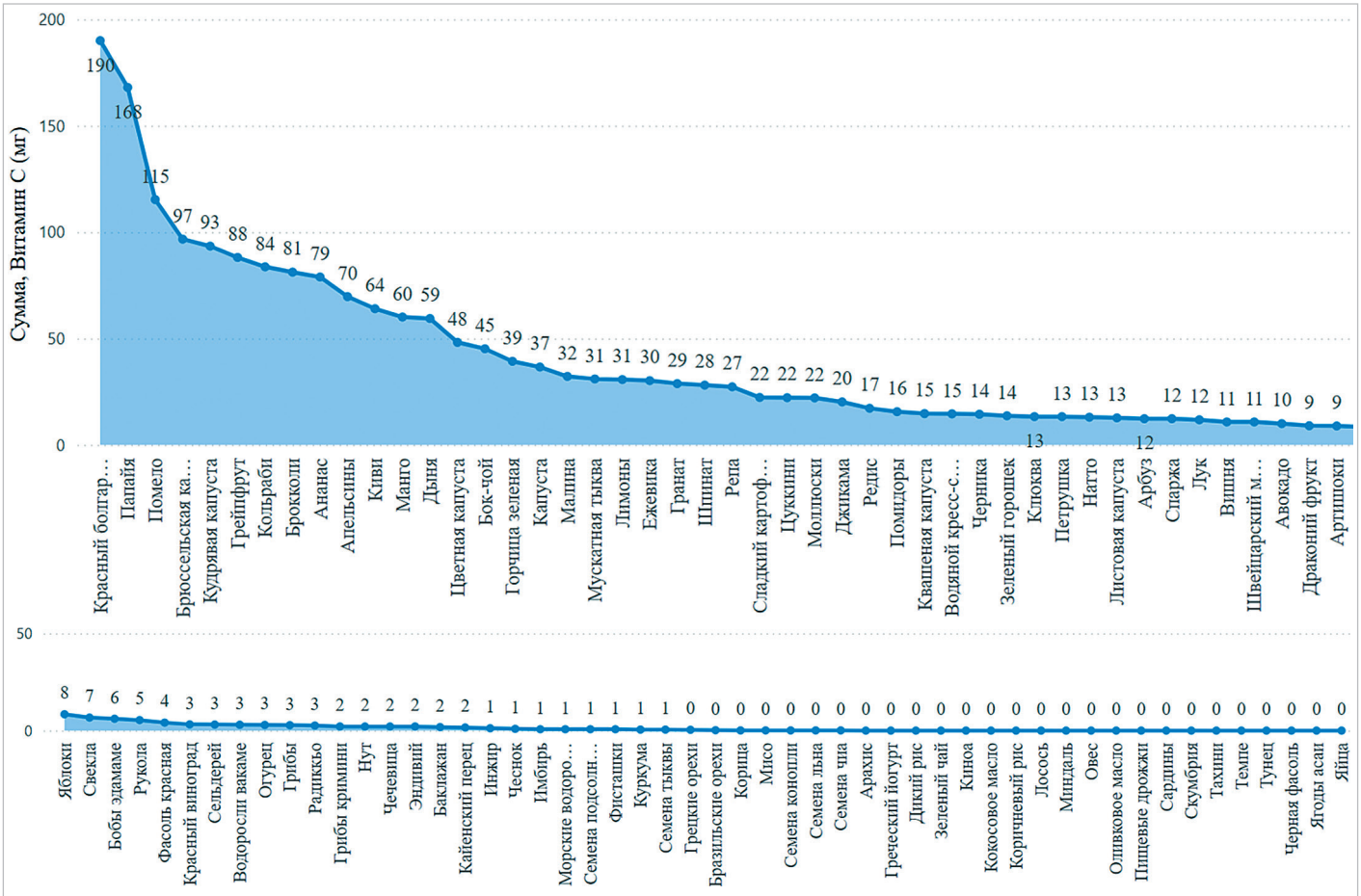


Рисунок 4. **Содержание витамина С в пищевых продуктах**
Figure 4. **Vitamin C content in food products**

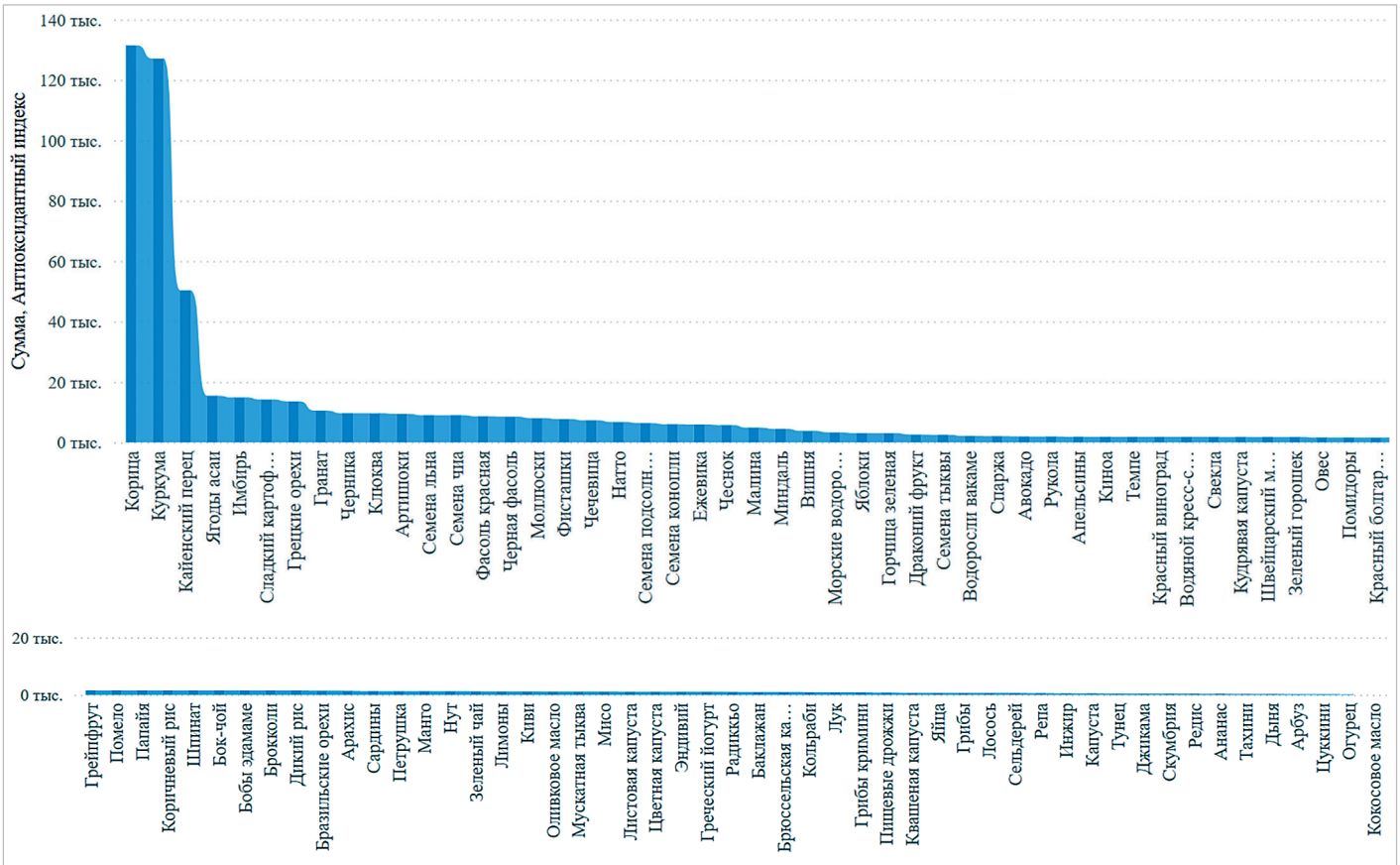


Рисунок 5. **Антиоксидантный индекс продукта**
Figure 5. **Antioxidant index of a product**

На Рисунке 6 изображены регионы, где производят рассматриваемые продукты [16]. Анализируя данные карты, можно увидеть, что Польша является поставщиком кресс-салата, капусты и овса, Беларусь поставляет кольраби, Италия — брокколи, брюссельскую капусту и радиккио, Греция — листовую и кудрявую капусту. В Восточном средиземноморье зародилась спаржа. Турция является поставщиком большого разнообразия фруктов и овощей: регион поставляет вишню, свеклу, сельдерей, эндивий, оливковое масло, руколу, петрушку, мангольд, артишоки, зеленый горошек, красный виноград. Место происхождения цветной капусты — Кипр. В Иране традиционно выращивают дыню, шпинат и грецкие орехи, в Израиле — чеснок, фисташки, семена конопли, лук и яблоки. Саудовская Аравия традиционно поставляет нут, миндаль, гранат, чечевицу, тахини, семена льна. В Африке, в республике Конго выращивают арбузы. Индия поставщик баклажанов, куркумы, огурцов, зеленой горчицы, Шри-Ланка — корицы и инжира. Китай традиционно производит имбирь, апельсины, помело, редис, лимоны, кокосовое масло, киви, бок-чой, зеленый чай и квашеную капусту. Индонезия поставляет темпе, Япония — морские водоросли, мисо, натто, водоросли Вакаме. Канада — регион, поставляющий дикий рис, семена тыквы, семена подсолнечника, чернику, мускатную тыкву, клюкву; Соединенные Штаты Америки — драконий фрукт, красный болгарский перец и сладкий картофель; Мексика — сладкую репу джикаму. В Доминиканской республике выращивают грейпфрут, в Никарагуа — фасоль красную, авокадо, цуккини, семена чиа, папайю. Лосось добывают в северной части Тихого океана.

Рацион коренного населения отдельно взятого региона устроен согласно исторически сложившимся условиям обитания и климату. А также рацион способен меняться под воздействием многих социально-экономических факторов. Например, Африка является родиной листовой зелени, корнеплодов, клубневых овощей и бобов, а также многих различных культур растений по всей ее территории. Поэтому в рационе преобладает растительная пища — это листовая зелень, овощи и фрукты, орехи и семена, цельные зерна и макароны, фасоль и горох, полезные масла и батат. Мясо и другие продукты животного происхождения обычно используются в качестве приправы или употребляются в пищу в особых случаях. Такой способ питания позволил африканскому населению избежать хронических заболеваний, таких как диабет, болезни сердца, болезни почек и различные виды рака. Согласно Рисункам 1 и 2, можно увидеть взаимосвязь пищевого рациона с количеством потребляемого белка и калорийностью. Исключение мяса из рациона свидетельствует о низких показателях потребления белка на душу населения в сравнении с остальными регионами. Однако калорийность рациона также находится на низком уровне, что говорит о приеме низкокалорийной растительной пищи и о минимальном потреблении жиров и простых углеводов. Рацион и образ жизни африканского народа обуславливает их телосложение, силу и выносливость [20].

Традиционный рацион Азии включает цельнозерновые продукты, листовые овощи, соевые бобы, немного рыбы и мяса, а также разнообразные специи, травы, соевое и арахисовое масла. Большинство традиционных азиатских диет подразумевают употребление овощей, риса, лапши, тофу, эдамаме, разнообразных специй, а также рыбы и морепродуктов в прибрежных районах. Мясо потребляется небольшими порциями за один прием пищи — ровно столько, сколько нужно для повышения уровня белка. Рыба и морепродукты употребляются чаще, чем мясо. Согласно данным о потреблении белка, в Азии этот показатель почти равен среднемировому, однако уступает Северной Америке, Европе и Океании. Это может быть связано с меньшим потреблением мяса, чем на других континентах. Среднее потребление калорий напрямую зависит от рациона азиатского населения. Низкое потребление жирной пищи и быстрых углеводов позволяет держать калорийность азиатского рациона на достаточно низких показателях, в среднем ниже, чем по миру [21].

В Америке большая часть продуктов в рационе перегружена калориями, насыщенными жирами, сахаром, натрием и др., что является причиной развития многих хронических заболеваний, таких как диабет и сердечно-сосудистые заболевания. К сожалению, большинство американцев не придерживаются здорового питания. Типичный американский рацион подразумевает недостаточное потребление фруктов и овощей, употребление очищенных зерен вместо цельнозерновых, жирных источников белка (жареная курица, бекон и колбаса), напитков с высоким содержанием сахара (газированные напитки, латте и т. д.) вместо воды [22]. Примерами типичных продуктов в рационе американского населения являются картофель фри, гамбургеры, хот-доги, пицца, мороженое, картофельные чипсы и полуфабрикаты, газированные, кофейные, энергетические напитки, фруктовые коктейли [23]. Однако рацион латиноамериканцев отличается от среднего в США: основными продуктами питания, потребляемыми ежедневно, являются продукты растительного происхождения; по всей Латинской Америке ежедневно употребляют в пищу свежую и соленую рыбу; яйца потребляются еженедельно, как птица и свинина; растительные масла (кукурузное, оливковое и арахисовое) используются для приготовления пищи и заправки блюд; сладости, приготовленные с добавлением меда или сахара, употребляются еженедельно в небольших количествах; красное мясо присутствует в рационе редко [24]. Основываясь на информа-

Рисунок 6. **Географическое происхождение продуктов**
Figure 6. **Geographical origin of products**

ции об американском рационе и опираясь на показатели количества потребляемого белка и калорий (Рисунок 1 и 2), можно определить, что употребление жирной пищи и сахара приводит к увеличению калорийности рациона с возможным приобретением хронических заболеваний.

Средиземноморский рацион — это модель питания людей, живущих вокруг Средиземного моря. Средиземноморье объединяет в себе страны трех континентов — Европы, Азии и Африки, а также многочисленные острова и архипелаги [25]. Основу средиземноморского рациона составляют продукты растительного происхождения: овощи и зелень, бобы, цельные зерна, фрукты, орехи, травы и специи, а также полезные жиры, такие как оливковое масло. Из белковой пищи в рацион включают рыбу и морепродукты, по крайней мере, два раза в неделю, а также небольшое количество молочных продуктов (в основном йогурт и сыр) и птицу, иногда красное мясо. Также в средиземноморском рационе в ограниченных количествах употребляются сахаросодержащие продукты [26]. За счет частого употребления рыбы, морепродуктов и молочных продуктов в рационе населения Европы наблюдаются самые высокие относительно других регионов показатели приема белка на душу населения [27]. Среднее потребление калорий в Европе также выше относительно других регионов, что обусловлено широким разнообразием рациона.

Таким образом, рацион населения имеет прямую взаимосвязь с данными по потреблению белка и калорий на континентах. Сбалансированный рацион обеспечивает население суточной нормой белка и калорий, а также остальными питательными веществами, необходимыми для организма.

4. Выводы

На рацион влияет ряд факторов, включая экономические возможности страны, конкретной семьи или человека; социальные — это индивидуальные предпочтения, убеждения и культурные традиции; географические и экологические, обусловленные регионом обитания и происхождением населения, сложившимся климатом в регионе. Рацион определяет показатели потребления белков, жиров, углеводов и энергетической ценности. Согласно данным Росстата и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций за последние 10 лет количество потребляемого белка населением Африки зафиксировано на самом низком уровне [в мире], что обусловлено невысоким потреблением мясной и молочной продукции. Рацион с преобладанием зелени, фруктов и овощей обеспечивает низкую калорийность питания. В странах Азии показатели потребления калорий и белка находятся на уровне средних общемировых показателей. В Америке, Океании и Европе показатели потребления белка выше мирового уровня: рацион населения данных регионов включает преимущественно натуральные продукты. В работе представлены наиболее полезные продукты питания с высоким содержанием белка, пищевых волокон и с антиоксидантным индексом. Их можно включать в рацион, чтобы повысить содержание в организме питательных веществ. Важно понимать, что именно питание обеспечивает процессы роста и развития человека, его физическую и умственную активность, настроение и качество жизни. Рацион человека должен соответствовать возрасту, полу, образу жизни, общему состоянию здоровья и климатогеографическим условиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S. et al. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31788-4
2. Song, X.-P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F. et al. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720), 639–643. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9
3. Korovin, V., Zernov, A., Boysen-Urban, K., Brockmeier, M., Boysen, O. (2020). The impact of global development pathways on food security and diet quality: Results of a global economic model. Chapter in a book: World Review of Nutrition and Dietetics. Karger, 2020. https://doi.org/10.1159/000507523
4. Popkin, B. M., Ng, S. W. (2021). The nutrition transition to a stage of high obesity and noncommunicable disease prevalence dominated by ultra-processed foods is not inevitable. *Obesity Reviews,* 23(1), Article e13366. https://doi.org/10.1111/obr.13366
5. Fang, T., Cao, H., Wang, Y., Gong, Y., Wang, Z. (2023). Global scientific trends on healthy eating from 2002 to 2021: A bibliometric and visualized analysis. *Nutrients*, 15(6), Article 1461. https://doi.org/10.3390/nu15061461
6. Popkin, B. M., Barquera, S., Corvalan, C., Hofman, K. J., Monteiro, C., Ng, S. W. et al. (2021). Towards unified and impactful policies to reduce ultra-processed food consumption and promote healthier eating. *The Lancet Diabetes and Endocrinology,* 9(7), 462–470. https://doi.org/10.1016/s2213-8587(21)00078-4
7. Lane, M. M., Davis, J. A., Beattie, S., Gómez-Donoso, C., Loughman, A., O'Neil, A. et al. (2020). Ultraprocessed food and chronic noncommunicable diseases: A systematic review and meta-analysis of 43 observational studies. *Obesity Reviews*, 22(3), Article e13146. https://doi.org/10.1111/obr.13146
8. Асякина, Л. К., Степанова, А. А., Тамарзина, Т. В., Лосева, А. И., Величкович, Н. С. (2022). Российский рынок функциональных продуктов питания для здорового образа жизни человека. *Социально-экономический и гуманитарный журнал,* 3(25), 29–41. [Asyakina, L. K., Stepanova, A. A., Tamarzina, T. V., Loseva, A. I. Velichkovich, N. S. (2022). Functional food Russian market for a healthy lifestyle. *Socio-economic and Humanitarian Magazine*, 3(25), 29–41. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-3-29-41
9. Essa, M. M., Bishir, M., Bhat, A., Chidambaram, S. B., Al-Balushi, B., Hamdan, H. et al. (2021). Functional foods and their impact on health. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3), 820–834. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05193-3
10. Снегирева, Н. В. (2021). Основные направления создания технологий производства функциональных продуктов питания. *Мир Инноваций*, 4, 18–21. [Snegireva, N. V. (2021). The main directions of creating technologies for the production of functional food products. *World of Innovation*, 4, 18–21. (In Russian)]
11. Карх, Д. А., Аббазова, В. Н. (2023). Исследование пищевого рациона населения как предпосылка для разработки продуктов питания функционального назначения. *Дневник науки,* 12(84), статья 106. [Karkh, D. A., Abbazova, V. N. (2023). Research of the population's diet as a prerequisite for the development of functional food products. *Science Diary*, 12(84), Article 106. (In Russian)]
12. Temple, N. J. (2022). A rational definition for functional foods: A perspective. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 957516. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.957516
13. Ghazanfar, S., Ali, G. M., Abid, R., Farid, A., Akhtar, N., Batool, N. A. et al. (2022). An overview of functional food. Chapter in a book: Current Topics in Functional Food. IntechOpen, 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.103978
14. Ловкис, З., Моргунова, Е. (2019). Функциональные продукты питания. *Наука и инновации*, 12(202), 13–17. [Lovkis, Z., Morgunova, E. (2019). Functional products as a special food industrial area. *Science and Innovation*, 12(202), 13–17. (In Russian)]
15. Damián, M. R., Cortes-Perez, N. G., Quintana, E. T., Ortiz-Moreno, A., Noguez, C. G., Cruceno-Casarrubias, C. E. et al. (2022). Functional foods, nutraceuticals and probiotics: A focus on human health. *Microorganisms*, 10(5), Article 1065. https://doi.org/10.3390/microorganisms10051065
16. Kaggle. 100 Healthiest Foods: Nutrition and Origin dataset. Retrieved from https://www.kaggle.com/datasets/prajwaldongre/top-100-healthiest-food-in-the-world/data. Accessed January 9, 2025.
17. Федеральная служба государственной статистики. Потребление основных продуктов питания населением Российской Федерации. Электронный ресурс: https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy. Дата доступа: 9 января 2025. [Federal State Statistics Service. Consumption of Basic Food Products by the Population of the Russian Federation. Retrieved from https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy. Accessed January 9, 2025. (In Russian)]
18. FAOSTAT. Suite of Food Security Indicators. Retrieved from https://www.fao.org/faostat/ru/#data/FS. Accessed January 9, 2025.
19. Kazaz, S., Miray, R., Lepiniec, L., Baud, S. (2021). Plant monounsaturated fatty acids: Diversity, biosynthesis, functions and uses. *Progress in Lipid Research*, 85, Article 101138. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2021.101138
20. Мищенко, Д. Ф. (2013). Современные тенденции в эволюции пищевых практик народов Западной Африки. *Антропологический форум*, S18, 313–324. [Mishchenko, D. F. (2013). Modern trends in the evolution of food practices among West African peoples. *Forum for Anthropology and Culture*, S18, 313–324. (In Russian)]
21. Швабская, О. Б., Карамнова, Н. С., Измайлова, О. В., Драпкина, О. М. (2022). Здоровые рационы в популяционных пищевых моделях как компонент профилактики сердечно-сосудистых заболеваний: японская диета и рацион Окинавы. *Рациональная фармакотерапия в кардиологии*, 18(6), 692–702. [Shvabskaya, O. B., Karamnova, N. S., Izmailova, O. V., Drapkina, O. M. (2022). Healthy eating in population models of nutrition: Asian diet style summary. *Rational Pharmacotherapy in Cardiology*, 18(6), 692–702. (In Russian)] https://doi.org/10.20996/1819-6446-2022-12-08
22. Lee, S. H., Zhao, L., Park, S., Moore, L. V., Hamner, H. C., Galuska, D. A. et al. (2023). High added sugars intake among US adults: Characteristics, eating occasions, and top sources, 2015–2018. *Nutrients,* 15(2), Article 265. https://doi.org/10.3390/nu15020265
23. Frank, S. M., Taillie, L. S., Jaacks, L. M. (2022). How Americans eat red and processed meat: An analysis of the contribution of thirteen different food groups. *Public Health Nutrition*, 25(5), 1406–1415. https://doi.org/10.1017/s1368980022000416
24. Бедаева, А. Р., Хализова, У. С. (2022). Особенности питания стран и их взаимосвязь с алиментарными заболеваниями. *Международный студенческий научный вестник*, 6, статья 4. [Bedaeva, A., Khalizova, U. (2022). Nutritional features of countries and their relation with alimentary diseases. *European Student Scientific Journal,* 6, Article 4. (In Russian)] https://doi.org/10.17513/msnv.21008
25. Medina, F.-X. (2021). Looking for commensality: On culture, health, heritage, and the Mediterranean diet. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), Article 2605. https://doi.org/10.3390/ijerph18052605
26. Dernini, S., Berry, E., Serra-Majem, L., La Vecchia, C., Capone, R., Medina, F. et al. (2016). Med Diet 4.0: The Mediterranean diet with four sustainable benefits. *Public Health Nutrition*, 20(7), 1322–1330. https://doi.org/10.1017/s1368980016003177
27. Yang, Q., Sun, Y. (2024). Dietary patterns, food intake and health: New evidence from epidemiological and genetic studies. *Nutrients*, 16(7), Article 919. https://doi.org/10.3390/nu16070919

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Степанова Анна Александровна — аспирант, младший научный сотрудник, Лаборатория биотестирования природных нутрицевтиков НИУ, Кемеровский государственный университет 650056, Кемерово, бульвар Строителей, 47 Тел.: +7–902–983–30–24 E-mail: annstepanova.04@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7774-8859	**Ann A. Stepanova**, Postgraduate, Junior Researcher, Laboratory for Biotesting of Natural Nutraceuticals National Research University, Kemerovo State University 47, Stroiteley Blvd., 650056, Kemerovo, Russia Tel.: +7–902–983–30–24 E-mail: annstepanova.04@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7774-8859
Асякина Людмила Константиновна — доктор технических наук, заведующий лабораторией фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем НИУ, Кемеровский государственный университет 650056, Кемерово, бульвар Строителей, 47 Тел.: +7–950–599–37–79 E-mail: alk_kem@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4988-8197	**Lyudmila K. Asyakina**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed Ecosystems of the National Research University, Kemerovo State University 47, Stroiteley Blvd., 650056, Kemerovo, Russia Tel.: +7–950–599–37–79 E-mail: alk_kem@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4988-8197
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-189-195

Поступила 11.01.2025
Поступила после рецензирования 22.04.2025
Принята в печать 29.04. 2025
© Крюк Т. В., Тюрина Т. Г., Попова О. С., Романенко Н. А., Гончарук Г. П., Труш Е. Н., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИСАХАРИДОВ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО УПАКОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Крюк Т. В.[1]*, Тюрина Т. Г.[1], Попова О. С.[1,2], Романенко Н. А.[1], Гончарук Г. П.[3], Труш Е. Н.[1]

[1] Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко, Донецк, Россия
[2] Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, Россия
[3] Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова Российской академии наук, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
крахмал, карбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт, упаковочные материалы, методология поверхности отклика

АННОТАЦИЯ

Создание биоразлагаемой пищевой упаковки на основе возобновляемого природного сырья является одним из ключевых направлений современных исследований во всем мире. На основе кукурузного крахмала и натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы возможно получение пленочных материалов для упаковки пищевых продуктов при условии дополнения полимерной композиции небольшими количествами поливинилового спирта (ПВС), лимонной кислоты (ЛК) и глицерина (Гл). В работе представлены результаты оптимизации состава такой композиции с использованием методологии поверхности отклика. Проведена оценка влияния независимых переменных (концентрация ПВС: 7, 10 и 15,5; концентрация ЛК: 5, 7 и 9; концентрация Гл: 20, 25 и 50% по отношению к массе полисахаридов) на переменные отклика (степень набухания, доля геля, проницаемость для водяного пара, прочность на разрыв, относительное удлинение при разрыве и модуль Юнга). Образец оптимизированного состава (15,5 мас. % ПВС, 7 мас. % ЛК, 37,5 мас. % Гл) обладает высокими барьерными и прочностными свойствами. Теоретические расчеты, основанные на регрессионной модели, показали высокую корреляцию с экспериментальными данными. Показано, что включение в полимерную матрицу дополнительных компонентов, таких как антиоксиданты и армирующие вещества, позволит улучшить эксплуатационные характеристики пленочных материалов и расширить их функциональность.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения НИР по государственному заданию (шифр FRES-2024-0001) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Received 11.01.2025
Accepted in revised 22.04.2025
Accepted for publication 29.04.2025
© Kryuk T. V., Tyurina T. G., Popova O. S., Romanenko N. A., Goncharuk G. P., Trush E. N., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF POLYSACCHARIDE-BASED COMPOSITE FILMS AS A POTENTIAL FOOD PACKAGING MATERIAL

Tatiana V. Kryuk[1]*, Tatiana G. Tyurina[1], Oksana S. Popova[1,2], Natalia A. Romanenko[1], Galina P. Goncharuk[3], Eugene N. Trush[1]

[1] L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Russia
[2] Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Russia
[3] Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Moscow, Russia

KEY WORDS:
starch, carboxymethyl cellulose, polyvinyl alcohol, packaging materials, response surface methodology

ABSTRACT

The development of biodegradable food packaging based on renewable natural raw materials is one of the key trends of modern research worldwide. It is possible to obtain film materials for food packaging on the basis of corn starch and sodium carboxymethyl cellulose provided that small amounts of polyvinyl alcohol (PVA), citric acid (CA) and glycerol (Gl) are added to the polymer composition. The paper presents the results of the composition optimization of such films using the response surface methodology. The influence of independent variables (PVA concentration: 7, 10 and 15.5; CA concentration: 5, 7 and 9; Gl concentration: 20, 25 and 50% in relation to the polysaccharides weight) on the response variables (swelling degree, gel fraction, water vapor transmission rate, tensile strength, elongation at break and Young's modulus) is evaluated. The sample of the optimized composition (15.5 wt. % PVA, 7 wt. % CA and 37.5 wt. % GL) has good barrier and strength properties. Theoretical calculations based on the regression model demonstrated a high correlation with the experimental data. It is shown that the inclusion to the polymer matrix of additional components (antioxidants, reinforcing agents) will improve the operational characteristics of film materials and expand their functionality.

FUNDING: The article was prepared as part of research on the state task of Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FRES-2024-0001.

1. Введение

Упаковочные материалы (УМ) являются основой, из которой изготавливается упаковка для товаров (сырья и готовой продукции). В настоящее время для производства УМ для пищевых продуктов в основном используются синтетические пластики [1,2], которые не разлагаются и сохраняются в окружающей среде несоизмеримо дольше сроков применения упаковки, для которой эти материалы были разработаны [3]. Растущее внимание к экологичности и ужесточение правил обращения с твердыми бытовыми отходами направляют научные исследования в сторону поиска новых упаковочных материалов. В качестве сырья для таких УМ рассматриваются возобновляемые природные источники и продукты их переработки, в частности, полисахариды — крахмал (Кр), хитозан, камеди, агар, каррагинан, производные целлюлозы [4]. Эти биоразлагаемые полимеры безопасны, они могут напрямую контактировать с пищевыми продуктами и даже быть съедобными [5].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Крюк, Т. В., Тюрина, Т. Г., Попова, О. С., Романенко, Н. А., Гончарук, Г. П., Труш, Е. Н.** (2025). Оптимизация состава композитных пленок на основе полисахаридов как потенциального упаковочного материала для пищевых продуктов. *Пищевые системы*, 8(2), 189–195. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-189-195

FOR CITATION: **Kryuk, T. V., Tyurina, T. G., Popova, O. S., Romanenko, N. A., Goncharuk, G. P., Trush, E. N.** (2025). Optimization of the composition of polysaccharide-based composite films as a potential food packaging material. *Food Systems,* 8(2), 189–195. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-189-195

Упаковочные материалы из полисахаридов демонстрируют эффективную барьерную функцию в отношении проникновения кислорода и ароматических веществ, однако в большинстве случаев они теряют свои свойства в условиях высокой влажности и обладают низким уровнем механических свойств [6]. По этой причине в настоящее время основным направлением при разработках новых биоразлагаемых УМ является интеграция полимеров, обладающих различными свойствами, для компенсации ограничений, присущих каждому из них по отдельности. Заметно улучшить физико-химические свойства полисахаридов позволяет их комбинация с другими биополимерами и/или синтетическими полимерами.

Из синтетических биоразлагаемых полимеров следует выделить поливиниловый спирт (ПВС). Благодаря высоким барьерным свойствам по отношению к воде и газам, легкой доступности, нетоксичности, исключительной пленкообразующей способности, химической и механической стойкости, ПВС обладает огромным потенциалом в сохранении пищевых продуктов [7,8]. Гидрофильная природа этого полимера позволяет ему легко смешиваться с полисахаридами посредством межмолекулярной водородной связи [9]. Улучшение характеристик пленочных материалов, полученных на основе ПВС и различных полисахаридов, отмечается в многочисленных исследованиях, например, [10–13]. Было обнаружено, что прочность на разрыв (σ_p) и относительное удлинение при разрыве (ε_p) пленок картофельного крахмала значительно возрастают по мере увеличения в композите доли ПВС, в то время как паропроницаемость (ПП) снижается [14]. При добавлении поливинилового спирта к камеди тары увеличиваются прочность на разрыв и краевой угол смачивания, улучшаются барьерные свойства. При увеличении доли ПВС в композите камедь/ПВС с 90/10 до 70/30 мас./мас. наблюдались следующие изменения: прочность на разрыв возросла с 20,71 до 44,74 МПа, угол смачивания увеличился с 55,95 до 90,0°, паропроницаемость и кислородопроницаемость снизились примерно в 2 раза [15].

При этом свойства материала определяет не только состав полимерной матрицы, но и наличие в ней вспомогательных компонентов (пластификаторов, сшивающих агентов, антиоксидантов, пр.), а также их количество. Таким образом, формула пленкообразующего раствора должна быть тщательно оптимизирована для достижения желаемых свойств конечного образца. Прийти к этому возможно путем применения хемометрических инструментов, которые формируют заданные характеристики материала, одновременно сокращая количество экспериментов, реагентов, времени и энергии [16].

Наиболее распространенным подходом, основанным на использовании математических и статистических методов при проектировании новых материалов, является методология поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) вследствие ее простоты и высокой точности предсказания направления движения к оптимуму [17]. Процедура оптимизации экспериментального дизайна с использованием RSM состоит из следующих шагов [18]:

1. Определение факторов (независимых переменных) и желаемых откликов.
2. Выбор подходящего дизайна (модели) проектирования для соответствия поверхностям отклика.
3. Подтверждение подобранного дизайна.
4. Определение оптимального набора факторов.

Если отклик хорошо выражен линейной моделью независимых переменных, то используется уравнение регрессии 1-го или 2-го порядка. Хотя полиномиальная функция не может быть подходящим приближением для всех пространств факторов, для относительно небольшой области она обычно работает сравнительно хорошо [19]. Для проверки предсказательной способности подобранного дизайна перед финальным прогнозированием чаще всего используется дисперсионный анализ (ANOVA). С его помощью подтверждается, что математическая модель обеспечивает адекватное приближение фактического поведения отклика.

RSM сегодня достаточно широко применяется для разработки пленок на основе одного или нескольких полисахаридов с различными добавками. Такой подход позволяет прогнозировать показатели пленочных материалов, их изменения при варьировании состава композиции и изучать эффекты взаимодействия параметров процесса получения образцов. Для таких приложений в абсолютном большинстве случаев используют дизайн Бокса-Бенкена, согласно которому каждая независимая переменная принимает одно из трех равноотстоящих значений, обычно кодируемых как –1, 0, +1. Авторы [20] применили модель оптимизации для хитозановой пленки с экстрактом волокнистой древесины каштана посевного. Модель позволила минимизировать влагосодержание и удлинение при разрыве, а также максимизировать прочность на растяжение и содержание полифенолов. Материал с содержанием полисахарида (1,93 мас. %), фитоэкстракта (0,97 мас. %) и глицерина (Гл, 30,0 мас. %) характеризуется стабильными физико-механическими свойствами (содержание влаги 17,0 %, σ_p 16,7 МПа, ε_p 10,4 %, общее содержание фенолов 19,4 мг/г образца). Статистическая проверка концепции показала достаточную точность с максимальной абсолютной остаточной погрешностью до 22,2 %.

С помощью RSM оптимизировали также состав и условия получения крахмальных пленочных материалов, целевым назначением которых является упаковка пищевых продуктов. Расчеты, основанные на дизайне Бокса-Бенкена, проведены для пленок ацетилированного крахмала из фиолетового батата [21], крахмала маниоки [22], саго [23], кукурузного крахмала [24], высокоамилозного рисового крахмала [25], крахмала из косточек авокадо [26] и др. Следует отметить, что в абсолютном большинстве случаев выбирается соотношение компонентов пленкообразующего раствора, которое обеспечивает пленочным материалам определенный набор потребительских свойств. Как правило, исследователи стремятся достигнуть баланса между низкими показателями растворимости в воде и проницаемости для водяных паров, высокими прочностью, гибкостью и растяжением.

Нами ранее показано [27], что на основе композита, включающего кукурузный крахмал, натриевую соль КМЦ и ПВС, возможно получение пленочных материалов, обладающих приемлемым для УМ набором сорбционных, барьерных и механических параметров при определенном количественном составе пленкообразующей композиции. Так, при соотношении Кр: КМЦ 80:20 мас./мас. добавление 10–15,5 % ПВС 30–40 % глицерина (пластификатор) и 5–9 % лимонной кислоты (ЛК, сшивающий агент) относительно массы полисахаридов обеспечивает снижение набухания, паропроницаемости, повышает долю геля, прочность и удлинение образцов.

Целью данного исследования являлся выбор оптимального состава композиции, включающей кукурузный крахмал, КМЦ, ПВС, Гл и ЛК, для получения пленочных материалов с набором эксплуатационных свойств заданного уровня с использованием методологии поверхности отклика.

2. Объекты и методы

Для исследования использовали: кукурузный крахмал («ПромАгроПак», Россия) в соответствии с ГОСТ 32159-2013[1], натрий карбоксиметилцеллюлозу, Е466 (USK Chemical, Турция), поливиниловый спирт, марка 11/2, ГОСТ 10779-78[2] («Невинномысский Азот», Россия), лимонную кислоту, х. ч. («Цитробел», Россия), глицерин, ч. д. а. («Компонент-реактив», Россия). На всех этапах экспериментов использовалась дистиллированная вода.

Соотношение крахмал: КМЦ для всех образцов составляло 80:20 мас. %. Образцы получали следующим образом. Крахмал (1,2 г) предварительно подвергали желатинизации в 50 мл воды при температуре 95 °С в течение 40 минут при постоянном перемешивании. Растворы КМЦ и ПВС готовили путем растворения в 50 мл горячей воды 0,3 г и 5 г соответственно каждого полимера. Соединяли растворы крахмала и КМЦ, вносили пластификатор (Гл), сшивающий агент (ЛК), раствор ПВС, перемешивали (50 °С, 0,5 ч), охлаждали до комнатной температуры. Затем полученный пленкообразующий раствор выдерживали в течение суток для деаэрации, разливали на полистирольные чашки Петри (толщина слоя раствора 6 мм) и высушивали в дегидраторе FDW-08 (Libhof, Словакия) при температуре 40 °С в течение 24 ч. Количество Гл, ЛК и раствора ПВС определялось процентным содержанием компонента по отношению к массе смеси крахмал/КМЦ. Полученные пленки имели толщину 0,10 ± 0,02 мм, были гладкими, ровными и прозрачными.

По описанной методике также получали пленки большего объема, максимальный размер составлял 25 × 25 см. Образцы большого и маленького размера имели одинаковые свойства.

Гравиметрическим методом определяли значения степени набухания (СН), массовой доли геля (ДГ) [28], ПП[3]. Механические характеристики — σ_p, ε_p, модуль Юнга (E_0) образцов (ширина 3 мм, длина рабочей части 35 мм) измеряли при 25 °С на разрывной машине Autograph AGS-H (Shimadzu, Япония); скорость растяжения составляла 5 мм/мин.

[1] ГОСТ 32159-2013 «Крахмал кукурузный. Общие технические условия». — М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

[2] ГОСТ 10779-78 «Спирт поливиниловый. Технические условия». — М.: Издательство стандартов, 1987. — 24 с.

[3] ASTM E96/E96M-23 «Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials» West Conshohocken: ASTM, 2023. — 6 p.

Оптимизацию состава пленкообразующей композиции проводили с помощью методологии поверхности отклика, модель Бокса-Бенкена. Все экспериментальные результаты были адаптированы к полиномиальной модели второго порядка:

$$Y = Y_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i X_i + \sum_{i,j=1}^{k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^{k} c_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

где Y — прогнозируемый результат (переменная отклика); X — независимая переменная; Y_0 — константа; k — количество независимых переменных; a_i, b_{ij}, c_{ii} — линейные, билинейные и квадратичные коэффициенты модели для каждой прогнозируемой переменной соответственно.

Пригодность модели оценивали с помощью расчета One-Way ANOVA, который проводили на уровне значимости $p = 0{,}05$. Адекватность оценки пригодности полиномиальной модели оценивали по значениям F-критерия Фишера и коэффициента детерминации (R^2). Для математических и статистических расчетов использовали программный пакет Statgraphics (ver. Centurion 18, Statgraphics Technologies Inc., США). Взаимодействие между переменными процесса и ответами анализировали также графически путем построения соответствующих трехмерных графиков в рамках методологии поверхности отклика.

3. Результаты и обсуждение

Для проведения оптимизации состава пленочных образцов нами была использована модель с тремя независимыми переменными: X_1 — 7, 10 или 15,5 мас. % ПВС, X_2 — 25, 37,5 или 50 мас. % Гл, X_3 — 5, 7 или 9 мас. % ЛК; а также с шестью переменными отклика: СН (%), ДГ (%), ПП (г/(м^2·сут)), σ_p (МПа), ε_p (%), E_0 (МПа).

Используемые уровни независимых переменных в соответствии с моделью Бокса-Бенкена были выбраны на основе предварительных экспериментов и технических ограничений исследования. Факторный план включал 17 экспериментов: двенадцать точек данных (экстремумов) на уровнях (−1) и (+1) и третий набор, состоящий из пяти повторений точек в начале координат (центральные точки), закодированных как (0). Все анализы проводились в случайном порядке (Таблица 1). Порядок рандомизации серий был использован для минимизации воздействия неконтролируемых факторов, аналогично предложенному авторами [29]. Все составы были проверены в трех повторах. Экспериментальные данные для выбранной модели представлены в Таблице 2.

Анализ литературных данных показал, что для полисахаридных пищевых пленок отсутствуют нормы количественных характеристик физико-химических и механических свойств. При выборе состава полимерной композиции исходят из следующих практических соображений. Пищевая пленка не должна набухать и тем более растворяться в воде, т. е. для обеспечения водостойкости пленочного материала его степень набухания должна быть минимальной. Показатель ПП также необходимо минимизировать, поскольку наличие влаги в упаковке приводит к окислению продуктов, причем в случае интенсивного переноса водяного пара между окружающей средой и продуктом скорость окисления значительно возрастает [30,31]. Значение доли геля соответствует количеству нерастворимой фракции пленки в результате образования межмолекулярных поперечных связей между макромолекулами полимеров в составе композиции. Следовательно, чем выше величина ДГ, тем меньше будет миграция растворимых веществ из полимерной матрицы в пищевой продукт. Важной особенностью УМ являются его механические свойства. Прочность на разрыв показывает, насколько устойчив материал к приложенному давлению, удлинение при разрыве и модуль Юнга отражают его устойчивость к продольной деформации при растяжении, поэтому идеальным сочетанием будет высокое значение σ_p, ε_p и низкое значение E_0.

При этом стоит отметить, что такие параметры, как ПП, σ_p и ε_p включены в перечень физико-механических показателей, которые регламентируются ГОСТ Р 57432-2017[4]. Данный стандарт распространяется на пленку, изготовленную методами экструзии, полива и термоформования, в том числе полученную смешением биоразлагаемых полимерных материалов и предназначенную для изготовления упаковки. Согласно нормативному документу, паропроницаемость для таких пленок должна быть не более 300 г/(м^2·сут), прочность при растяжении — не менее 14 МПа, относительное удлинение при разрыве — не менее 5 %.

[4] ГОСТ Р 57432-17 «Упаковка. Пленки из биоразлагаемого материала. Общие технические условия». — М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

Таблица 1. **Независимые переменные и их уровни для составов Кр/КМЦ/ПВС/Гл/ЛК**

Table 1. **Independent variables and their levels for the compositions S/CMC/PVA/Gl/CA**

№ опыта	X_1 (%)	X_2 (%)	X_3 (%)
1	0	−1	+1
2	−1	0	−1
3	+1	+1	0
4	+1	−1	0
5	0	+1	−1
6	−1	−1	0
7	−1	0	+1
8	0	+1	+1
9	+1	0	+1
10	0	0	0
11	−1	+1	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	−1	−1
16	0	0	0
17	+1	0	−1

Таблица 2. **Экспериментальные данные для статистической обработки**

Table 2. **Experimental data for statistical processing**

№ опыта	[ПВС], мас. %	[Гл], мас. %	[ЛК], мас. %	СН, %	ДГ, %	ПП, г/(м^2·сут)	σ_p, МПа	ε_p, %	E_0, МПа
1	10	25	9	346,5	72,5	44,0	20,0	1,1	2163,2
2	7	37,5	5	1346,2	62,0	55,0	29,3	6,1	1409,2
3	15,5	50	7	295,6	60,2	60,9	25,2	7,9	932,2
4	15,5	25	7	654,0	68,1	46,9	26,9	4,1	2074,3
5	10	50	5	1169,2	58,4	60,7	25,2	5,2	1348,5
6	7	25	7	782,4	72,2	55,8	30,7	2,0	1997,9
7	7	37,5	9	595,4	69,0	40,1	26,3	4,9	1295,7
8	10	50	9	570,3	70,1	48,0	16,7	3,4	1271,3
9	15,5	37,5	9	497,1	74,4	37,3	15,9	1,4	1665,1
10	10	37,5	7	759,0	66,3	46,1	27,0	4,2	1160,3
11	7	50	7	766,6	67,0	68,7	19,8	8,2	1137,1
12	10	37,5	7	753,4	67,1	44,8	31,7	4,1	1528,7
13	10	37,5	7	757,2	66,2	47,0	27,1	4,1	1334,5
14	10	37,5	7	753,2	65,7	46,0	31,1	4,5	1314,9
15	10	25	5	996,0	60,2	45,2	38,6	2,0	1873,9
16	10	37,5	7	755,1	66,1	46,6	28,8	4,3	1452,0
17	15,5	37,5	5	800,4	64,3	45,6	36,1	6,2	1785,7

Сопоставление экспериментально полученных результатов (Таблица 2) с нормами ГОСТ Р 57432-2017[4] показывает, что только 5 составов из 17 (№ 2, 3, 5, 11 и 17) имеют значения ПП, σ_p и ε_p, соответствующие требованиям этого нормативного документа, однако 4 из них характеризуются очень высокой способностью к поглощению воды. Так, СН составов № 11, 17 составляет около 800 %, № 2, 5 — выше 1000 %, что относит эти образцы к категории суперадсорбентов [29]. Состав № 3, включающий 15,5 мас. % ПВС, 50 мас. % Гл и 7 мас. % ЛК, показывает минимальное набухание (295,6 %) и высокую эластичность (E_0 932,2 МПа) при относительно невысокой доле гель-фракции (60,2 %).

Представленные в Таблице 2 результаты демонстрируют, что комбинация независимых переменных, позволяющая достигнуть приемлемые значения всех шести переменных отклика, может быть получена из данных эксперимента только при использовании статистической обработки. На основе уравнения (1) для рассматриваемых пределов экспериментальных ограничений были получены следующие регрессионные зависимости:

$$\begin{aligned} СН = {} & 2890{,}1 + 59{,}39 \times [Гл] - 53{,}24 \times [ПВС] - 655{,}6 \times [ЛК] + \\ & + 0{,}51 \times [Гл] \times [ЛК] - 2{,}057 \times [Гл] \times [ПВС] + 13{,}42 \times [ПВС] \times [ЛК] - \\ & - 0{,}55 \times [Гл]^2 + 25{,}01 \times [ЛК]^2 - 0{,}0067 \times [ПВС]^2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} ДГ = {} & 52{,}96 + 0{,}43 \times [Гл] - 1{,}84 \times [ПВС] + 2{,}92 \times [ЛК] - \\ & - 6{,}0 \times 10^{-3} \times [Гл] \times [ЛК] - 0{,}018 \times [Гл] \times [ПВС] + 0{,}059 \times [ПВС] \times [ЛК] - \\ & - 4{,}90 \times 10^{-3} \times [Гл]^2 - 0{,}054 \times [ЛК]^2 + 0{,}090 \times [ПВС]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} ПП = {} & 86{,}51 - 2{,}90 \times [Гл] - 8{,}47 \times [ПВС] - 18{,}28 \times [ЛК] - \\ & - 0{,}12 \times [Гл] \times [ЛК] + 9{,}87 \times 10^{-3} \times [Гл] \times [ПВС] + 0{,}15 \times [ПВС] \times [ЛК] + \\ & + 0{,}054 \times [Гл]^2 - 1{,}28 \times [ЛК]^2 + 0{,}28 \times [ПВС]^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma_p = 25{,}42 - 0{,}21 \times [Гл] + 2{,}63 \times [ПВС] + 2{,}89 \times [ЛК] + \\ + 0{,}10 \times [Гл] \times [ЛК] + 0{,}044 \times [Гл] \times [ПВС] - 0{,}47 \times [ПВС] \times [ЛК] - \\ - 0{,}017 \times [Гл]^2 - 0{,}35 \times [ЛК]^2 - 0{,}048 \times [ПВС]^2, \quad (5)$$

$$\varepsilon_p = -15{,}14 + 0{,}41 \times [Гл] - 1{,}04 \times [ПВС] + 4{,}90 \times [ЛК] - \\ - 8{,}90 \times 10^{-3} \times [Гл] \times [ЛК] - 8{,}45 \times 10^{-3} \times [Гл] \times [ПВС] - 0{,}12 \times [ПВС] \times [ЛК] - \\ - 1{,}36 \times 10^{-3} \times [Гл]^2 - 0{,}28 \times [ЛК]^2 - 0{,}0944 \times [ПВС]^2, \quad (6)$$

$$E_0 = 2081{,}6 - 58{,}65 \times [Гл] + 137{,}2 \times [ПВС] + 77{,}0 \times [ЛК] - \\ - 3{,}67 \times [Гл] \times [ЛК] - 5{,}68 \times [Гл] \times [ПВС] - 2{,}05 \times [ПВС] \times [ЛК] + \\ + 1{,}37 \times [Гл]^2 + 5{,}77 \times [ЛК]^2 + 6{,}23 \times [ПВС]^2, \quad (7)$$

Согласно сводным данным результатов ANOVA (Таблица 3), уравнения регрессии (2)–(7) имеют значимость и коэффициент детерминации, позволяющие использовать их для дальнейшего прогнозирования состава пленочных материалов. Из результатов оптимизации, представленных в Таблице 4, видно, что одновременное варьирование концентрации независимых переменных в заданном диапазоне их значений приводит к изменению всех показателей пленочных образцов в довольно широком интервале. Из этого следует, что расчет по данным уравнениям не позволяет сделать очевидным выбор направления варьирования переменных факторов. Поэтому дополнительно были построены трехмерные графики контура поверхности, позволяющие визуально оценить влияние всех независимых переменных (ПВС, Гл, ЛК) на каждую из переменных отклика (Рисунок 1).

Анализ данных Таблицы 4 и Рисунка 1 приводит к следующим заключениям.

1. Минимизация степени набухания достигается при увеличении [ЛК], [ПВС] и [Гл]. Это полностью согласуется с имеющимися литературными данными.

Во-первых, повышение количества поликарбоновой кислоты способствует значительному уменьшению СН в композите на основе полисахарида и ПВС вследствие увеличения степени сшивки полимерной сетки. Это обеспечивается за счет протекания реакции этерификации

Таблица 3. **Сводные данные результатов ANOVA**

Table 3. **Summary of ANOVA results**

Переменная отклика	Сумма площадей	*DF*	Среднее квадратичное	*F*	*p*	R^2
СН	1,04E + 06	9	1,15E + 05	14,79	0,0009	95,01
ДГ	264,78	9	29,42	3,46	0,0578	81,66
ПП	1037,81	9	115,31	30,54	0,0001	97,52
σ_p	582,74	9	64,75	13,95	0,0011	94,72
ε_p	58,99	9	6,56	6,15	0,0128	88,78
E_0	1,66E + 06	9	1,84E + 05	3,53	0,0553	81,93

Таблица 4. **Оптимизированные концентрации ПВС, Гл и ЛК для максимальных и минимальных значений переменных отклика**

Table 4. **Optimized concentrations of PVA, Gl and CA for maximum and minimum values of response variables**

Переменная отклика		[ПВС], мас. %	[Гл], мас. %	[ЛК], мас. %
СН, %	$СН_{max}$ = 1370,8	7	43,7	5
	$СН_{min}$ = 294,7	15,5	50	8,4
ДГ, %	$ДГ_{max}$ = 73,4	15,5	25	9
	$ДГ_{min}$ = 57,1	13,7	50	5
ПП, г/(м^2·сут)	$ПП_{max}$ = 70,5	7	50	5
	$ПП_{min}$ = 34,6	12,2	33,8	9
σ_p, МПа	$\sigma_{p\,max}$ = 38,7	15,5	29,2	5
	$\sigma_{p\,min}$ = 11,6	15,5	25	9
ε_p, %	$\varepsilon_{p\,max}$ = 8,1	15,5	50	5
	$\varepsilon_{p\,min}$ = 1,7	9,7	25	5
E_0, МПа	$E_{0\,max}$ = 2943,7	15,5	25	9
	$E_{0\,min}$ = 987,5	13,3	50	9

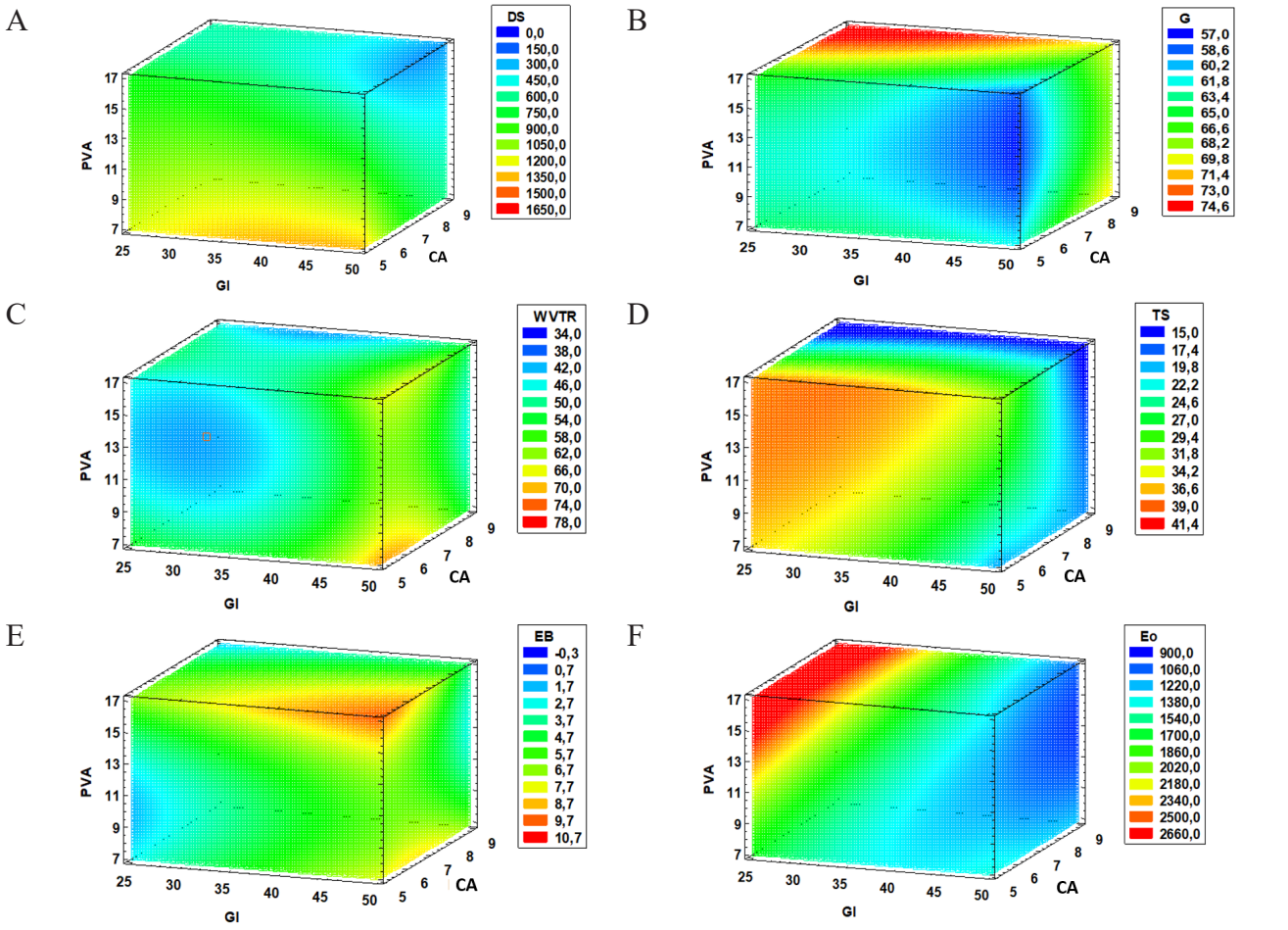


Рисунок 1. **Графики поверхности отклика, показывающие влияние независимых переменных ПВС, ЛК и Гл на переменные отклика композита кукурузный Кр/КМЦ: A) степень набухания; B) доля геля; C) паропроницаемость; D) прочность при растяжении; E) относительное удлинение при разрыве; F) модуль Юнга**

Figure 1. **Response surface plots showing the influence of independent variables PVA, CA and Gl on the response variables of the corn S/CMC composite: A) swelling degree; B) gel fraction; C) water vapor transmission rate; D) tensile strength; E) elongation at break; F) Young's modulus**

с участием ОН групп полимеров и СООН кислоты [32,33]. В результате сорбционные свойства гидрогеля ухудшаются. Было показано, что после достижения некоторой концентрации ЛК степень набухания гидрогеля не изменяется [34]. В случае введения слишком большого количества ЛК может наблюдаться противоположный эффект, как было отмечено авторами [35], для системы, включающей растворимый крахмал и ПВС. Причиной этого является взаимодействие только одной карбоксильной группы ЛК с гидроксилсодержащим полимером, сопровождающееся образованием объемных сложноэфирных групп в боковой цепи полимера, которые действуют как пластификатор.

Во-вторых, рост [Гл] до некоторой «критической» концентрации (40 мас. % в [35]) может способствовать снижению СН за счет увеличения количества Н-связей в композите. Предполагается [35], что наличие трех ОН групп в глицерине облегчает образование водородных связей с гидроксильными группами ПВС и полисахаридов (хотя они являются менее прочными, чем между карбоксильными группами ЛК и ОН группами полимеров). Такое предположение косвенно подтверждают полученные нами данные для составов № 3 и 4: при равных [ПВС] и [ЛК] более низкая СН наблюдается в случае меньшей величины [Гл]. Однако, изменение количества Гл не оказывает такого влияния на величину СН при снижении или увеличении концентрации сшивающего агента (составы № 1, 8 и 5, 15). Таким образом, гипотетически можно считать, что основной вклад в регулирование способности к набуханию для наших образцов вносит ЛК.

В-третьих, ПВС легко взаимодействует со всеми компонентами композиции: с крахмалом за счет межмолекулярных Н-взаимодействий между функциональными группами полимеров [36]; с КМЦ посредством водородных связей между ОН группами в ПВС и карбоксиметильными группами в КМЦ [37], а также посредством сложноэфирных связей, образующихся при сшивке лимонной кислотой. Таким образом, снижение СН в рассматриваемой системе предположительно будет происходить при увеличении концентрации всех независимых переменных. При этом необходимо установление предельных [ЛК] и [Гл], выше которых начинается преобладание пластифицирующего эффекта над процессом сшивки макромолекул.

2. Максимизация доли гель-фракции достигается при увеличении [ЛК], [ПВС] и уменьшении [Гл]. Аналогичное влияние количества Гл на ДГ в крахмалсодержащих пленках наблюдали авторы [38]. Уменьшение ДГ с ростом концентрации Гл связано с его пластифицирующими свойствами. Влияние ПВС или ЛК на ДГ также очевидно и аналогично обсуждаемому для случаев взаимодействия ПВС и ЛК между собой и с полисахаридами.

3. Пленочные материалы характеризуются достаточно низкими значениями паропроницаемости: менее 70 г/(м^2·сут) (Таблица 2), что намного меньше величины, указанной в ГОСТ Р 57432-17 (менее 300 г/(м^2·сут)). Следует отметить, что величина ПП полисахаридных пленок может варьироваться в достаточно широком диапазоне в зависимости от состава образцов и режима их получения (время и температура сушки, относительная влажность воздуха). Например, пленки из пшеничного крахмала и сорбита (40 мас. %), полученные через 48 ч выдержки при 36 °С и влажности 54 %, характеризуются предельно низким значением ПП (около 10 г/(м^2·сут)) [39], а пленки из рисового крахмала с таким же содержанием сорбита, но с другим режимом сушки (12 ч, 60 °С, влажность 50 %) пропускают водяной пар в 15 раз интенсивнее (ПП около 150 г/(м^2·сут)) [40]. Сведения о паропроницаемости для пленок, включающих крахмал, КМЦ, ПВС, ЛК и Гл, содержатся только в исследовании [41]. По данным [41], пленки, содержащие крахмал тапиоки, КМЦ и ПВС с соотношением (10–30):(35–45):(35–45) мас. %, сшитые ЛК и пластифицированные Гл (15 и 10 % по отношению к массе полимеров соответственно) и высушенные при 60 °С в течение 12 ч, при различной комбинации концентраций полимеров пропускают водяной пар со скоростью приблизительно 2500–3400 г/(м^2·сут). Как видно из приведенных выше данных различных авторов, параметр ПП очень лабильный и сильно зависит от количества крахмала в композите.

В нашем случае соотношение Кр, КМЦ и ПВС составляет около (69–77):(17–19):(7–13) мас. %, т. е. величина [Кр] достаточно велика, что и обуславливает невысокую ПП пленок. Возможно, по причине незначительной проницаемости водяного пара образцами выраженное влияние на ПП независимых переменных отсутствует. При этом ПВС и Гл в концентрациях 10–16 и 25–40 мас. % соответственно обеспечивают синергический эффект, снижая паропроницаемость, как описано для композита кукурузного крахмала/ПВС в исследовании [24].

4. Величины прочности при растяжении наших образцов (15,9–38,6 МПа (Таблица 2)) хорошо согласуются с имеющимися в научной литературе для пленок подобного состава. Так, в работе [41] диапазон σ_p составляет 22–26 МПа; для композита Кр/КМЦ/ПВС (30:20:50мас./мас.) — 18,3 МПа [42]; Кр/ПВС (25:75 мас./мас.) с добавкой 10 и 20 мас. % КМЦ, 20 мас. % Гл, 5 мас. % ЛК — 36,6 и 27,7 МПа [43]. Увеличению прочности образцов способствует преимущественно сшивающий агент: чем меньше [ЛК], тем выше значения σ_p. Высказано предположение [33], что ЛК может вызывать гидролиз разветвленных цепей макромолекулы амилопектина с образованием высоколинейной структуры, которая позволяет создавать большее количество водородных связей между цепями полисахарида, в результате чего повышается прочность на разрыв в полученных пленках.

Параметр σ_p также увеличивается с уменьшением [Гл]. Многочисленными исследованиями доказано, что роль пластификатора заключается в снижении прочной внутримолекулярной водородной связи между макромолекулами [44,45] и др. Молекулы Гл вследствие их гидрофильности удерживают молекулы воды, это увеличивает пространство между полимерными цепями и снижает прочность на разрыв [42]. ПВС в заданном диапазоне концентраций слабо влияет на прочностные показатели. В то же время из полученных нами данных гипотетически следует, что уменьшение его количества может привести к снижению значений σ_p, возможно, вследствие сокращения вклада сильных Н-взаимодействий между ОН и СООН группами ПВС и КМЦ в полимерной матрице.

5. Увеличение концентрации пластификатора приводит к максимизации значений ε_p. Для модуля Юнга отмечается прямо противоположная зависимость: значения E_0 возрастают при снижении [Гл]. Также прослеживается связь между способностью пленок к растяжению и степенью сшивки макромолекул: чем меньше [ЛК], тем больше удлинение при разрыве и ниже модуль Юнга. Влияние ПВС на способность образцов к удлинению слабо выражено. Так, у составов № 3 и 11, которые отличаются только величиной [ПВС], причем более, чем в 2 раза (15,5 и 7 мас. %), значения очень близки: 7,9 и 8,2 % для ε_p, 932 и 1137 МПа для E_0. При этом лучшими механическими свойствами обладают пленочные материалы, в которых содержание ПВС максимально. Такое же влияние ПВС на удлинение по сравнению с пластификатором отмечается и в других подобных исследованиях, например, для пленок на основе кукурузного крахмала и ПВС [24] и для композита Кр/КМЦ/ПВС [46]. Уровень значений модуля Юнга для тройной полимерной системы — 1400–1865 МПа [46] — хорошо согласуется с полученными нами значениями E_0.

Проведенный анализ показывает, что показатели полученных нами пленочных материалов отвечают требованиям ГОСТ Р 57432-17 и подобным по составу пленкам, описанным в литературе, которые авторы позиционируют как УМ для пищевых продуктов. Исходя из того, что снижение [ПВС] негативно влияет на большинство характеристик образцов, в качестве оптимального его количества приняли 15,5 мас. %. Гл и ЛК в целом оказывают антибатное действие на свойства пленок, поэтому в качестве оптимальной концентрации взяли среднее их содержание в полимерной композиции — 37,5 и 7 мас. % соответственно. Выбранные концентрации наиболее приближены к составам № 3 и 4 (Таблица 2), а именно состав № 3, как отмечалось ранее, максимально соответствует нормам ГОСТ Р 57432-17.

Данные расчета по уравнениям (2)–(7) для концентрации независимых переменных 15,5 мас. % ПВС; 37,5 мас. % Гл; 7 мас. % ЛК представлены в Таблице 5. Как видно, образцы такого состава характеризуются высокой долей сшитого полимера и имеют хорошие механические и барьерные свойства. Однако по сравнению с данными [41] для композита Кр/КМЦ/ПВС (30:35:35 мас./мас.), СН для оптимизированного нами состава выше на 20 % (380 и 472,5 % соответственно) при равной концентрации сшивающего агента (7 мас. %), но при большем (в 3,75 раза) содержании пластификатора. Степень набухания — единственная переменная отклика, которая имеет завышенное значение. Вероятно, в нашем случае не была достигнута «критическая» величина [Гл], обеспечивающая замедление набухания.

Таблица 5. **Экспериментальные и прогнозируемые значения переменных отклика для пленок оптимизированного состава**

Table 5. **Experimental and predicted values of response variables for optimized composition films**

Состав полимерной композиции: Кр/КМЦ = 80:20 мас./мас.; ПВС — 15,5; Гл — 37,5; ЛК — 7 % от массы полисахаридов	**СН, %**	**ДГ, %**	**ПП, г/(м^2·сут)**	**σ_p, МПа**	**ε_p, %**	**E_0, МПа**
Расчет ANOVA	472,5	67,2	46,0	28,0	5,9	1767,4
Эксперимент (n = 3)	561,7	69,6	48,7	30,4	5,9	1767,1
Относительная ошибка, %	15,9	3,5	5,5	9,2	0	0,02

С учетом выбранного количества компонентов пленочной композиции (независимых переменных) были получены образцы оптимизированного состава и определены значения их характеристик. Эксперименты по определению параметров пленок (переменных отклика) были проведены трижды. Как видно из Таблицы 5, средние значения четырех параметров из шести — доли геля, паропроницаемости, относительного удлинения при разрыве и модуля Юнга — имеют небольшую ошибку (до 5,5 %) по сравнению с расчетными значениями. Таким образом, прогнозируемые значения, основанные на регрессионной модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Теоретические и экспериментальные значения степени набухания существенно различаются. Более того, величина СН полученных образцов является достаточно высокой для упаковочных пленок и может привести к потере целостности при действии водной среды. Причиной высокой сорбционной способности пленок является, очевидно, гидрофильная природа всех компонентов, входящих в состав композитов. Для снижения степени набухания необходимо дополнение состава пленкообразующей композиции гидрофобизирующими соединениями. Например, значительное снижение содержания воды в матрице Кр/ПВС отмечено при добавлении к ней смеси экстракта прополиса и антоцианов [46], нанокомплексов, загруженных антоцианами [47], из-за сильных водородных связей между полимерами и введенными компонентами. Включение в полимерную основу подобных добавок позволит не только улучшить базовые характеристики пленок, но и придать им дополнительные свойства, например, антиоксидантные и/или антибактериальные.

4. Выводы

С использованием методологии поверхности отклика проведена оптимизация количества функциональных добавок (поливинилового спирта, лимонной кислоты, глицерина) в композите кукурузный крахмал — карбоксиметилцеллюлоза (при соотношении полисахаридов 80:20 мас./мас.). Были установлены концентрации поливинилового спирта, глицерина и лимонной кислоты, которые составили 15,5; 37,5 и 7 мас. % соответственно. Данный оптимизированный состав позволяет получить матрицу со степенью сшивки макромолекул, обеспечивающей низкую паропроницаемость пленочных материалов и хороший уровень их механических параметров.

Для полимерной основы, включающей крахмал и КМЦ, были получены основные данные о влиянии ПВС, ЛК и Гл на свойства пленок, которые важны для оценки их применимости в качестве пленочного упаковочного материала для пищевой продукции. Для увеличения водостойкости образцов необходимо продолжение работы в направлении совершенствования состава пленкообразующей композиции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., Beas, I. N. (2020). Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acidbased materials. *Materials*, 13(21), Article 4994. https://doi.org/10.3390/ma13214994
2. Бурак, Л. Ч. (2023). Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности. *Ползуновский вестник*, 1, 91–105. [Burak, L. Ch. (2023). Overview of the development of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovskiy Vestnik*, 1, 91–105. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012
3. Baranwal, J., Barse, B., Fais, A., Delogu, G. L., Kumar, A. (2022). Biopolymer: A sustainable material for food and medical applications. *Polymers*, 14(5), Article 983. https://doi.org/10.3390/polym14050983
4. Wypij, M., Trzcińska-Wencel, J., Golińska, P., Avila-Quezada, G. D., Ingle, A. P., Rai, M. (2023). The strategic applications of natural polymer nanocomposites in food packaging and agriculture: Chances, challenges, and consumers' perception. *Frontiers in Chemistry*, 10, Article 1106230. https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1106230
5. Onyeaka, H. N., Nwabor, O. F. (2022). Natural polymers as food packaging materials. Chapter in a book: Food Preservation and Safety of Natural Products. Cambridge (MA): Academic Press US, 2022. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85700-0.00004-6
6. Gonzlez-López, M. E., de Jesús Calva-Estrada, S., Gradilla-Hernández, M. S., Barajas-Alvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1225371. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1225371
7. Panda, P. K., Sadeghi, K., Seo, J. (2022). Recent advances in poly (vinyl alcohol)/natural polymer based films for food packaging applications: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, Article 100904. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100904
8. Gong, W., He, W.-Y., Hou, Y.-Y., Li, Y.-X., Hu, Y.-Y., Zhu, B.-W. et al. (2024). Polyvinyl alcohol-based multifunctional hydrogel film: A novel strategy for food preservation packaging. *Food Bioscience*, 59, Article 104125. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104125
9. Teodorescu, M., Bercea, M., Morariu, S. (2018). Biomaterials of poly (vinyl alcohol) and natural polymers. *Polymer Reviews*, 58(2), 247–287. https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1403928
10. Deng, H., Su, J., Zhang, W., Khan, A., Sani, M. A., Goksen, G. et al. (2024). A review of starch/polyvinyl alcohol (PVA) blend film: A potential replacement for traditional plastic-based food packaging film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273(Part 1), Article 132926. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132926
11. Wen, L. Liang, Y., Lin, Z., Xie, D., Zheng, Z., Xu, C. et al. (2021). Design of multifunctional food packaging films based on carboxymethyl chitosan/polyvinyl alcohol crosslinked network by using citric acid as crosslinker. *Polymer*, 230, Article 124048. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124048
12. Xie, Y., Pan, Y., Cai, P. (2022). Hydroxyl crosslinking reinforced bagasse cellulose/polyvinyl alcohol composite films as biodegradable packaging. *Industrial Crops and Products*, 176, Article 114381. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114381
13. Zhang, S., Guo, H. G., Cran, M. J. (2024). Influence of PVA resin and cross-linking agent on the structure and properties of semi-refined carrageenan-based packaging films. *Journal of Physics: Conference Series*, 2680(1), Article 012006. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2680/1/012006
14. Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Gutierrez, M. C., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., Aguirre-Loredo, R. Y. (2020). Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. *Materials Chemistry and Physics*, 239, Article 122027. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122027
15. Ma, Q., Du, L., Yang, Y., Wang, L. (2017). Rheology of film-forming solutions and physical properties of tara gum film reinforced with polyvinyl alcohol (PVA). *Food Hydrocolloids*, 63, 677–684. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.009
16. Bertolo, M. R. V., Dias, L., de Oliveira Filho, J. G., Alves, F., Marangon, C., da Conceicao Amaro Martins, V. et al. (2022). Central composite design optimization of active and physical properties of food packaging films based on chitosan/gelatin/pomegranate peel extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, Article 100986. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100986
17. Dean, A., Voss, D., Draguljić, D. (2017). Design and Analysis of Experiments. Cham: Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0
18. Li, Z., Lu, D., Gao, X. (2021). Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method — A review. *Journal of Building Engineering*, 36(2), Article 102101. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102101
19. Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
20. Bajic, M., Oberlintner, A., Korge, K., Likozar, B., Novak, U. (2020) Formulation of active food packaging by design: Linking composition of the film-forming solution to properties of the chitosan-based film by response surface methodology (RSM) modelling. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 971–978. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.186
21. Contreras-Chávez, R., Garnica-Romo, M. G., Martínez-Flores, H. E., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Anjos, R. C. A., Topete-Betancourt, A. (2021). Optimization of acetylated starch films from purple sweet potato: Effect of glycerol, carboxymethylcellulose, and stearic acid. *Materials Research Express*, 8, Article 115101. https://doi.org/10.1088/2053–1591/ac36fa
22. Franco, E., Dussán, R., Navia, D. P., Amú, M. (2021). Study of the annealing effect of starch/polyvinyl alcohol films crosslinked with glutaraldehyde. *Gels*, 7(4), Article 249. https://doi.org/10.3390/gels7040249
23. Guleria, S., Singh, H., Jain, A., Arya, S. K., Puri, S., Khatri, M. (2024). Response surface methodology-based preparation of sago starch bioplastic film for food packaging. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization,* 29(7), 478–495. https://doi.org/10.1080/1023666X.2024.2383480
24. Yari, S., Mohammadi-Rovshandeh, J., Shahrousvandhttps, M. (2022). Preparation and optimization of starch/poly vinyl alcohol/ZnO nanocomposite films applicable for food packaging. *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 1502–1517. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-526313/v1
25. Mittal, M., Chaudhary, R., Phutela, K., Airon, M., Singh, R. C. (2022). Modeling and performance optimization of starch-based biocomposite films using response surface methodology. *Journal of Applied Research and Technology*, 20(4), 430–447. https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1239
26. Dewi, R., Sylvia, N., Zulnazri, Z., Fithra, H., Riza, M., Siregar, J. P. et al. (2024). The optimization of avocado-seed-starch-based degradable plastic synthesis with a polylactic acid (PLA) blend using response surface methodology (RSM). *Polymers*, 16(16), Article 2384. https://doi.org/10.3390/polym16162384
27. Крюк, Т. В., Попова, О. С., Тюрина, Т. Г., Сиверский, А. В., Романенко, Н. А. (2024). Разработка состава пленочных материалов на основе полисахаридов для пищевой упаковки. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 17(4), 67–75. [Kryuk, T. V., Popova, O. S., Tyurina, T. G., Siversky, A. V. Romanenko, N. A. (2024). Development of film materials composition based on polysaccharides for food packaging. *Food Industry: Science and Technologies*, 17(4), 67–75. (In Russian)]
28. Noè, C., Tonda-Turo, C., Chiappone, A., Sangermano, M., Hakkarainen, M. (2020). Light processable starch hydrogels. *Polymers*, 12(6), 1359–1372. https://doi.org/10.3390/polym12061359
29. Ahmed, A. S., Mandal, U. K., Taher, M., Susanti, D., Jaffri, J. M. (2017). PVA-PEG physically cross-linked hydrogel film as a wound dressing: Experimental design and optimization. *Pharmaceutical Development and Technology*, 23(8), 751–760. https://doi.org/10.1080/10837450.2017.1295067
30. Ghiasi, F., Golmakani, M.-T., Eskandari, M. H., Hosseini, S. M. H. (2020). A new approach in the hydrophobic modification of polysaccharide-based edible films using structured oil nanoparticles. *Industrial Crops and Products*, 154, Article 112679. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112679
31. Yao, X., Qin, Y., Zhang, M., Zhang, J., Qian, C., Liu, J. (2021). Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 358–368. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.152

32. Wilpiszewska, K., Antosik, A. K., Schmidt, B., Janik, J., Rokicka, J. (2020). Hydrophilic films based on carboxymethylated derivatives of starch and cellulose. *Polymers*, 12(11), Article 2447. https://doi.org/10.3390/polym12112447
33. Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., Entezami, A. A. (2011). Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible films: Effect of citric acid and carboxymethyl cellulose. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 229–235. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.016
34. Yoon, S.-D., Chough, S.-H., Park, H.-R. (2006). Properties of starch-based blend films using citric acid as additive. II. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(3), 2554–2560. https://doi.org/10.1002/app.23783
35. Das, A., Uppaluri, R., Das, C. (2019). Feasibility of poly-vinyl alcohol/starch/glycerol/citric acid composite films for wound dressing applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131, 998–1007. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.160
36. Nargesi Khoramabadi, H., Arefian, M., Hojjati, M., Tajzad, I., Mokhtarzade, A., Mazhar, M. et al. (2020). A review of polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose (PVA/CMC) composites for various applications. *Journal of Composites and Compounds*, 2(3), 69–76. https://doi.org/10.29252/jcc.2.2.2
37. Abedi-Firoozjah, R., Chabook, N., Rostami, O., Heydari, M., Kolahdouz-Nasiri, A., Javanmardi, F. et al. (2023). PVA/starch films: An updated review of their preparation, characterization, and diverse applications in the food industry. *Polymer Testing*, 118, Article 107903. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107903
38. Basiak, E., Lenart, A., Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), Article 412. https://doi.org/10.3390/polym10040412
39. Napierala, D. M., Nowotarska, A. (2006). Water vapour transmission properties of wheat starch-sorbitol film. *Acta Agrophysica*, 7(1), 151–159.
40. Laohakunjit, N., Noomhorm, A. (2004). Effect of plasticizers on mechanical and barrier properties of rice starch film. *Starch*, 56(8), 348–356. https://doi.org/10.1002/star.200300249
41. Boonthod, C. (2021). Development of polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose/starch biodegradable film for active packaging. Bangkok: Silpakorn University, 2021.
42. Taghizadeh, M. T., Sabouri, N., Ghanbarzadeh, B. (2013). Polyvinyl alcohol: Starch: Carboxymethyl cellulose containing sodium montmorillonite clay blends; mechanical properties and biodegradation behavior. *SpringerPlus*, 2(1), Article 376. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-376
43. Gulati, K., Lal, S. Arora, S. (2019). Synthesis and characterization of PVA/Starch/CMC composite films reinforced with walnut (Juglans regia L.) shell flour. *SN Applied Sciences*, 1, Article 1416. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1462-8
44. Cabello, S. P., Takara, E. A., Marchese, J., Ochoa, N. A. (2015). Influence of plasticizers in pectin films: Microstructural changes. *Materials Chemistry and Physics*, 162, 491–497. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.06.019
45. Liu, T., Peng, X., Chen, Y. -N., Bai, Q. -W., Shang, C., Zhang, L., Wang, H. (2018). Hydrogen-bonded polymer–small molecule complexes with tunable mechanical properties. *Macromolecular Rapid Communications*, 39(9), Article 1800050. https://doi.org/10.1002/marc.201800050
46. Mustafa, P., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Rafiq, S., Ahmad, T., Sikander, U. et al. (2021). Improving functional properties of PVA/starch-based films as active and intelligent food packaging by incorporating propolis and anthocyanin. *Polymers and Polymer Composites*, 29, 1472–1484. https://doi.org/10.1177/0967391120973503
47. Qin, Y., Yun, D., Xu, F., Chen, D., Kan, J., Liu, J. (2021). Smart packaging films based on starch/polyvinyl alcohol and *Lycium ruthenicum* anthocyanins-loaded nano-complexes: Functionality, stability and application. *Food Hydrocolloids*, 119, Article 106850. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106850

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Крюк Татьяна Владленовна — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, доцент, заместитель директора по научной работе, Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 70 Тел.: +7–949–381–69–21 E-mail: ktvl2010@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8538-5856 * автор для контактов	**Tatiana V. Kryuk**, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Docent, Deputy Director for Scientific Work, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry 70, Rosa Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Russia Tel.: ++7–949–381–69–21 E-mail: ktvl2010@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8538-5856 * corresponding author
Тюрина Татьяна Григорьевна — доктор химических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований радикальных реакций, Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 70 Тел.: +7–949–358–53–47 E-mail: t_tiurina@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2950-3616	**Tatyana G. Tyurina**, Doctor of Chemical Sciences, Leading Researcher of the Radical Reactions Study Department, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry 70, Rosa Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Russia Tel.: +7–949–358–53–47 E-mail: t_tiurina@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2950-3616
Попова Оксана Сергеевна — старший преподаватель, кафедра таможенного дела и экспертизы товаров, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского 283050, Донецк, ул. Щорса, 31 Тел.: +7–949–339–38–49 E-mail: omango@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0008-5406	**Oksana S. Popova**, Senior Lecturer, Department of Customs Affairs and Expertise of Goods, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky 31, Shchors Str., Donetsk, 283050, Russia Tel.: +7–949–339–38–49 E-mail: omango@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0008-5406
Романенко Наталья Александровна — младший научный сотрудник, молодежная лаборатория функциональных материалов на основе полисахаридов, Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 70 Тел.: +7–949–347–13–21 E-mail: nathaly_roman@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-0703-0806	**Natalya A. Romanenko**, Junior Researcher, Youth Laboratory of Functional Materials Based on Polysaccharides, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry 70, Rosa Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Russia Tel.: +7–949–347–13–21 E-mail: nathaly_roman@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-0703-0806
Гончарук Галина Петровна — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН 117393, Москва, ул. Профсоюзная, 70 Тел.: +7–929–995–46–91 E-mail: ggoncharuk@ispm.ru ORCID: http://orcid.org/ 0000-0003-2762-1512	**Galina P. Goncharuk**, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials 70, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117393, Russia Tel.: +7–929–995–46–91 E-mail: ggoncharuk@ispm.ru ORCID: http://orcid.org/ 0000-0003-2762-1512
Труш Евгений Николаевич — младший научный сотрудник, молодежная лаборатория функциональных материалов на основе полисахаридов, Институт физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко 283048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 70 Тел.: +7–949–394–06–55 E-mail: trush.chem@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0007-5545-9328	**Eugene N. Trush**, Junior Researcher, Youth Laboratory of Functional Materials Based on Polysaccharides, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry 70, Rosa Luxemburg Str., Donetsk, 283048, Russia Tel.: +7–949–394–06–55 E-mail: trush.chem@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0007-5545-9328

Критерии авторства	Contribution
Крюк Т. В.: постановка цели и задач, систематизация результатов экспериментальных данных, написание текста статьи. **Тюрина Т. Г.**: научное руководство, редактирование статьи. **Попова О. С.**: обработка экспериментальных данных. **Романенко Н. А.**: исследование свойств образцов. **Гончарук Г. П.**: проведение механических испытаний образцов. **Труш Е. Н.**: получение образцов.	**Tatiana V. Kryuk**: determination aim and tasks, systematizing the results of experimental data, writing the text of the article. **Tatiana G. Tyurina**: scientific management, editing the article. **Oksana S. Popova**: processing of experimental data. **Natalia A. Romanenko**: measuring the sorption and barrier characteristics of film materials. **Galina P. Goncharuk**: measuring the mechanical characteristics of film materials. **Eugene N. Trush**: obtaining of film materials.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-196-203

Received 21.01.2025
Accepted in revised 25.04.2025
Accepted for publication 30.04.2025
© Abd Alhussein H. A., Abd Al-Manhel A. J., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

A COMPREHENSIVE OVERVIEW OF CYCLODEXTRINS IN TERMS OF PRODUCTION, PROPERTIES, AND APPLICATIONS

Huda Ali Abd Alhussein, Alaa Jabbar Abd Al-Manhel*

Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah, Basrah, Iraq

KEY WORDS:
Cyclic oligosaccharides, production, structure, properties, applications

ABSTRACT

Cyclodextrins (CDs) are cyclic oligosaccharides formed through the enzymatic transformation of starch into glucose, catalyzed by cyclodextrin glucanotransferase (CGTase). They are composed of six (α-CD), seven (β-CD), or eight (γ-CD) glucose molecules, interconnected by α-1,4 glycosidic bonds. Cyclodextrin glucanotransferase has been declared safe for use in food applications by the European Food Safety Authority (EFSA). CGTase is an extracellular enzyme that is found in nature on a cellular level and is generated by a variety of microorganisms, such as fungi, bacteria, and archaea. Approximately 90% of bacteria that generate CGTase belong to the genus Bacillus. A number of glucose units joined covalently by oxygen atoms form cyclodextrins. CDs have a truncated cone shape with a hydrophilic outer wall and a less hydrophilic inner wall. Due to their numerous health benefits, CDs are regarded as advantageous nutrients and biologically active dietary supplements. CDs and their derivatives have diverse applications across the food, cosmetics, and pharmaceutical industries, with their use being most prominent in the food sector. Within the food industry, CDs serve primarily as auxiliary agents, acting as technological enhancers to improve the physicochemical properties of various food components. For example, they can be used to stabilize aroma and flavor compounds, polyunsaturated fatty acids (PUFAs), and poorly water-soluble vitamins and nutrients, as well as to improve medication solubility and bioavailability. Studies on their toxicity have also revealed that CDs are safe to use orally. Many studies have examined the insertion of conventional medications or naturally occurring bioactive substances into CDs cavities in an effort to better understand their effects on various cancer cell lines in vitro. CDs are used in cosmetics products to extend their shelf life, stabilize volatile chemical ingredients, lessen offensive tastes or smells, and prevent or lessen topical irritation. Cyclodextrins remain a focal point of research due to their ability to encapsulate molecules and function as catalysts and carriers for a wide range of chemical compounds.

Поступила 21.01.2025
Поступила после рецензирования 25.04.2025
Принята в печать 30.04.2025
© Абд Аль-Хусейн Х. А., Абд Аль-Манхел А. Д., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

ПОДРОБНЫЙ ОБЗОР ПРОИЗВОДСТВА, СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛОДЕКСТРИНОВ

Абд Аль-Хусейн Х. А., Абд Аль-Манхел А. Д.*

Факультет пищевых наук, Сельскохозяйственный колледж, Университет Басры, Басра, Ирак

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
циклические олигосахариды, производство, структура, свойства, применение

АННОТАЦИЯ

Циклодекстрины (ЦД) — это циклические олигосахариды, образующиеся в результате ферментативного преобразования крахмала в глюкозу, катализируемого циклодекстринглюканотрансферазой (ЦГТазой). Они состоят из шести (α-ЦД), семи (β-ЦД) или восьми (γ-ЦД) молекул глюкозы, соединенных между собой α-1,4-гликозидными связями. Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) считает циклодекстринглюканотрансферазу безопасной для использования в пищевых продуктах. ЦГТаза — это внеклеточный фермент, который встречается в природе на клеточном уровне и вырабатывается различными микроорганизмами, такими как грибки, бактерии и археи. Примерно 90% бактерий, вырабатывающих ЦГТазу, принадлежат к роду Bacillus. Циклодекстрины образуются несколькими молекулами глюкозы, ковалентно соединенными атомами кислорода. Они имеют форму усеченного конуса с гидрофильной внешней частью и менее гидрофильной внутренней частью. Благодаря многочисленным преимуществам ЦД считаются полезными для здоровья питательными веществами и биологически активными пищевыми добавками. ЦД и их производные находят разнообразное применение в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности, причем наиболее распространено их использование в пищевых продуктах. В пищевой промышленности ЦД в первую очередь служат в качестве вспомогательных ингредиентов, таких как добавки для улучшения физико-химических свойств различных пищевых компонентов. Например, их можно использовать для стабилизации ароматических и вкусовых соединений, полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) и плохо растворимых в воде витаминов или питательных веществ, а также для улучшения растворимости и биодоступности лекарственных средств. Токсикологические исследования показали, что ЦД безопасны для перорального применения. Во многих исследованиях изучалось введение обычных лекарственных средств или природных биологически активных веществ в полости ЦД с целью лучшего понимания их воздействия на различные линии раковых клеток in vitro. ЦД используются в косметических продуктах для продления срока их годности, стабилизации летучих химических ингредиентов, уменьшения неприятного вкуса или запаха и предотвращения или уменьшения местного раздражения. Циклодекстрины остаются в центре внимания исследований благодаря своей способности инкапсулировать молекулы и выполнять функции катализаторов и носителей для широкого спектра химических соединений.

1. Introduction

Cyclodextrins (CDs) are cyclic oligosaccharides synthesized through the enzymatic conversion of starch into glucose by cyclodextrin glucanotransferase (CGTase). They are composed of six (α-CD), seven (β-CD), or eight (γ-CD) glucose units linked by α-1,4 glycosidic bonds [1,2]. Cyclodextrin glucanotransferase (CGTase; EC2.4.1.19) is an endoenzyme that catalyzes the breakdown of starch derived from sources such as potatoes, corn, and rice, facilitating CD production. [3]. Cyclodextrin glucanotransferase has been declared safe for use in food applications by the European Food Safety Authority (EFSA) [4]. Regarding starch, the US Food and Drug

FOR CITATION: **Abd Alhussein, H. A., Abd Al-Manhel, A. J.** (2025). A comprehensive overview of cyclodextrins in terms of production, properties, and applications. *Food Systems,* 8(2), 196–203. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-196-203

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Абд Аль-Хусейн, Х. А., Абд Аль-Манхел, А. Д.** (2025). Подробный обзор производства, свойств и применения циклодекстринов. *Пищевые системы*, 8(2), 196–203. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-196-203

Administration (FDA) also declared its products, which are represented by the cyclodextrins α, γ, and β, to be safe (GRAS) [2]. This enzyme is produced by bacteria, fungi and archaea. CDs may be kept for several years at room temperature without experiencing any discernible deterioration [5,6].

Cyclodextrins, specifically α and β types, were first discovered in 1891 as byproducts of potato starch digestion by the bacterium *Bacillus amylobacter*, according to a report by a French chemist. Later, Franz Schardinger, an Austrian microbiologist considered the "founding father" of cyclodextrin chemistry, successfully isolated these compounds from various starch sources after digestion by *Bacillus macerans*. Due to their ability to encapsulate molecules and their qualities as catalysts and carriers of various chemicals, cyclodextrins remain a subject of interest for many researchers. These attributes make them excellent candidates for both basic and advanced applications in a variety of industries. This has led to significant theoretical and experimental research into their physicochemical behavior and applications [7]. Over 44,000 articles have been reported according to Scopus and Web of Science. Some great CD evaluations of food science have emerged in tandem with the rapid growth of CD research [2,8]. CDs have been employed for a range of purposes because of their biocompatibility, biodegradability, and very inexpensive manufacture [9]. Given their adaptability, they may be used as excipients in a variety of industries, including biotechnology, agriculture, chemicals, cosmetics, and the food sector. Additionally, CDs have been used as antigen vectors, vaccination adjuvants, antibody stabilizers, and antiviral activity enhancers, as well as to improve medication solubility and bioavailability [10]. Studies on their toxicity have also revealed that CDs are safe to use orally [11]. For β-CD, the acceptable daily consumption has been established to be between 0 and 0.5 mg per kg of body weight, however the acceptable daily intake for α- and γ-CD is not indicated [12,13]. Both α-CD and β-CD function as dietary fibers that contribute to regulating blood lipids and body weight. While γ-CD is easily broken down, α-CD and β-CD are largely resistant to digestion by human amylase enzymes in the digestive system [14]. Furthermore, more than 10,000 metric tons of cyclodextrins are annually produced, with β-cyclodextrin accounting for 70 %, α-cyclodextrin 15 %, γ-cyclodextrin 5 %, and various cyclodextrin derivatives 10 % [15]. The increasing applications of CDs across various industries are driving market demand, which is projected to reach approximately $390 million by 2027 [6].

2. Materials and methods

The search for literature in the Web of Science database was conducted using the keywords "β- cyclodextrin" or "cyclodextrin". In the Web of Science and Scopus, 51,085 research, review articles, book chapters, letters and conferences were identified for this review (Figure 1). The main goal of the present study is to have a detailed overview of the knowledge gained over the years regarding cyclodextrin. The structure, source, manufacture, and features of cyclodextrin were thoroughly covered. Additionally, possible applications of cyclodextrin in various food industries as well as its advantages for improving health were covered.

3. Production of cyclodextrins

When starch is broken down by the enzyme cyclodextrin glucanotransferase (CGTase), cyclodextrins (CDs) are produced as a result of the initiation of the intramolecular glucose conversion pathway [16]. Nevertheless, a mixture of cyclodextrins with bigger rings and higher proportions of β-, α-, and γ-CDs is produced by all known CGTase enzymes [17]. Various enzymes, such as CGTase, dextranase, pullulanase, β-galactosidase, and isomaltase, can catalyze transglycosylation reactions. However, CGTase is preferred due to its advantages over alternative enzymes, which often suffer from lower yields, partial hydrolysis of glycosidic compounds, poor regioselectivity, and the formation of undesirable byproducts. In contrast, CGTase provides higher conversion yields of glycosylated products, exhibits minimal hydrolytic activity, demonstrates enhanced transglycosylation efficiency with specific acceptors and maintains high regioselectivity, specifically catalyzing α-(1→4)-glycosyl transfer reactions [6,18]. Currently, only two commercially available cyclodextrin glycosyltransferases (CGTases) exist. The first, Toruzyme, originates from *Thermoanaerobacter* sp. ATCC53627 and produces a mixture of cyclodextrins (CDs); it is marketed by Novozyme in Denmark. The second, Amano, is derived from *Paenibacillus macerans*, also yielding a CD mixture, and is distributed by Amano Enzyme Europe Ltd. in Milton, UK. This highlights the need for developing large-scale production processes for CGTases to meet increasing demand [6].

Cyclodextrin glucanotransferase is an extracellular enzyme that occurs in nature at the cellular level and is produced by a variety of microorganisms, including fungi, bacteria, and archaea. CGTases are a unique member of the α-amylase family, which have been isolated from a majority of *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Klebsiella*, *Thermoanaerobacterium*, *Geobacillus*, *Gracibacillus*, and *Actinomycetes* species [6,18]. Approximately 90 % of bacteria that produce CGTase belong to the genus *Bacillus*. Different fermentation techniques, including solid-state, submerged, and surface culture, as well as different modes of fermentor operations such as batch, fed-batch, and continuous fermentation, have been developed and utilized for the production and enhancement of various fermentation processes [19] as shown in Table 1.

The characteristics of the enzyme are mainly determined by the microorganism that produces it. Its mechanism is influenced by the production conditions. CGTases have been identified with a molecular mass ranging from 33 to 110 kDa. Additionally, based on their product specificity, CGTases are divided into three main classes: α-, β-, and γ-CGTases. The type and amount of cyclodextrin produced generally depends on several factors, including the source of cyclodextrin glucanotransferase, the substrate utilized, the incubation or reaction time, as well as temperature, pH, and the presence of complexing agents. As a result, researchers seek out or enhance CGTase enzymes to improve production yield and specificity [6,19] as shown in Table 2.

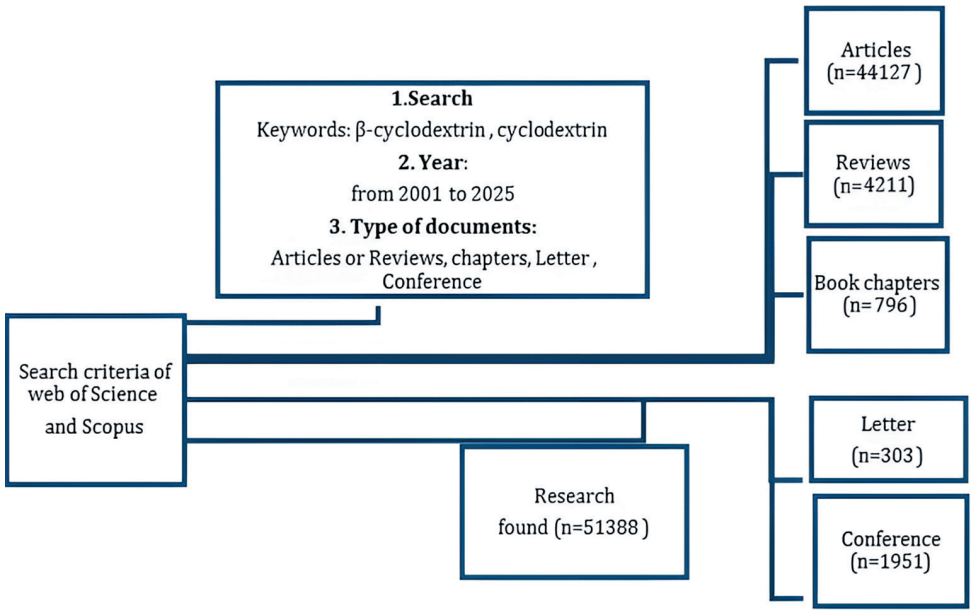


Figure 1. **Total of 51,388 research, review articles, book chapters, letters and conferences referred in paper by searching keywords "β-cyclodextrin" or "cyclodextrin" in the Web of Science and Scopus**

Рисунок 1. **В Web of Science и Scopus найдено 51388 исследований, обзорных статей, глав книг, писем и конференций с упоминанием ключевых слов «β-циклодекстрин» или «циклодекстрин»**

Table 1. **CGTase production by *Bacillus* spp. and other microorganism**

Таблица 1. **Продукция ЦГТазы бактериями рода *Bacillus* и другими микроорганизмами**

Microorganism	Optimal fermentation conditions				CD produced	References
	Substrate	pH	Temp. (°C)	Time (h)		
Bacillus circulans DF 9R	Cassava starch	8.3	37	48	β	[20]
Bacillus licheniformis	Soluble starch	8	37	24	B	[21]
B. pseudalcaliphilus 20RF[a]	Raw starch	9.8	40	24	β/Y	[22]
B. lehensis	Rice starch	10.5	37	24	β	[23]
Bacillus circulans	Cassava starch	7.6	37	48	β	[24]
Bacillus megaterium	Amaranth starch	8	50	36	β	[25]
Bacillus sp. NR5 UPM[e]	—	—	37	24	β/Y, α	[26]
B. circulans ATCC21783[a]	Soluble starch	9.8–10	40	24	β	[18]
B. macerans 15[a]	Potato starch	7	37	48	α	[18]
B. sphaericus 41[a]	Soluble starch	10.3	37	48	β	[18]
B. pseudalcaliphilus 8SB[a]	Soluble starch	9.8–10	40	24	β/Y	[18]
B. *halodurans*[a]	Soluble starch	10.5	37	72	β	[18]
B. agaradhaerens LS-3C[a]	Soluble starch	9	37	30	α/β	[18]
B. halophilus BIO-12H[a]	Potato starch	7–7.2	37	24–30	β/Y	[18]
Bacillus sp. T1[g]	Soluble starch	—	37	72	α/β	[27]
Evansella caseinilytica[c]	Soluble potato starch	9	37	48	Y	[6]

Table 2. **Optimal reaction parameters for maximizing CD production using cyclodextrin glucanotransferase**

Таблица 2. **Оптимальные параметры реакции для максимизации продукции ЦД посредством циклодекстринглюканотрансферазы**

Source of enzyme	Type of substrate	Temperature	pH	Time of reaction (h)	% of conversion or quantity	Ref.
Bacillus circulans DF 9R	Cassava starch	56	6.4	4	66%	[20]
Bacillus agaradhaerens KSU-A11	Potato starch	55	10	1	66.4%	[28]
Bacillus sp.	Starch of corn	50	7	3	4.1 g/L	[29]
Microbacterium terrae KNR9	Potato starch	60	6	1	13.46 gm/L	[30]
Bacillus licheniformis	Potato starch	40	6	4	12.41 mg/ml	[31]
Bacillus lincheniformis	Potato starch	45.2	5.6	24	5.65 mg/ml	[32]

4. Structure and properties of cyclodextrins

Cyclodextrins are formed by several glucose units joined together by oxygen atoms. These molecules have a hollow, truncated cone shape, with hydrogen bonds forming between secondary hydroxyl groups on adjacent units at the broad edge of the cavity [33]. The primary hydroxyl groups, composed of six glucose units, are located at the narrow end, while the secondary hydroxyl groups, made up of two and three glucose units, are positioned at the wide end. Due to their unique structure, cyclodextrins are highly soluble in water and contain hydrophobic cavities. This allows them to encapsulate hydrophobic compounds and form inclusion complexes without changing their structure or chemical makeup [2]. Cyclodextrins have a truncated cone shape with a hydrophilic outer wall and a less hydrophilic inner wall. The inner wall forms a more apolar internal cavity, which enables cyclodextrins to simultaneously host lipophilic guest molecules and make them soluble in water. This unique design allows for increased water solubility of lipophilic compounds when incorporated into cyclodextrins (Figures 2 and 3). Cyclodextrins have several benefits, including greater resistance to hydrolysis and enzymatic destruction, better complexing capabilities, and larger solubilizing potential compared to linear dextrins [34,38]. According to [35], a study was conducted on the structure of original CDs, and they found that although the outer part of CDs takes the shape of a truncated cone, the inner cavity takes the shape of a conical hourglass. The shape of cyclodextrins results from the inward emission of glycosidic oxygen. The hydrophobic inner cavity facilitates the formation of inclusion complexes with host molecules, primarily through van der Waals forces, hydrogen bonds, and hydrophobic interactions. These host-guest complexes are highly dynamic, with their stability depending on the size, polarity, and structure of the guest molecule in relation to the cavity. Cyclodextrins can accommodate hydrophobic molecules or portions of larger molecules, stabilizing them by isolating the encapsulated guest from the aqueous environment, which improves solubility, bioavailability, and resistance to degradation [36]. The flexibility and encapsulation ability of cyclodextrins enable for host-guest interactions, which alter the chemical, biological, and physical characteristics of the guest molecules [37]. According to [38], the three most common CDs are α, β, and γ, which are composed of six, seven, and eight glucose subunits with widths of 0.5, 0.6, and 0.8 nm, respectively. As seen in Table 3, the differences in their structures account for their disparate physical and chemical characteristics. Additionally, the chemical properties of cyclodextrins can be modified through functionalization of the hydroxyl groups to form derivatives (e. g., hydroxypropyl-β-cyclodextrin, methylated cyclodextrins), allowing for tailored properties such as enhanced solubility, complexation efficiency, and targeted applications. Cyclodextrins are relatively thermally stable, with decomposition occurring at temperatures above 250 °C. This stability is linked to the glycosidic bonds in their glucose units. Due to their low toxicity, biocompatibility, and capacity to form stable complexes with a variety of organic, inorganic, and biological molecules, cyclodextrins have been studied extensively for their use as solubilizing agents, molecular encapsulants, and drug delivery systems [27].

Table 3. **The three natural CDs' physical and chemical characteristics**

Таблица 3. **Физические и химические свойства трех природных ЦД**

Physical and chemical properties	α-CD	β-CD	Y-CD	References
Glucose units	6	7	8	[33]
Molecular weight (kDa)	972.84	1134.98	1297.12	[19]
Chemical formula	$C_{36}H_{60}O_{30}$	$C_{42}H_{70}O_{35}$	$C_{48}H_{80}O_{40}$	[8]
Diameter of central cavity (nm)	0.57	0.78	0.95	[2]
Outer diameter (nm)	1.4–1.5	1.5–1.6	1.7–1.8	[8]
Melting point (°C)	275	280	275	[8]
pKa at 25 °C	12.3	12.2	12.1	[8]
Internal water molecules	6–8	11–12	13–17	[8]

α-CDs have smaller cavities, restricting their capacity to host a large number of molecules. They primarily accommodate smaller molecules compared to γ-CDs. Additionally, the payloads within hydrophobic CDs struggle to interact effectively, which complicates complex formation. The cavity of β-CDs, however, is more suitable for molecules like vitamins, hormones, and other substances typically used in tissue and cell culture applications. Because of these characteristics, β-CDs are often the preferred choice for complexing agents [39]. The structure of cyclodextrins has key features:

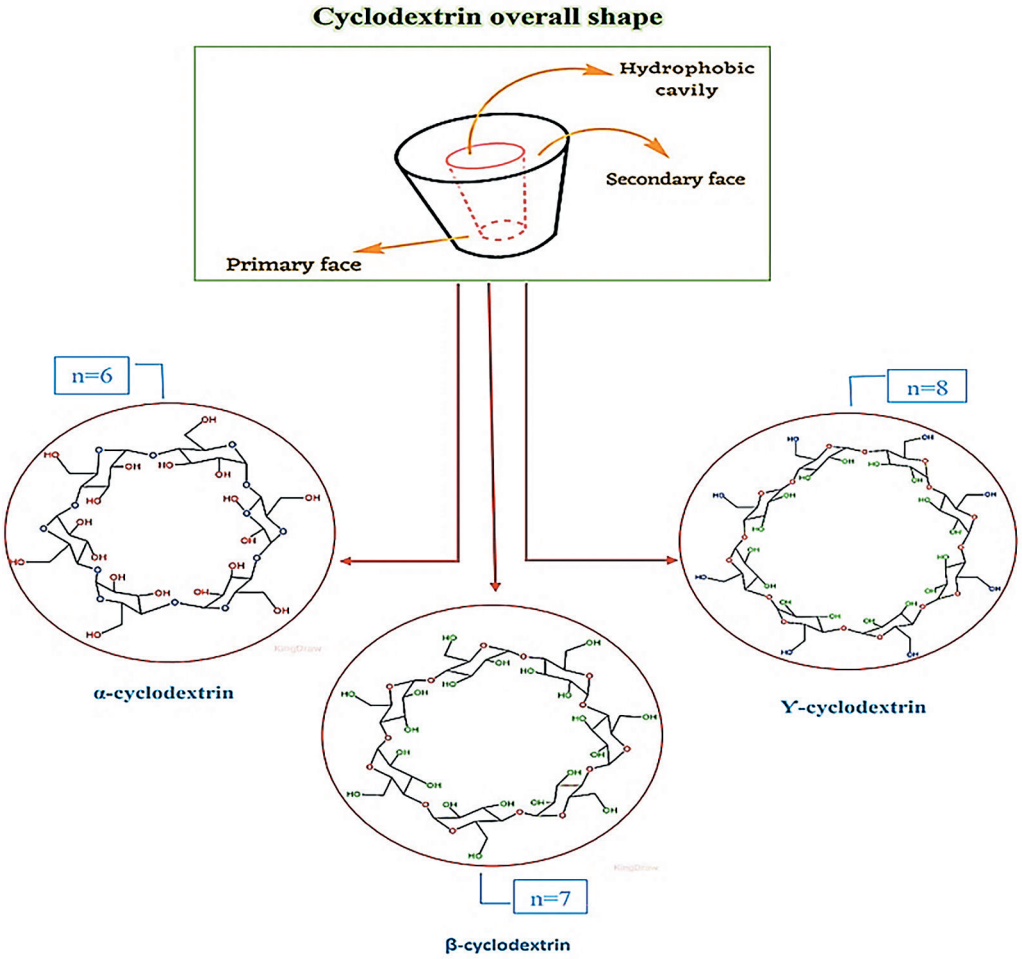


Figure 2. **Structure of cyclodextrins. Monomeric units of sugar molecules organized in rings are called cyclodextrins. The amount of sugar molecules (6, 7, or 8) determines the classification of the cyclodextrins as α, β, or Y, respectively**

Рисунок 2. **Структура циклодекстринов. Мономерные единицы молекул сахара, организованные в кольца, называются циклодекстринами. Количество молекул сахара (6, 7 или 8) определяет классификацию циклодекстринов как α, β или Y соответственно**

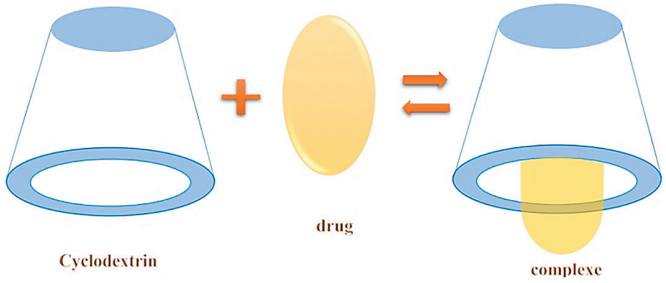


Figure 3. **Formation of cyclodextrin inclusion complexes**

Рисунок 3. **Образование комплекса с включением в полость циклодекстрина**

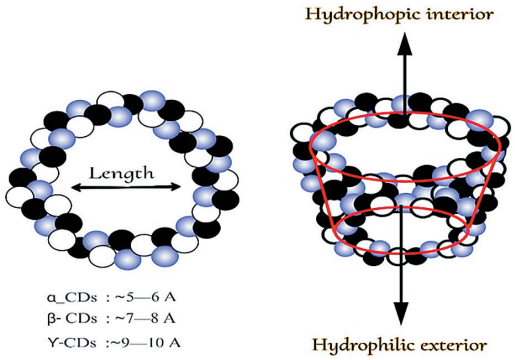


Figure 4. **Cyclodextrin schematic representations**

Рисунок 4. **Схематические изображения циклодекстринов**

1. Hydrophilic surface: The outer surface of cyclodextrin is composed of hydroxyl groups (–OH) attached to glucose units. The primary hydroxyl groups are positioned at the narrow end of the cone, particularly on carbon 6 of the glucose molecules, while the secondary hydroxyl groups are located on carbons 2 and 3 at the broad edge. This hydrophilic surface enables cyclodextrins to interact effectively with water, making them soluble in aqueous solutions [40].

2. Creation of a hydrophobic cavity: Within the ring structure, the hydrogen atoms and ether-like oxygen atoms in the glucose units contribute to forming a relatively nonpolar, hydrophobic cavity. This inner space can accommodate various hydrophobic guest molecules, making cyclodextrins excellent for encapsulation. The cavity's hydrophobic nature allows the inclusion of nonpolar substances while keeping the polar exterior exposed to the surrounding water [41,42] (Figure 4).

5. Characterization of CD inclusion complex

Encapsulation induces several notable changes in both host and guest molecules. The solubility of the guest molecules significantly increases, whereas the concentration of dissolved cyclodextrins (CDs) may remain unchanged or decrease depending on the solvent used. Additionally, the spectral properties of the encapsulated molecule, including UV absorption bands, fluorescence, and NMR spectra, undergo modifications. Encapsulation also reduces the reactivity and volatility of the guest molecule. Furthermore, hydrophobic guest molecules acquire hydrophilic characteristics, altering their mobility in chromatographic analyses [2,36].

Due to the importance of cyclodextrins complexes, different methods have been used to diagnose and study the properties of these complexes, such as spectroscopic (ultraviolet/visible, fluorescence, nuclear magnetic resonance, electrons spin resonance, Fourier-transform infrared), electroanalytical (polarography, voltammetry, conductimetry, potentiometry), separative (high-performance liquid chromatography, gas chromatography, thermal, differential scanning calorimetry (DSC), thermal gravimetric analysis, X-ray, single crystal X-ray diffraction, powder

X-ray diffraction, polarimetry [8,40]. These methods rely on variations in physical or chemical properties of the guest molecule useful for tracking complex formation [40]. A comprehensive set of advanced analytical techniques is employed to study and characterize inclusion complexes, providing a precise understanding of their structural and physicochemical properties. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) is a fundamental tool for analyzing these complexes by examining molecular vibrational energy level transitions, which reveal structural modifications and molecular interactions occurring during complex formation. In addition, nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy serves as an effective method for determining the molecular structure of inclusion complexes. This technique is based on the absorption of radiofrequency radiation by atomic nuclei in the presence of a strong magnetic field. The formation of an inclusion complex is confirmed by shifts in the chemical environment of nuclei, reflected in the NMR spectrum as changes in chemical shift values, which indicate interactions between the host and guest molecules. Furthermore, X-ray diffraction (XRD) is a crucial technique for detecting structural modifications associated with the formation of inclusion complexes. This method relies on analyzing diffraction patterns generated by the crystalline lattice of materials when exposed to X-rays. The presence of distinct diffraction peaks, which differ significantly from those of the original functional ingredient, serves as strong evidence of complex formation, confirming changes in the crystalline structure resulting from molecular encapsulation. Beyond spectroscopic and structural analyses, thermal analysis techniques provide critical insights into the thermodynamic properties of inclusion complexes. Thermal analysis is used to investigate the relationship between a substance's physicochemical properties and its thermal-induced transformations, such as phase transitions, melting, decomposition, and oxidation. These changes are monitored by measuring variations in mass or energy under controlled temperature conditions. The most commonly employed thermal analysis techniques include differential thermal analysis (DTA), thermogravimetric analysis (TGA), and differential scanning calorimetry (DSC). These methods allow for qualitative and quantitative assessments of the crystallinity of substances during the melting process, offering valuable information about the thermal stability and phase behavior of inclusion complexes with high precision [8].

6. Types of cyclodextrins

Cyclodextrin glucanotransferase catalyzes four reactions: hydrolysis, cyclization, coupling, and disproportionation. This is achieved by breaking α-1,4-glycosidic bonds found within the inner part of a polysaccharide chain. Among these reactions, cyclization is the specific enzymatic process that produces three types of cyclodextrins (CDs) from starch and its derivatives [18,19], including:

6.1. Alpha-cyclodextrin (α-CD)

α-Cyclodextrin is composed of six glucose units, with a molecular weight of 972.84 Da and a chemical formula $C_{36}H_{60}O_{30}$. Due to its narrow cavity and strong resistance to enzymatic hydrolysis, α-cyclodextrin is utilized in various industries, especially in the food sector. At 25 °C, α-cyclodextrin exhibits moderate water solubility, approximately 1.6 times lower than γ-CD but several times higher than β-CD. Its limited digestibility and lower risk of causing indigestion make it suitable for use in large quantities. Several chemical derivatives of α-CD have been developed through modifications of its hydroxyl groups. For example, cyclodextrin glycosyltransferase catalyzes the enzymatic conversion of starch or its derivatives into α-CD. However, α-CD holds a smaller market share compared to β-CD, largely due to its higher cost and lower yield [43,44].

6.2. Beta-cyclodextrin (β-CD)

β-Cyclodextrin is a chemical compound with the formula $C_{42}H_{70}O_{35}$ and a molecular weight of 1135 Da. Its cavity size is ideal for accommodating many drugs with molecular weights ranging from 200 to 800 Da, and its melting point can exceed 280 °C [45]. Composed of seven glucose units, β-CD has a stable average cavity size, enabling it to form complexes with a variety of guest molecules efficiently and at a reasonable cost. Among the three types of cyclodextrins, β-CD has the lowest solubility and the strongest hydrogen bond strength, owing to the flexible hydroxyl groups located on its narrow edges, which facilitate hydrogen bond formation [36,44].

6.3. Gamma-cyclodextrin (γ-CD)

γ-CD has a molecular weight of 1297 Da and the chemical formula $C_{48}H_{80}O_{40}$. It consists of eight glucose subunits connected end-to-end by α-1,4 bonds, forming a tapered cylinder with 8 primary alcohol groups on one side and 16 secondary alcohol groups on the other side [36,46]. Cyclodextrin's inner core is hydrophobic, while its outside surface is moderately hydrophilic. γ-CD has the largest cavity, making it well-suited to accommodate larger biomolecules and other guests, with maximum solubility and the best level of safety among the three CDs. However, the high expense associated with the manufacture and purification of enzymes restricts the large-scale production of γ-CD [44].

7. Application of CDs

There are a variety of applications for CDs and their derivatives in the food, cosmetics, and pharmaceutical industries (Figures 5 and 6), though they are more prevalent in the food industries [11].

In the food industry, CDs are usually used as an adjuvant, a technological tool that improves the physical and chemical characteristics of food components. For instance, they can be used to stabilize aroma and flavor compounds, polyunsaturated fatty acids (PUFAs), and poorly water-soluble vitamins and nutrients. This allows the complex food components made of cyclodextrin to be incorporated into automated food processing systems on an industrial scale. Additional examples include taste masking and the elimination of undesirable ingredients like cholesterol from dairy products and eggs [9,40,46]. Cholesterol and CDs can combine to create inclusion complexes, which trap the cholesterol molecule inside the CD cavity. This complexation makes cholesterol more soluble, which

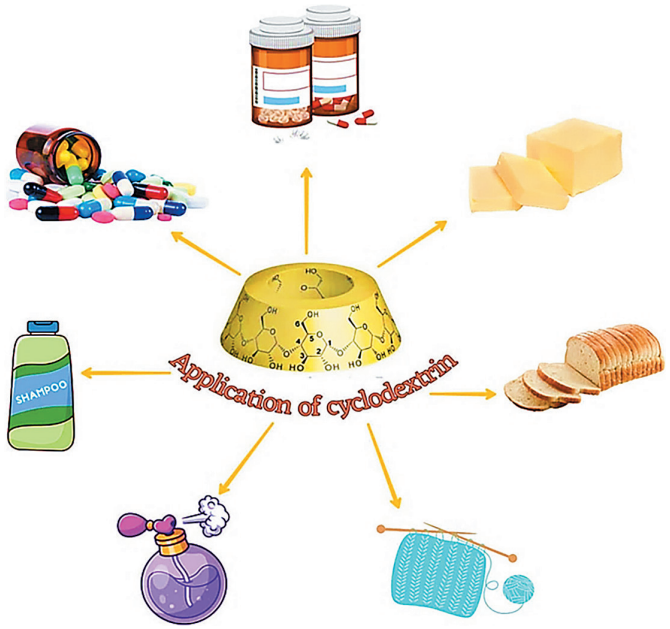


Figure 5. **CDs and their derivatives' applications**
Рисунок 5. **Применение ЦД и их производных**

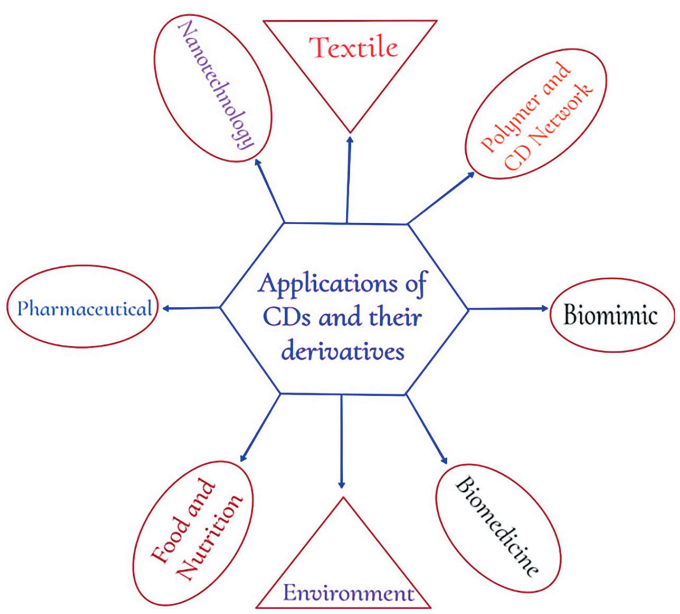


Figure 6. **Applications of cyclodextrins**
Рисунок 6. **Применение циклодекстринов**

may make it easier for the body to eliminate it. A cross-linked cyclodextrin made with adipic acid was employed to reduce the cholesterol content in butter. The treatment, which involved 10% cross-linked cyclodextrin, achieved a 90% reduction in cholesterol levels. Additionally, no significant adverse effects on the chemical, rheological, or sensory properties of the butter or cheese were observed [47]. Cyclodextrin has also been used in various hydrocolloids such as carrageen or starch, which has shown significant improvement in the properties and characteristics of the hydrocolloids. When combined with xanthan or guar gum, CDs can improve the viscosity of both hydrocolloids [40]. Additionally, microbial contamination can be removed using cyclodextrins [27]. Cyclodextrins are used in active packaging to improve food preservation by controlling the release of active substances like antioxidants, antimicrobials, and flavor compounds. They can encapsulate antioxidants such as ascorbic acid or tocopherols to prevent oxidation and spoilage of packaged food products. This type of packaging allows for a controlled release of compounds, allowing them to be released slowly over time, thus prolonging the shelf life of foods such as meat, oils and dairy products. Additionally, cyclodextrins can trap natural antimicrobial agents like essential oils (e. g., thyme, oregano) or bioactive compounds (e. g., nisin, lysozyme) in their hydrophobic cavity, helping to gradually release them. This gradual release inhibits microbial growth, thereby preventing foodborne illness and spoilage [48].

According to reports, bitter gourd (*Momordica charantia* L.) is useful for diabetes. The addition of β-CD to bitter gourd juice enhances its palatability, which suggests that it might be used as an additional treatment for diabetes. Momordicoside K and momordicoside L, two triterpene glycosides, are the active components of bitter gourd that give it its bitter flavor. It has been demonstrated that β-CD improves antioxidant activity and lessens bitterness, which increases consumer acceptability [9].

Through binding certain pigment compounds, such as anthocyanin, or the substrate of an enzymatic reaction, like phenolic compounds in the case of enzymatic browning, CDs have been used to either improve the stability of natural colorants in food during food processing and storage, or to prevent the formation of browning reactions [49]. Food-related activities that can be stopped using CDs include oxidation, light-induced reactions, heat-promoted breakdown, self-decomposition, and loss caused by volatility or sublimation [11].

CDs can be used to lower off-flavors. According to [50], authors investigated the impact of β-CD at concentrations of 0.05% — 0.25% on watermelon juice heat treatment in combination with other polymers. Of all the polymers analyzed, β-CD was found to be the most effective in reducing off-flavors after heat treatment. They also noted that the timing of β-CD addition had a significant effect, with addition after heat treatment being more effective in reducing off-flavors than addition before treatment [49].

Cyclodextrins improve the water absorption capacity of flour due to their numerous hydroxyl groups, which can form hydrogen bonds with water molecules. This reduces the availability of water, which in turn affects the formation of the gluten network. Consequently, changes in the dough's mixing and extensibility properties may occur. Additionally, CD can increase the proportion of α-helix in gluten protein and reduce the proportion of β-sheet, indicating that the secondary structure of gluten protein was affected by CD [51].

In the cosmetics industry, CDs are used in cosmetics products to extend their shelf life, stabilize volatile chemical ingredients, lessen offensive tastes or smells, and prevent or lessen topical irritation. CDs are widely used in treatments for dermatitis, psoriasis, acne, sun protection, and wound healing, as well as in deodorants and shampoos [49]. The cosmetics industry uses bioactive chemicals derived from natural sources because they often have a higher safety profile than synthetic ones. Even though their biological actions have been scientifically shown, they are difficult to handle, which limits their usage and activity. The bioavailability, solubility, and stability are among the problems that are resolved by using the CDs [39].

CDs are used in medicine as either therapeutic substances or excipients that improve the solubility and stability of drugs [5,52]. CDs and their derivatives provide advantages including enhancing the bioavailability and efficacy of current medications, which leads to a variety of applications in the pharmaceutical industry. Beta-cyclodextrin is a fundamental component in many pharmaceutical formulations, primarily used to enhance the solubility and bioavailability of drugs with poor water solubility. This compound forms inclusion complexes with pharmaceutical molecules, thereby facilitating increased drug absorption in the body. Additionally, it is employed to reduce irritation caused by certain drugs when applied topically or administered orally. Furthermore, beta-cyclodextrin plays a role in stabilizing drugs sensitive to environmental factors such as light and heat, prolonging their shelf life and maintaining their efficacy [41,53,54]. There are already more than 50 medicinal items on the market that include CDs [55].

The most important cyclodextrin in the pharmaceutical and medical industries is the β-CD, which is also the most often utilized. The popularity of cavity can be attributed to its ideal size for many common pharmaceutical drugs with molecular weights ranging from 200 to 800 g/mol, its straightforward production process, availability in pure form, efficient drug complexation capabilities, relatively low cost, and its ability to both enhance drug efficacy and reduce toxicity. Though it has some drawbacks over α-CD and γ-CD, such as reduced solubility in water, the β-CD makes up over 90% of all cyclodextrins that are made and ingested [40]. According to biosafety studies, CDs are useful for delivering lipophilic pharmaceuticals since they have helped to lessen the harmful side effects of numerous medications that arise from their poor solubility. CDs assist in controlled drug release, which can be regulated by solubility, osmotic pressure, or pH control [41,56]. CDs may help reduce the side effects of drugs that cause irritation or have a bitter taste or unpleasant smell [57].

The compressed tablets provide effective protection that enhances the stability of antioxidants and UV filters when exposed to sunlight and oxygen. In addition, studies have shown that these tablets can significantly increase the water solubility of poorly soluble antioxidants, enhancing their biological efficacy, particularly in the field of anti-cancer [53].

Since cyclodextrin may combine with drugs to create inclusion complexes, it is a useful tool in the development of more potent anti-cancer chemotherapy regimens. Many studies have examined the insertion of conventional medications or naturally occurring bioactive substances into CDs' cavities in an effort to better understand their effects on various cancer cell lines in vitro or as in vivo therapeutic possibilities in animal models [53,58].

Cyclodextrins (CDs) and their derivatives are widely used in various applications in analytical chemistry, particularly in analytical separations, due to their ability to distinguish between positional isomers, functional groups, homologues, and enantiomers. They are utilized in a range of applications, including chromatography, wastewater treatment, and other separation techniques [11]. A recent study has highlighted the potential of CD derivatives as vehicles for siRNA delivery. While a few of these derivatives have been approved for human use, others, such as TRIMEB (heptakis-2,3,6-tris-O-methyl β-CD) and SBE-β-CD (sulfobutylether β-CD), remain in the experimental phase [59].

Cyclodextrins have received wide attention due to their environmental applications, as they have the ability to form entrapment complexes with a variety of hydrophobic organic pollutants. These compounds have a unique structure, including a hydrophilic outer surface and a hydrophobic interior, which enables cyclodextrins to trap and remove pollutants from water, soil, and air. This makes them of great interest in the fields of environmental remediation and green chemistry [60]. Environmental scientists use CDs in several areas, such as enhancing the solubilization of organic pollutants and removing contaminants from wastewater, soil, and air. Since CDs are inexpensive and biodegradable, their usage in this industry is favored [6]. Through the use of chemistry with stimulating chemicals, such as functional golden nanotechnologies coupled with β-cyclodextrin, β-CD has been effectively used to eliminate organic contaminants, such as aromatic nitrogen. These nanoparticles produced with β-cyclodextrin may pave the way for the removal of pollutants from aquatic settings [61]. CDs are also useful for delaying seed germination. Grain treated with β-CD has a 20% to 45% higher harvest percentage because a part of the amylases that break down the starch storage in the seeds is inhibited [57].

In recent years, there have been a lot of research on the use of β-CD to encapsulate volatile materials with unstable chemical and physical characteristics, like essential oils [62]. Moreover, β-CD has been shown to be highly effective in improving the delivery characteristics of processed composite components in food systems, as well as in altering the density and texture of food products to enhance their mouthfeel.

The unique structural properties of cyclodextrins enable them to form inclusion complexes with a variety of guest molecules, including organic pollutants, pesticides, dyes, pharmaceuticals, and hydrocarbons. Cyclodextrins act as molecular sponges in water treatment, effectively trapping pollutants within their cavities. This process occurs through non-covalent interactions, such as hydrogen bonding, van der Waals forces, and hydrophobic interactions. When cyclodextrins are introduced to polluted water, they encapsulate contaminants within their cavities, forming stable inclusion complexes. This mechanism reduces the concentration of pollutants in the surrounding water, making cyclodextrins a powerful tool for decontamination. One notable advantage of using cyclodextrins in these applications is their reusability. These molecules can often be

regenerated and used multiple times, enhancing their cost-effectiveness in water treatment processes. Recent advancements have highlighted their potential across various scenarios of contaminant adsorption, showcasing their versatility and practicality [63].

8. Conclusion, prospective future, and suggestions for more research

The use of cyclodextrins (CDs) and their derivatives has expanded significantly in recent years, due to their diverse applications in food, cosmetics, and pharmaceuticals. The main reason behind their widespread use is their ability to form host-guest complexes with various chemicals. These complexes are formed as a result of the unique structural properties of cyclodextrins, such as their hydrophobic cavities. Moreover, the CDs can contribute to improved water solubility, as well as enhanced physical and chemical properties and the capacity to introduce various compounds. Molecular encapsulation with cyclodextrins can extend the shelf life of products by improving the physical and chemical stability of flavors, vitamins, pigments, unsaturated fats, and other lipophilic compounds. Additionally, this technique improves sensory qualities and aids in avoiding microbial contamination. Furthermore, CDs are regarded as advantageous nutrients and biologically active dietary supplements. Due to their low toxicity, these tablets may be utilized without endangering human health, leading to healthier products that are less likely to deteriorate.

The current uses of CDs emphasize the increasing demand for CD-based products in the future. The global CD market is expected to expand due to the substantial number of patents related to CD techniques and applications. Projections indicate that the market will grow from $180 million in 2019 to $210 million by 2024, eventually reaching approximately $390 million by 2027. The continued dominance of CDs in the market relies on the availability of robust CGTase enzymes with high product specificity.

REFERENCES

1. Ogunbadejo, B., Al-Zuhair, S. (2021). MOFs as potential matrices in cyclodextrin glycosyltransferase immobilization. *Molecules*, 26(3), Article 680. http://doi.org/10.3390/molecules26030680
2. Cid-Samamed, A., Rakmai, J., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J., Astray, G. (2022). Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. *Food Chemistry,* 384, Article 132467. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132467
3. Pardhi, D. S., Rabadiya, K. J., Panchal, R. R., Raval, V. H., Joshi, R. G., Rajput, K. N. (2023). Cyclodextrin glucanotransferase: Fundamentals and biotechnological implications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(19), 5899–5907. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12708-9
4. Lambré, C., Barat Baviera, J. M., Bolognesi, C., Cocconcelli, P. S., Crebelli, R., Gott, D. M. et al. (2023). Safety evaluation of the food enzyme cyclomaltodextrin glucanotransferase from the non-genetically modified *Anoxybacillus caldiproteolyticus* strain TCM3-539. *EFSA Journal*, 21(2), Article e07842. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7842
5. Lachowicz, M., Stańczak, A., Kołodziejczyk, M. (2020). Characteristic of cyclodextrins: Their role and use in the pharmaceutical technology. *Current Drug Targets,* 21(14), 1495–1510. https://doi.org/10.2174/1389450121666200615150039
6. Saini, K., Pathak, V. M., Tyagi, A., Gupta, R. (2022). Microbial cyclodextrin glycosyltransferases: Sources, production, and application in cyclodextrin synthesis. *Catalysis Research,* 2(3), 1–69. http://doi.org/10.21926/cr.2203029
7. Muldakhmetov, Z., Fazylov, S., Nurkenov, O., Gazaliev, A., Sarsenbekova, A., Pustolaikina, I. et al. (2022). Combined computational and experimental studies of anabasine encapsulation by beta-cyclodextrin. *Plants,* 11(17), Article 2283. https://doi.org/10.3390/plants11172283
8. Liu, Y., Chen, Y., Gao, X., Fu, J., Hu, L. (2022). Application of cyclodextrin in food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* 62(10), 2627–2640. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1856035
9. Tian, B., Hua, S., Tian, Y., Liu, J. (2021). Cyclodextrin-based adsorbents for the removal of pollutants from wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research,* 28(2), 1317–1340. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11168-2
10. Jicsinszky, L., Martina, K., Cravotto, G. (2021). Cyclodextrins in the antiviral therapy. *Journal of Drug Delivery Science and Technology,* 64, Article 102589. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102589
11. Gonzalez Pereira, A., Carpena, M., García Oliveira, P., Mejuto, J. C., Prieto, M. A., Simal Gandara, J. (2021). Main applications of cyclodextrins in the food industry as the compounds of choice to form host–guest complexes. *International Journal of Molecular Sciences,* 22(3), Article 1339. https://doi.org/10.3390/ijms22031339
12. Zhang, Z., Niu, J., Wang, J., Zheng, Q., Miao, W. Lin, Q. et al. (2024). Advances in the preparation and application of cyclodextrin derivatives in food and the related fields. *Food Research International*, 95, Article 114952. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114952
13. FDA. GRAS Notice GRN No. 155 Alpha-Cyclodextrin. Retrieved from https://www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=GRASNotices&id=155 Accessed February 18, 2021.
14. Jødal, A. S. S., Czaja, T. P., van den Berg, F. W., Jespersen, B. M., Larsen, K. L. (2021). The effect of α-, β-and γ-Cyclodextrin on wheat dough and bread properties. *Molecules*, 26(8), Article 2242.
15. Hu, Y., Qiu, C., Julian McClements, D., Qin, Y., Long, J., Jiao, A. et al. (2022). Encapsulation, protection, and delivery of curcumin using succinylated-cyclodextrin systems with strong resistance to environmental and physiological stimuli. *Food Chemistry,* 376, Article 131869. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131869
16. Bera, H., Layek, B., Singh, J. (2021). Tailor-Made and Functionalized Biopolymer Systems. For Drug Delivery and Biomedical Applications. Woodhead Publishing, 2021.
17. Wang, L., Xia, Y., Su, L., Wu, J. (2020). Modification of *Bacillus clarkii* γ-cyclodextrin glycosyltransferase and addition of complexing agents to increase γ-cyclodextrin production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 68(43), 12079–12085. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c05408
18. Lim, C. H., Rasti, B., Sulistyo, J., Hamid, M. A. (2021). Comprehensive study on transglycosylation of CGTase from various sources. *Heliyon*, 7(2), Article e06305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06305
19. Pereia, A. G., Carpena, M., Oliveira, P. G., Mejuto, J. C., Prieto, M.. A., Gandara, J. S. (2023). Main applications of cyclodextrins in the food industry as the compounds of choice to form host–guest complexes. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 1339–1362. https://doi.10.3390/ijms22031339
20. Szerman, N., Schroh, I., Rossi, A. L., Rosso, A. M., Krymkiewicz, N., Ferrarotti, S. A. (2007). Cyclodextrin production by cyclodextrin glycosyltransferase from *Bacillus circulans* DF 9R. *Bioresource Technology*, 98(15), 2886–2891. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.056
21. Sivakumar, N., Banu, S. (2011). *Standardization of optimum conditions for cyclodextrin glycosyltransferase production.* International Conference on Food Engineering and Biotechnology. IACSIT Press, Singapore, 2011.
22. Atanasova, N., Kitayska, T., Bojadjieva, I., Yankov, D., Tonkova, A. (2011). A novel cyclodextrin glucanotransferase from alkaliphilic *Bacillus pseudalcaliphilus* 20RF: Purification and properties. *Process Biochemistry,* 46(1), 116–122. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.07.027
23. Elbaz, A. F., Sobhi, A., ElMekawy, A. (2015). Purification and characterization of cyclodextrin b-glucanotransferase from novel alkalophilic bacilli. *Bioprocess and Biosystems Engineering,* 38(4), 767–776. https://doi.org/10.1007/s00449-014-1318-y
24. Costa, H., Gastón, J. R., Lara, J., Martinez, C. O., Moriwaki, C., Matioli, G. et al. (2015). Cyclodextrin glycosyltransferase production by free cells of *Bacillus circulans* DF 9R in batch fermentation and by immobilized cells in a semi-continuous process. *Bioprocess and Biosystems Engineering,* 38(6), 1055–1063. https://doi.org/10.1007/s00449-014-1347-6
25. Arce-Vázquez, M. B., Ponce-Alquicira, E., Delgado-Fornué, E., Pedroza-Islas, R., Díaz-Godínez, G., Soriano-Santos, J. (2016). Integral use of amaranth starch to obtain cyclodextrin glycosyltransferase, by *Bacillus megaterium* to produce β-Cyclodextrin. *Frontiers in Microbiology,* 7, 1–11. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01513
26. Nik-Pa, N. I. M., Sobri, M. F. M., Abd-Aziz, S., Ibrahim, M. F., Kamal Bahrin, E., Mohammed Alitheen, N. B. et al. (2020). Combined optimization of codon usage and glycine supplementation enhances the extracellular production of a β-Cyclodextrin glycosyltransferase from *Bacillus* sp. NR5 UPM in Escherichia coli. *International Journal of Molecular Sciences,* 21(11), Article 3919. https://doi.org/10.3390/ijms21113919
27. Liu, Z., Wu, G., Wu, H. (2022). Molecular cloning, and optimized production and characterization of recombinant cyclodextrin glucanotransferase from *Bacillus* sp. T1. *3 Biotech,* 12(3), Article 58. https://doi.org/10.1007/s13205-022-03111-8
28. Ibrahim, A. S. S., El-Tayeb, M. A., Elbadawi, Y. B., Al-Salamah, A. A. (2011). Effects of substrates and reaction conditions on production of cyclodextrins using cyclodextrin glucanotransferase from newly isolated *Bacillus agaradhaerens* KSU-A11. *Electronic Journal of Biotechnology,* 14(5), 1–12. https://doi.org/10.2225/vol14-issue5-fulltext-4
29. Sánchez, K. H., Martínez Mora, M. M., Ramírez, H. L. (2014). Production and characterization of cyclodextrin glycosyltransferase from *Bacillus* sp. isolated from Cuban soil. *ScienceOpen Research*, 0(0), 1–6. https://doi.org/10.14293/s2199-1006.1.sor-chem.asglim.v1
30. Rajput, K. N., Patel, K. C., Trivedi, U. B. (2016). β-Cyclodextrin production by cyclodextrin glucanotransferase from an alkaliphile *Microbacterium terrae* KNR9 using different starch substrates. *Biotechnology Research International,* 2016, 1–7. https://doi.org/10.1155/2016/2034359
31. Che Man, R., Md. Shaarani-Nawi, S., Mohd Arshad, Z. I., Abdul Mudalip, S. K., Sulaiman, S. Z., Ramli, A. N. M. (2020). Effect of reaction parameters on the production of cyclodextrin using cyclodextrin glucanotransferase from *Bacillus licheniformis*. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 6(1), 39–45. https://doi.org/10.15282/jceib.v6i1.4531
32. Suhaimi, S., Man, R. C., Jamil, N., Arshad, Z. I. M., Shaarani, S. M., Mudalip, S. K. A. et al. (July 17–19, 2019). *Optimization of reaction conditions for the production of cyclodextrin (CD) using cyclodextrin glucanotransferase (CGTase) immobilized on hollow fiber membrane.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Energy Security and Chemical Engineering Congress, Kuala Lumpur, Malaysia. IOP Publishing Ltd, 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899x/736/4/042005
33. Jansook, P., Ogawa, N., Loftsson, T. (2018). Cyclodextrins: Structure, physicochemical properties and pharmaceutical applications. *International Journal of Pharmaceutics*, 535(1–2), 272–284. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.11.018
34. Wüpper, S., Lüersen, K., Rimbach, G. (2021). Cyclodextrins, natural compounds, and plant bioactives — a nutritional perspective. *Biomolecules,* 11(3), Article 401. https://doi.org/10.3390/biom11030401
35. Sandilya, A. A., Natarajan, U., Priya, M. H. (2020). Molecular view into the cyclodextrin cavity: Structure and hydration. *ACS Omega,* 5(40), 25655–25667. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02760

36. Satpute, G.M., Ghatbandhe, N.H., Meshram, P. (2023). An overview on cyclodextrin and its derivatives encapsulated inclusion complex: Preparation methods and influencing factors. *International Journal for Multidisciplinary Research,* 5(6), 1–10. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i06.10688
37. Esteso, M. A., Romero, C. M. (2024). Cyclodextrins: Properties and applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(8), Article 4547. https://doi.org/10.3390/ijms25084547
38. Muñoz-Shugulí, C., Vidal, C. P., Cantero-López, P., Lopez-Polo, J. (2021). Encapsulation of plant extract compounds using cyclodextrin inclusion complexes, liposomes, electrospinning and their combinations for food purposes. *Trends in Food Science and Technology*, 108, 177–186. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.020
39. Suvarna, V., Bore, B., Bhawar, C., Mallya, R. (2022). Complexation of phytochemicals with cyclodextrins and their derivatives-an update. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 149, Article 112862. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112862
40. Matencio, A., Navarro-Orcajada, S., García-Carmona, F., López-Nicolás, J. M. (2020). Applications of cyclodextrins in food science. A review. *Trends in Food Science and Technology*, 104, 132–143. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.009
41. Aiassa, V., Garnero, C., Longhi, M. R., Zoppi, A. (2021). Cyclodextrin multicomponent complexes: Pharmaceutical applications. *Pharmaceutics,* 13(7), Article 1099. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13071099
42. Menezes, P. dos P., Andrade, T. de A., Frank, L. A., de Souza, E. P. B. S. S., Trindade, G. das G. G., Trindade, I. A. S. et al. (2019). Advances of nanosystems containing cyclodextrins and their applications in pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics,* 559, 312–328. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.01.041
43. Saini, K., Kashyap, A., Saini, M., Gupta, R. (2022). Gamma cyclodextrin glycosyltransferase from evansella caseinilytica: Production, characterization and product specificity. *3 Biotech,* 12(1), Article 16. https://doi.org/10.1007/s13205-021-03077-z
44. Zhou, J., Jia, J., He, J., Li, J., Cai, J. (2022). Cyclodextrin inclusion complexes and their application in food safety analysis: Recent developments and future prospects. *Foods*, 11(23), Article 3871. https://doi.org/10.3390/foods11233871
45. Fatima, N., Khalid, S. H., Liaqat, K., Zulfiqar, A., Munir, R. (2023). Beta-cyclodextrin: A cyclodextrin derivative and its various applications. *Polymer Science: Peer Review Journal*, 4(5), Article 000597. https://doi.org/10.31031/psprj.2023.04.000597
46. Astray, G., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J. (2020). Latest developments in the application of cyclodextrin host-guest complexes in beverage technology processes. *Food Hydrocoll,* 106, Article 105882. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105882
47. Ganjali Koli, M., Fogolari, F. (2023). Exploring the role of cyclodextrins as a cholesterol scavenger: A molecular dynamics investigation of conformational changes and thermodynamics. *Scientific Reports,* 13(1), Article 21765. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49217-8
48. Liu, Y., Sameen, D. E., Ahmed, S., Wang, Y., Lu, R., Dai, J. et al. (2022). Recent advances in cyclodextrin-based films for food packaging. *Food Chemistry,* 370, Article 131026. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131026
49. Kelanne, N., Yang, B., Laaksonen, O. (2024). Potential of cyclodextrins in food processing for improving sensory properties of food. *Food Innovation and Advances,* 3(1), 1–10. https://doi.org/10.48130/fia-0024-0001
50. Yang, X., Yang, F., Liu, Y., Li, J., Song, H. (2020). Off-flavor removal from thermal-treated watermelon juice by adsorbent treatment with β-cyclodextrin, xanthan gum, carboxymethyl cellulose sodium, and sugar/acid. *LWT*, 131, Article 109775. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109775
51. Yang, L., Cai, J., Qian, H., Li, Y., Zhang, H., Qi, X. et al. (2022). Effect of cyclodextrin glucosyltransferase extracted from Bacillus xiaoxiensis on wheat dough and bread properties. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 1026678. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1026678
52. Braga, S.S. (2019). Cyclodextrins: Emerging medicines of the new millennium. *Biomolecules,* 9(12), Article 801. https://doi.org/10.3390/biom9120801
53. Dahabra, L., Broadberry, G., Le Gresley, A., Najlah, M., Khoder, M. (2021). Sunscreens containing cyclodextrin inclusion complexes for enhanced efficiency: A strategy for skin cancer prevention. *Molecules,* 26(6), Article 1698. https://doi.org/10.3390/molecules26061698
54. Rincón-López, J., Almanza-Arjona, Y. C., Riascos, A. P., Rojas-Aguirre, Y. (2021). Technological evolution of cyclodextrins in the pharmaceutical field. *Journal of Drug Delivery Science and Technology,* 61, Article 102156. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102156
55. Garrido, P. F., Calvelo, M., Blanco-González, A., Veleiro, U., Suárez, F., Conde, D. et al. (2020). The Lord of the NanoRings: Cyclodextrins and the battle against SARS-CoV-2. *International Journal of Pharmaceutics,* 588, Article 119689. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119689
56. Sharma, N., Baldi, A. (2016). Exploring versatile applications of cyclodextrins: An overview. *Drug Delivery*, 23(3), 729–747. https://doi.org/10.3109/10717544.2014.938839
57. Poulson, B. G., Alsulami, Q. A., Sharfalddin, A., El Agammy, E. F., Mouffouk, F., Emwas, A.-H. et al. (2022). Cyclodextrins: Structural, chemical, and physical properties, and applications. *Polysaccharides*, 3(1), 1–31. https://doi.org/10.3390/polysaccharides3010001
58. Păduraru, D. N., Niculescu, A.-G., Bolocan, A., Andronic, O., Grumezescu, A. M., Bîrlă, R. (2022). An updated overview of cyclodextrin-based drug delivery systems for cancer therapy. *Pharmaceutics,* 14(8), Article 1748. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081748
59. Seripracharat, C., Sinthuvanich, C., Karpkird, T. (2022). Cationic cyclodextrin-adamantane poly (vinyl alcohol)-poly (ethylene glycol) assembly for siRNA delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 68, Article 103052. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.103052
60. Rubin Pedrazzo, A., Smarra, A., Caldera, F., Musso, G., Dhakar, N. K., Cecone, C. et al. (2019). Eco-friendly β-cyclodextrin and Linecaps polymers for the removal of heavy metals. *Polymers*, 11(10), Article 1658. https://doi.org/10.3390/polym11101658
61. Rajamanikandan, R., Ilanchelian, M., Ju, H. (2023). β-cyclodextrin functionalized gold nanoparticles as an effective nanocatalyst for reducing toxic nitroaromatics. *Optical Materials,* 135, Article 113294. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113294
62. Sousa, V. I., Parente, J. F., Marques, J. F., Forte, M. A., Tavares, C. J. (2022). Microencapsulation of essential oils: A review. *Polymers*, 14(9), Article 1730. https://doi.org/10.3390/polym14091730
63. Urooj, T., Mishra, M., Pandey, S. (2024). Unlocking environmental solutions: A review of cyclodextrins in pollutant removal. *Discover Environment*, 2, Article 65. https://doi.org/10.1007/s44274-024-00090-w

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Huda A. Abd Alhussein, Postgraduate, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq Tel.: +964–771–620–36–17 E-mail: pgs.huda.ali@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9796-3758	**Абд Аль-Хусейн Х. А.** — аспирант, факультет пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры 61004, Ирак, Басра Тел.: +964–771–620–36–17 E-mail: pgs.huda.ali@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0009-0004-9796-3758
Alaa J. Abd Al-Manhel, Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq Tel.: +964–780–878–57–72 E-mail: alaa.abd@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6625-4287 * corresponding author	**Абд Аль-Манхел А. Д.** — профессор, факультет пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры 61004, Ирак, Басра Тел.: +964–780–878–57–72 E-mail: alaa.abd@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6625-4287 * автор для контактов
Contribution	**Критерии авторства**
Authors are equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-204-212

Received 14.04.2025
Accepted in revised 05.05.2025
Accepted for publication 12.05.2025
© Kurbanov G. F., Prichepa A. O., Nepomnyashchy A. P., Ivanova E. Yu., Sharova N. Yu., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

BIOTECHNOLOGY APPLICATIONS OF WHEAT BRAN. REVIEW

Gabdulla F. Kurbanov, Artem O. Prichepa, Anatoly P. Nepomnyashchy, Ekaterina Yu. Ivanova, Natalia Yu. Sharova*

All-Russia Research Institute for Food Additives, Saint Petersburg, Russia

KEY WORDS:
wheat bran, hydrolyzation, biosynthesis, fermentation, secondary raw materials, waste products, biopolymer

ABSTRACT

The review presents the results of information research on the application of wheat bran, a by-product of wheat grain processing. The relevance of this topic is due to the difficulties of rationally using large-scale waste and its disposal without increasing the load on the ecosystem.The chemical composition of wheat bran is characterised, including the carbohydrate composition and the content of non-starch carbohydrates and proteins; a qualitative analysis of the components is provided. Special attention is given to the use of wheat bran in industry and as a substrate for the biosynthesis of useful metabolites. Wheat bran has significant biotechnological properties and is a valuable raw material for the development of new products and technologies. The review provides a comparative analysis of methods for the destruction of wheat bran, highlighting their advantages and disadvantages. Microbial destruction by enzyme preparations and microorganisms is relevant due to the promise of obtaining metabolites in demand as microingredients for feed and food purposes. The use of wheat bran in the production of functional foods is known; in animal husbandry, they are used as a feed additive. In biotechnology, wheat bran can serve as a substrate for the growth of various microorganisms used in the production of biotechnological preparations and enzymes, such as beneficial bacteria — probiotics. In the field of ecology, microbial communities using wheat bran are able to effectively degrade organic pollutants. Thus, the use of wheat bran in biotechnology opens up new horizons for the development of sustainable technological processes and improvement of product quality. Their biotechnological destruction is of interest as a method of converting waste into secondary raw material.

FUNDING: The review was prepared as part of research under the state assignment FGUS-2022-0003 of the V. M. Gorbatov Research Centre for Food Systems of the Russian Academy of Sciences.

Поступила 14.04.2025
Поступила после рецензирования 05.05.2025
Принята в печать 12.05.2025
© Курбанов Г. Ф., Причепа А. О., Непомнящий А. П., Иванова Е. Ю., Шарова Н. Ю., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ. ОБЗОР

Курбанов Г. Ф., Причепа А. О., Непомнящий А. П., Иванова Е. Ю., Шарова Н. Ю.*

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
пшеничные отруби, гидролиз, биосинтез, ферментация, вторичное сырье, отходы, биополимер

АННОТАЦИЯ

В обзоре представлены результаты информационных исследований по направлению применения отхода переработки зерна пшеницы — пшеничных отрубей. Актуальность рассмотрения данной темы обусловлена трудностями рационального использования крупномасштабного отхода и его реализации без увеличения нагрузки на экосистему. Дана характеристика химического состава пшеничных отрубей, включая углеводный состав, содержание некрахмальных углеводов, белков, проведен качественный анализ компонентов; уделено отдельное внимание использованию пшеничных отрубей в промышленности и в качестве субстрата для биосинтеза полезных метаболитов. Пшеничные отруби обладают значительными биотехнологическими свойствами и являются ценным исходным материалом для разработки новых продуктов и технологий. В обзоре дан сравнительный анализ способов деструкции пшеничных отрубей, отражены их преимущества и недостатки. Микробиологическая деструкция под действием ферментных препаратов и микроорганизмов актуальна в связи с перспективностью получения метаболитов, востребованных в качестве микроингредиентов кормового и пищевого назначения. Известно применение пшеничных отрубей в производстве функциональных продуктов питания; в сфере животноводства они используются в качестве добавки в корм. В биотехнологии: пшеничные отруби могут служить субстратом для роста различных микроорганизмов, которые используются в производстве биотехнологических препаратов и ферментов, например, полезных бактерий — пробиотиков. В области экологии: микробные сообщества, использующие пшеничные отруби, способны эффективно разлагать органические загрязняющие вещества. Таким образом, использование пшеничных отрубей в биотехнологиях открывает новые горизонты для разработки устойчивых технологических процессов и улучшения качества продуктов, а их биотехнологическая деструкция представляет интерес в качестве способа перевода отхода в форму вторичного сырья.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Обзор подготовлен в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2022-0003 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

1. Introduction

The majority of industrial products and energy carriers in the world are produced using fossil fuels. However, the reserves of such resources as oil and gas are gradually depleting, which necessitates the transition of the global economy to a new model based on renewable resources. In the new technological system, biorefineries will play a key role, providing environmentally sustainable conversion of biomass into various commercial products and energy [1].

Wheat bran (WB) represents one of the key by-products of the flour milling industry and is the most prevalent type of bran among cereal crops. The growth of the world's population leads to an increase in flour milling production volumes, which in turn increases the amount of WB.

FOR CITATION: **Kurbanov, G.F., Prichepa, A.O., Nepomnyashchy, A.P., Ivanova, E. Yu., Sharova, N. Yu.** (2025). Biotechnology applications of wheat bran. Review. *Food Systems,* 8(2), 204–212. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-204-212

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Курбанов, Г. Ф., Причепа, А. О., Непомнящий, А. П., Иванова, Е. Ю., Шарова, Н. Ю.** (2025). Биотехнологическое применение пшеничных отрубей. Обзор. *Пищевые системы*, 8(2), 204–212. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-204-212

The high costs of WB transportation and their limited economic efficiency stimulate researchers to search for innovative and profitable methods of their utilization. According to various sources, WB is among the most common cereal crop residues (approximately 90 million tons per year [2]) due to the large market share obtained from wheat flour-based food products.

Wheat bran, like many other types of organic biomass obtained in the agricultural industry (such as stems, roots, sawdust, and wood waste), is increasingly being considered as a promising resource for further processing and utilization. This approach allows for the unlocking of their beneficial properties while simultaneously reducing the volumes of WB directed to landfilling or incineration.

Currently, WB primarily serves as animal feed (~90% of the total processed amount), while only a small portion (~10% of the total processed amount) is sold for culinary purposes or as dietary supplements [3]). However, WB contains a significant amount of carbohydrates and other macro- and microelements. In their natural state, they exhibit low biological availability, but additional processing procedures enable their consideration as a substrate for microbial cultivation [4]. Utilizing WB in this direction opens up a broad horizon for the production of numerous other compounds that can be applied both in the food industry and in other fields.

2. Objects and methods

The literature analysis was conducted using scientific search systems, namely PubMed and ScienceDirect. The literature search was performed using the following keywords: wheat bran, application of wheat bran, bioconversion of wheat bran.

Within the framework of this work, 107 scientific sources in English and Russian were analyzed.

Inclusion criteria:

- ❑ Published scientific articles.
- ❑ Publication period: 1985–2025.
- ❑ Publications from Scopus and WOS databases.
- ❑ Articles from official websites of specialized institutions: WHO (World Health Organization).

Exclusion criteria:

- ❑ Publications issued before 1985.
- ❑ Publications not included in the Scopus and WOS databases.
- ❑ The article's focus is on the use of wheat bran in industry, as well as the use of wheat bran as the main substrate source in microbial fermentation processes.

3. Wheat bran

Wheat (Triticum aestivum L.) is one of the most important cereal crops cultures, and refined wheat flour is widely used for cooking in almost every household. Wheat bran represents a by-product of the flour milling industry. The term "bran" denotes a complex fibrous structure that includes insoluble compounds such as xylans, lignin, cellulose, and hemicellulose, as well as soluble polysaccharides like galactans and fructans. Additionally, bran is rich in essential minerals such as iron, zinc, manganese, magnesium, and phosphorus [5]. Wheat bran contains both water-soluble (1.5–4%) and water-insoluble (35–48.4%) dietary fibers [6].

In the food industry, cereal crops are typically processed into flour, yielding a product output within the range of 70–80% of the initial grain weight, which depends on the crop variety, growing conditions, and the specifics of the milling process [7]. In this process, approximately 25% of the grain weight constitutes bran, the main by-product resulting from hulling and milling. Wheat bran represents the outer layers of wheat grain and consists of various tissues, including pericarp (fruit coat), testa (seed coat), hyaline layer, and aleurone layer, the latter belonging to the endosperm. Bran is characterized by histological and chemical heterogeneity, and the choice of methods for their processing to extract valuable components depends on the specific target tissue [8].

According to WHO report [9], the amount of wheat produced as of 2024 was projected to be approximately 780 million tons, accounting for slightly more than 27% of the total cereal production. If all the wheat were to be ground into flour, it would result in approximately 190 million tons of wheat bran alone. Such quantities of wheat bran require attention, as although they are a by-product, they represent a resource that can be utilized in production chains. The structure of a wheat grain is shown in Figure 1.

4. Chemical composition of wheat bran

The data on the composition of wheat bran, expressed as a percentage of dry matter, are presented in Table 1 [3].

Table 1. **Chemical composition of wheat bran (Dry matter basis, mass%) [3]**

Таблица 1. **Химический состав пшеничных отрубей в пересчете на сухое вещество (масса,%) [3]**

Proteins	Fat	Carbo-hydrates	Ash	Total dietary fibres	Crude fibres
14.4	2.3	64.0	1.9	12.1	2.9

Chemical composition of wheat bran is influenced by various factors, including the region of production and the type of wheat [10]. The second, equally important factor, includes the conditions and depth of grain processing. As a result, the content of various components may vary. This is due to the fact that different processing methods can remove different layers of bran, which will change the final composition [11]. At the same time, wheat bran can undergo further processing in various ways, which leads to an increase in the extracted substances [12].

When describing the chemical composition of wheat bran, it is possible to identify major components, the presence of which is mandatory, but may vary depending on various factors.

4.1. Carbohydrates in wheat bran

The carbohydrates in wheat bran include cellulose (30–50%), hemicellulose (15–35%), and lignin (10–25%) [13].

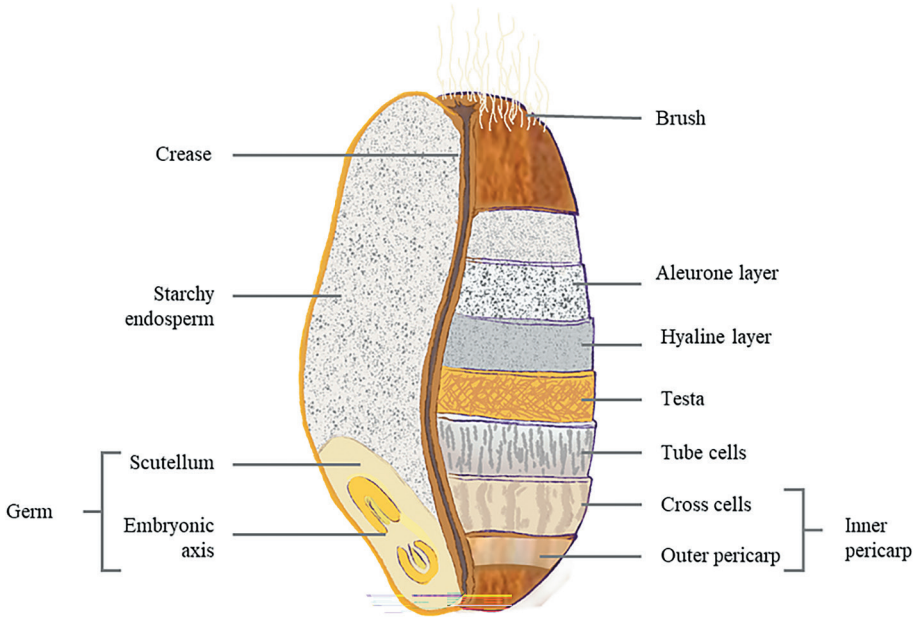


Figure 1. **Schematic representation of wheat grain. The prototype of the image was an article [3]**

Рисунок 1. **Схематическое изображение пшеничного зерна. Прототипом изображения служила статья [3]**

Starch is a branched polysaccharide composed of amylose and amylopectin. The difference between these two components lies in the chemical bonds between glucose monomers. Amylose predominantly contains α-(1→4) bonds, resulting in a linear structure, while amylopectin has more frequent α-(1→6) bonds, leading to a more branched structure. Starch extracted from wheat bran shows a higher amylose content compared to starch from wheat grain [14]. This chemical characteristic of wheat bran is of interest because the addition of starch with a high amylose content improves the properties of food products. For example, such products have a reduced glycemic response due to lower starch digestibility [15].

Mature wheat grains contain two types of starch granules: Type A (diameter > 9.9 μm) and Type B (diameter < 9.9 μm) [16]. In general, wheat grain starch contains 70–80% Type A granules and no more than 30% Type B granules by weight [17]. In one study, when comparing starch extracted from wheat bran with starch obtained from regular wheat, it was noted that the former has an increased content of Type B granules [14].

The size of starch granules is significant during enzyme processing, particularly with alpha-amylase. Smaller particles exhibit a higher hydrolysis rate due to their larger surface area and greater enzyme accessibility [18].

4.2. Non-starch carbohydrates in wheat bran

The main components of wheat bran are non-starch polysaccharides, such as heteroxylans, mixed-linked β-glucans, and cellulose. These components account for approximately 46% of the total volume of industrial wheat bran [19].

Cellulose is undeniably considered the most abundant organic substance on the planet. Its annual growth is equal to $1{,}5 \times 10^{12}$ tons, which allows it to be considered an inexhaustible source of raw materials [20]. Its molecular structure consists of numerous glucose residues linked by β-(1→4) glycosidic bonds. Cellulose forms long chains that are tightly packed together. This is ensured by intramolecular and intermolecular interactions of the molecule's atoms [21]. The interaction between the surface of crystalline cellulose molecules occurs through: hydrogen bonds, electrostatic attraction between layers, dispersion forces [22]. This multilayer structure is crucial for biotechnology. On the one hand, the complex, highly ordered, and densely packed fibrillar architecture of cellulose complicates its hydrolysis [23]. On the other hand, it has found application in various fields of nanotechnology, such as the production of functional membranes.

Hemi-cellulose is a widely distributed polysaccharide that can occupy up to one-third of the dry plant biomass. It represents a collective term for heterogeneous polysaccharides, whose monomers most often have a β-(1→4) linkage. These polysaccharides have a common feature: they are embedded between cellulose microfibrils and bind it through adhesion mechanisms [24]. In general, hemi-cellulose consists of pentoses (xylose, arabinose) and hexoses (glucose, galactose, mannose), as well as uronic acids. The composition may vary depending on the plant species [25]. Arabinoxylan is a key structural component of wheat bran cell walls, accounting for 10.9% to 26.0% of their total content on a dry matter basis [1]. It consists of a backbone of β-(1–4)-linked D-xylose pyranosyl units, to which α-L-arabinofuranose substituents are attached at positions (O)-2 and/or (O)-3 of xylose residues. Some arabinose residues are further linked by an ether bond at position (O)-5 to ferulic acid [26]. Ferulic acid-substituted residues play a significant role in gel properties due to their ability to interact with each other through the formation of ferulic acid dimers [27]. This polymer exhibits several structural forms: linear, branched, and H-shaped [28]. Substituents in the arabinoxylan structure play an important role in cellulose binding within the cell wall. Low-substituted arabinoxylan binds more easily to cellulose, thereby promoting fiber bonding. Conversely, under-substituted arabinoxylan binds less effectively to cellulose fibrils and is more readily extractable by water [29].

Lignin is predominantly deposited in the cell walls of secondarily thickened cells, rendering them rigid and impermeable. This compound provides protection to cell wall polysaccharides against microbial attack [30]. Lignin exhibits a complex and variable molecular structure, composed of three covalently linked subunits: guaiacyl, syringyl, and p-hydroxyphenyl [31]. The application of lignin in food products presents multiple areas of interest. Primarily, it demonstrates potent free radical scavenging capacity [32,33]. Additionally, lignin provides protection against UV radiation and inhibits foodborne pathogens [34]. Notably, a study has confirmed that lignin effectively suppresses the growth of *Staphylococcus aureus* ATCC25923 and *Salmonella enterica ATCC*13076 [35].

4.3. Wheat bran proteins

From the perspective of the food industry, wheat bran is of significant interest as a source of vegetable protein. Overall, the total protein content is considerably higher compared to wheat grain. This is due to the uneven distribution of protein within the grain, with the highest concentration found in the subaleurone and aleurone layers [36,37]. It is evident that wheat bran possesses high potential as raw material for the production of various protein products and preparations. These substances can find extensive application in agriculture for feed fortification. Similarly, they can be considered as inexpensive raw material for the preparation of food products with elevated protein content. For instance, one study involved the production of protein concentrate using alkaline extraction, followed by enrichment of bread and pasta [38]. Another research yielded protein isolates obtained through the treatment of wheat bran with lactic acid bacteria [39].

4.4. Qualitative analysis of wheat bran proteins

One of the key components of wheat bran is the aleurone layer. Proteomic analysis of this layer has been conducted by several researchers. To date, it is known that the qualitative composition of proteins is influenced by numerous factors. The aleurone layer contains a large amount of storage proteins belonging to the globular type. Their quantity varies significantly depending on the wheat variety. For example, in tetraploid wheat variety Mexicali, their content was about 35%, while in soft wheat variety Babbler it was approximately 74.9% [40]. In one experiment, using the Osborne protein extraction method, the following data were obtained: total protein content 12.086%, water-soluble albumins (2.43%), salt-soluble globulins (1.93%), alcohol-soluble prolamins (2.47%), and acid-soluble glutelins (5.25%) [41].

Wheat bran contains a wide variety of proteins, with the functions of some still unknown at present. Among the identified proteins, those performing protective functions can be distinguished. These include inhibitors of α-amylase and proteases, which are capable of protecting the endosperm from enzymatic degradation. At the same time, β-amylase was found, capable of hydrolyzing starch to maltose [42]. Its activity is likely limited by its existence in a bound state. Experiments conducted with barley grains show that β-amylase becomes active when the grain is exposed to proteases, which release it and restore its activity [43]. The presence of β-amylase inhibitors in the endosperm and aleurone layer is also noted [44]. Currently, it is known that amylase and trypsin inhibitor proteins are among the allergens, which are also thermostable [45]. Among the proteins, three more storage globulins were discovered: globulin-1, globulin-3A, and Gsp-1 [42]. An investigation of the amino acid composition of wheat bran revealed a high content of asparagine [46]. Proteomic analysis of proteins revealed that most proteins are involved in metabolic pathways and stress protection [42].

5. The use of wheat bran in industry

Summary information on the examples of bran application in various forms in industrial fields is presented in Table 2. The main areas of wheat bran usage in industrial applications are also shown in Figure 2.

Currently, wheat bran is primarily used as a feed additive, while its application in the food industry remains limited. Only a small portion of wheat bran is used in food products on a commercial scale. Given the significant volumes of accumulated bran biomass and the low cost of products made from them, the flour milling industry is actively seeking new directions for their high-value application. Bran serves as a valuable ingredient, especially in the diet of ruminants, contributing to balanced nutrition and providing several benefits for the health of the animals' digestive system, carbohydrate absorption, and mineral requirements [3]. Additionally, bran can be used in combination with other waste products for feed purposes. For example, in combination with sugar beet waste [47]. Such feed combinations have a positive impact on protein content and transform human-edible products obtained from cows, increasing energy and protein content by 6.8 and 5.3 times, respectively.

In the food industry, bran is added to bakery products to increase fiber content and alter the texture of the products. In this case, bran can be added to dough to modify its properties. Their addition affects the baking process and bread quality, including structural, functional, and sensory characteristics [48]. Furthermore, wheat bran can be presented in the form of powder or capsules, serving as a food additive to increase fiber intake [3].

Wheat bran can serve as a valuable source of various biologically active components, including carbohydrates [14] proteins and amino acids [49], and oils [50]. Additionally, wheat bran is rich in other compounds such as phenolic substances, B vitamins, and minerals, which opens up opportunities for their use in the production of nutraceuticals and functional food products [1].

Enzyme-treated wheat bran serves as a source of starch. Furthermore, starch extracted from wheat bran can be hydrolyzed into glucose, which then serves as raw material for fermentation processes that allow the production of lactic acid, succinic acid, ethanol, and/or butanol [51].

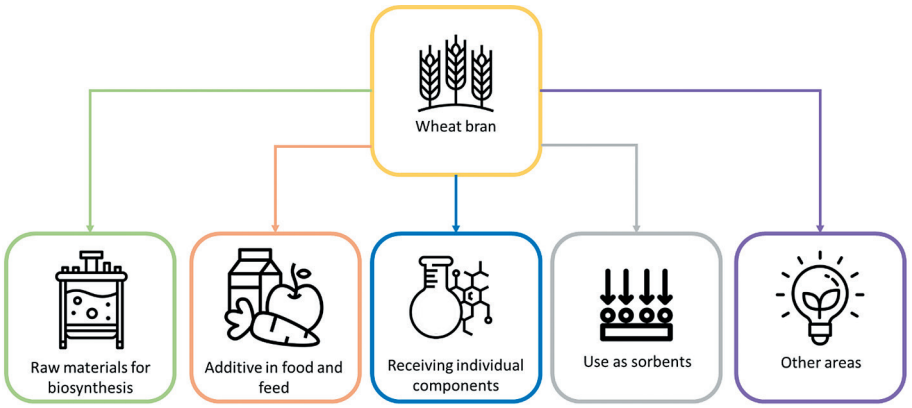


Figure 2. **Schematic representation of the main areas of wheat bran application**
Рисунок 2. **Схематическое изображение основных областей применения пшеничных отрубей**

Table 2. **Overview of wheat bran applications**
Таблица 2. **Обзор областей применения пшеничных отрубей**

Area	Content \ form of wheat bran	Application \ product	Source
Feed industry	Wheat bran and beet pulp mixture	Feed for dairy cows	[47]
Food industry and nutraceuticals	Wheat bran powder/flour	High-fiber bakery products	[48]
	Wheat bran powder, tablets and capsules	Dietary supplement to increase fiber intake	[3]
	Wheat bran subjected to hydrolysis and extraction	Wheat bran starch	[14]
	Wheat bran subjected to hydrolysis and extraction	Acetone, butanol, ethanol	[51,85]
	Wheat bran subjected to protein extraction	Proteins	[53]
	Wheat bran subjected to autolysis by proteolytic enzymes	Branched amino acids	[49]
	Wheat bran	Wheat oil	[50]
	Wheat bran subjected to alcohol extraction and $Ba(OH)_2$ extraction	Arabinoxylan	[55,56]
	Wheat bran subjected to ethanol precipitation and enzymatic treatment	Beta-glucans	[57]
	Wheat bran subjected to pressure-assisted alkaline extraction	Ferulic acid for vanillin production	[59]
Chemical industry	Acid degradation of xylose or glucose from wheat bran	Furfural production	[1]
Agricultural industry	Organic waste from cereal bran	Improve soil structure and water retention due to high N, P, and K content	[68,86]
Sorbents	Organic waste from cereal bran	Dye absorbent	[60–62]
		Absorbent for organic chlorine compounds and benzene aqueous solutions	[63]
		Removal of Cr(VI), Pb(II), and Cd(II) from wastewater	[64–67]
Energy storage	Chemical industry Agricultural industry	Removal of Pt(IV) from wastewater	[69,70]
		Supercapacitors and energy storage devices	[71]
	Sorbents	Strain sensors	[72,73]
	Unprocessed wheat bran	Biogas production	[74–78]
Construction and buildings	Organic waste from cereal bran	Reinforcement, insulating filler, lightweight and sustainable buildings. Cement binder	[79]
Medicine and cosmetology	Molecule derived from wheat bran	Antimicrobial peptide	[80]
	Molecules derived from wheat bran	Antioxidant peptides	[81]
	Wheat bran extract	Wound healing extracts	[82]
Textile industry	Processed wheat bran	Tanning agents	[83,84]

Wheat bran, containing 13–18% protein, represents a promising source for protein extraction. The main components of bran proteins are albumins and globulins, characterized by a more balanced amino acid composition. Compared to endosperm proteins, bran proteins feature higher contents of lysine, arginine, alanine, asparagine, and glycine, as well as lower levels of glutamine, proline, phenylalanine, and sulfur-containing amino acids. Due to these characteristics, bran proteins have higher biological and nutritional value [52,53]. Autolysis of wheat bran using proteolytic enzymes can be utilized to produce a mixture of amino acids, which can subsequently be incorporated into other products [49].

Wheat oil is another product that can be obtained through extraction from wheat bran. Wheat oil contains high amounts of fatty acids in the form of oleic and linoleic acids, as well as carotenoids. This product can be used in cosmetology [54].

Arabinoxylans are the main structural component of wheat bran cell walls and can be extracted using various methods, although their commercial application is challenging [55,56]. More interestingly, arabinoxylan can be decomposed into arabinose and xylose, followed by xylitol production. Xylitol is a sweetener that can be used by diabetics and is also utilized in toothpaste formulations [1].

Beta-glucans present in wheat bran can be obtained through extraction using 70% ethanol, followed by treatment with alpha-amylase under high temperature conditions. Beta-glucans can be used as dietary supplements for individuals with diabetes or heart diseases [57].

Ferulic acid is the main phenolic compound that can be extracted from wheat bran. It is claimed that ferulic acid possesses antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory activities, thus having high potential for application in the food, medical, and cosmetic industries. The simplest method for extracting ferulic acid from wheat bran involves extraction with anhydrous ethanol followed by centrifugation [58,59].

Furfural and 5-HMF are by-products and toxic products of wheat bran processing, but they can also be produced through the acidic degradation of xylitol or glucose and subsequently used as solvents in various applications [1]

Although cereal bran is primarily processed in the feed and food industries, economic development opens up new technical and engineering possibilities for their broader use.

Wheat bran, due to its relatively high content of proteins, potassium, and phosphorus, can be used as a fertilizer for growing cultivated plants. There is also evidence that wheat bran can be used as a sorbent, particularly absorbing malachite green and methylene blue [60–62]. Additionally, wheat bran can act as a sorbent for certain chlorine-containing compounds [63] and for ions of heavy metals such as platinum, lead, chromium, and cadmium [64–87]. Furthermore, it is possible to produce charcoal from wheat bran, which can also adsorb various air pollutants [68].

The carbon from wheat bran can also be utilized in green energy, particularly for creating components used in electronics, such as capacitors or carbon anodes [69,70] and even sensors [71].

Due to its high content of fermentable carbohydrates, such as starch and cellulose, bran is potentially excellent raw material for biorefineries, where biogas and valuable chemical compounds can be produced from it [72,73].

Another interesting area of application for wheat bran is construction. Wheat bran is a cheap, porous, and lightweight material that can also be disposed of through biodegradation. Currently, heat-insulating panels, biocomposites, and other building elements are being developed. When combined with other natural materials such as clay, it is possible to develop a cheap option for temporary housing or structures required during construction [74–78].

In addition to research on obtaining already known molecules, more fundamental developments are being carried out, including the search for unique proteins and peptides. It has been shown that wheat bran contains compounds that potentially have antibacterial effects. For example, the peptide WBp-1 has demonstrated antibacterial properties against *Listeria monocytogenes* by damaging the bacterial cell wall [79]. In another study, bioactive peptides obtained from wheat bran were investigated. A total of 91 bioactive peptides were found, with some exhibiting antioxidant activity against H_2O_2-induced oxidative stress in HepG2 cells. Two peptides (DLDW and DLGL) may be the most promising antioxidant peptides due to their higher binding affinity to Keap1 [80]. All described molecules have potential applications in medical or cosmetic purposes. Wheat bran extracts are also being developed for medical purposes. For example, cold aqueous and methanolic extracts of wheat bran are potentially beneficial for promoting the healing of burn wounds. This development requires further research but shows promise in cases where traditional measures are not effective enough or formulations with one or more active substances are too expensive [81].

Another interesting application of wheat bran is the production of carbon material (CM), which can be used in the leather industry. CM from bran is an interesting inexpensive and environmentally friendly tanning agent. CM potentially represents a step forward in the further use of wheat bran waste in sustainable leather manufacturing [82].

Wheat bran contains a large amount of polysaccharides that have potentially significant applications. For example, it has been shown that wheat bran contains antifreeze polysaccharides. Such polysaccharides can be used both for producing dough more resistant to crystallization and for preserving other food products, or even applied in other industries [83,84].

Wheat bran undoubtedly deserves attention as it is economically affordable raw material that may contain solutions to many non-trivial issues. Apart from the already described applications requiring pure or chemically treated wheat bran, it is worth considering wheat bran as a substrate for microbial cultivation.

6. The use of wheat bran as a substrate for biosynthesis

Wheat bran is a complex multicomponent system. Due to its composition, wheat bran can be used in fermentation to produce various products, but often require preliminary treatment with enzyme preparations, certain chemical compounds, temperature exposure with or without water, or step-by-step processing with the addition of different microorganisms. The goal of hydrolysis in this multicomponent system is most often polysaccharides, dietary fibers, and proteins, although lipids can also be a target. Depending on the objectives, thermal hydrolysis, hydrothermal hydrolysis, enzymatic hydrolysis, chemical hydrolysis, and microbiological hydrolysis methods can be used.

Thermal hydrolysis is represented by prolonged temperature exposure and is primarily associated with the degradation of insoluble dietary fibers and proteins, while also leading to an increase in the amount of water-soluble dietary components [87]. Most often, thermal hydrolysis is used as a preliminary treatment.

Hydrothermal hydrolysis is a prolonged temperature exposure of wheat bran in a solvent. The processes of thermal hydrolysis are valid for it, and there are also known particular cases: hydrothermal hydrolysis reduces the amount of hydrocarbon molecules such as phytane and, due to temperature exposure, leads to the degradation of proteins and certain peptides such as glutathione, which results in an increase in the number of disulfide bonds [88].

Chemical methods make it possible to extract many components, but chemical hydrolysis methods for biosynthesis are a preliminary stage, most often quite specific. Wheat bran can be treated with compounds such as sulfuric acid, iron (III) chloride.

Different strains of microorganisms have varying effects on the nutritional and functional properties of fermented wheat bran, which primarily depends on the microorganism itself and fermentation conditions.

Treatment with microbial starters or enzyme preparations leads to the degradation of the wheat bran structure, destruction of the cell wall, and protein breakdown, while biologically active and bioavailable components of primary interest, such as peptides, amino acids, and other nitrogenous compounds with physiological functions, are formed during fermentation by the main fermentation culture.

The scheme of the main methods of wheat bran treatment is presented in Figure 3.

Mycelial fungi (*Aspergillus, Trichoderma, Mucor* and *Rhizopus*), yeasts (*Saccharomyces* and *Candida*) and bacteria (*Lactobacillus* and *Bacillus*) are commonly used in the biotransformation of wheat bran to degrade cell wall fibers, thereby improving the availability and digestibility of nutrients. Yeast and lactic acid bacteria are well-established starters frequently used to enhance the nutritional and structural characteristics of wheat bran [4].

One of the simplest examples of using food bran as a substrate is the saccharification of wheat bran for bioethanol production. This process can be carried out by numerous microorganisms or microbial consortia, including those of the genera *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Mucor* and *Trichoderma*. The highest content of soluble carbohydrates (198.8 mg/g) was obtained by the strain *P. chrysogenum* F.00814 after 3–5 days of pretreatment. Subsequently, ethanol biosynthesis was conducted using strains *S. cerevisiae Levuline Fb* and *K. marxianus* NCAIM Y.00959 and *Z. mobilis subsp. mobilis* B.01327T. The maximum ethanol content was 7.6 % (v/v), obtained after 7 days of fermentation with wort containing 20 % (w/v) initial reducing sugar, initiated by mixed cultures (*S. cerevisiae* and *K. marxianus*), with the addition of *Z. mobilis subsp. mobilis* B.01327T after two days [89].

For vitamin B12 production, wheat bran was pre-fermented using *Levilactobacillus brevis* and *Lactiplantibacillus plantarum*, along with a strain of *Saccharomyces cerevisiae* yeast, followed by the addition of *Propionibacterium freudenreichii*. Through 24 hours of treatment with the starter culture, a vitamin B12 yield of 55 ± 3.4 ng/mL was achieved, which is approximately 6 times higher than that obtained in the fermentation process without pre-fermentation [90,91].

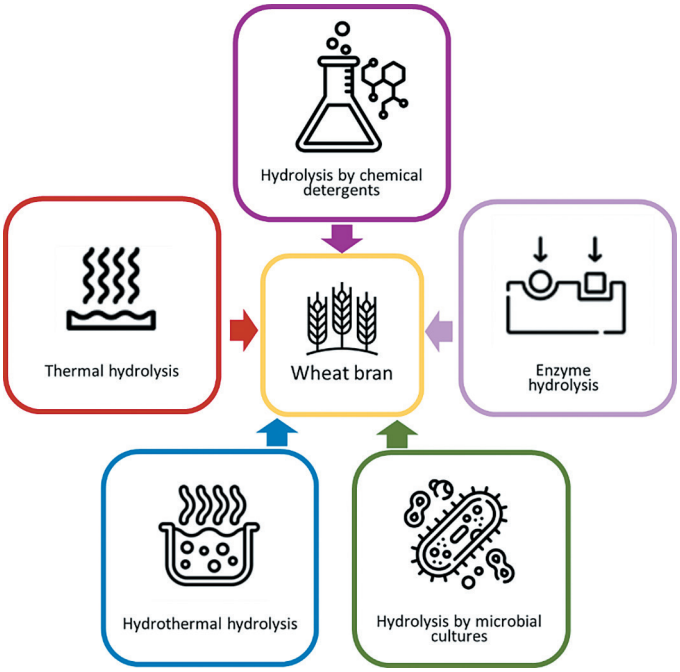


Figure 3. **Schematic representation of the methods of hydrolysis of wheat bran**

Рисунок 3. **Схематическое изображение способов гидролиза пшеничных отрубей**

Table 3. **Application of wheat bran for cultivation**

Таблица 3. **Применение пшеничных отрубей для культивирования**

Producer	Product	Source
Strains of *Aspergillus, Trichoderma, Mucor, Rhizopus, Saccharomyces, Candida, Lactobacillus, Bacillus*	Bioconversion before obtaining other products	[4]
Strains of *Aspergillus, Penicillium, Rhizopus, Mucor and Trichoderma*	Bioconversion before ethanol production	[89]
Propionibacterium freudenreichii	Vitamin B12	[90,91]
E. coli BL21	Acetic acid	[92]
P. acidilactici ZPA026	Feed with adsorbent	[94]
Pichia stipitis (NCIM 3497)	Xylitol	[95]
Fusarium graminearum Ec220	Xylanases	[99]
T. reesei NCIM 1186 N. crassa	Cellulases	[96]
Aspergillus sojae	Polygalacturonase	[100,101]
Aspergillus niger NRRL 3112	β-glucosidase	[97]
Aspergillus flavus	Carboxymethyl cellulase	[98]
P. pastoris GS115	Xylans and xylooligosaccharides	[93]
Aspergillus niger / Lactobacillus fermentum JN248	Ferulic acid	[102,103]
Clostridium beijerinckii ATCC55025	Acetone, butanol, ethanol	[104]
Aspergillus terreus CICC40205	Itaconic acid	[105]
S. diastaticus ATCC13007	Ethanol	[106]
Rhodosporidium toruloides DSM 4444	Carotenoids	[107]

The use of recombinant strains for product generation using wheat bran is also known. A complex approach was used for acetic acid production with *Escherichia coli*. Acetylxylan esterase from *Phingobacterium soilsilvae Em02* was integrated into *E. coli*. Before recombinant *E. coli* cultivation, wheat bran was treated with amylase and papain. Combined with acetylxylan esterase catalysis, this pathway yielded 0.39 g of acetic acid per 1 g of wheat bran, equivalent to a conversion rate of 39% [92].

An additional example of recombinant strain utilization involves the production of xylanase A from *Bacillus amyloliquefaciens*, which was expressed in *Pichia pastoris GS115* under the AOX1 promoter. The resulting endo-active xylanase exhibited transglycosylase activity and was capable of hydrolyzing insoluble xylan from wheat bran, as well as beech and birch xylan. Wheat bran was processed using this xylanase to obtain xylooligosaccharides and xylans from wheat bran [93].

An interesting approach also involves the use of fermented wheat bran as a nutritional feed. *Lactobacillus* was utilized for the preliminary treatment of wheat bran, followed by the addition of *Pediococcus acidilactici ZPA026* culture. The processed bran was subsequently used as pig feed. Feeding pigs with fermented wheat bran reduced the concentration of heavy metals in pig feces, thus revealing fermented wheat bran as a feed with sorbent properties [94].

Another notable method is the production of xylitol through fermentation using *Pichia stipitis*, achieving a yield of 6.134 g/L, whereas chemical treatment with sulfuric acid resulted in a yield of 1.42 g/L [95].

Furthermore, wheat bran can be utilized as raw material for enzyme production from microorganisms. Cultivation of *T. reesei* NCIM 1186 and *N. crassa* NCIM 1021, without preliminary treatment with enzymes or other cultures, was employed for cellulase production [96].

Partial replacement of the carbon source with wheat bran can also increase the yield of produced enzymes. For instance, when using wheat bran for β-glucosidase production, substituting the carbon source with wheat bran and additionally adding glycerol allowed obtaining an enzyme activity of 9.3 U/mL of medium through the cultivation of *Aspergillus niger* NRRL 3112, compared to 5.6 U/mL in the medium without co-substrate [97]. The use of wheat bran as a co-substrate also led to an increase in the expression of thermostable carboxymethyl cellulase during *Aspergillus flavus* cultivation, which can be used for the production of commercial carboxymethyl cellulase [98].

Wheat bran can be used as a nutrient medium for selecting enzyme producers. For example, *Fusarium graminearum Ec220* was used in the presence of carboxymethyl cellulase to produce xylanase with low cellulase activity [99]. *Aspergillus sojae* ATCC20235, which was cultivated in the presence of wheat bran, was used to produce polygalacturonase with increased activity [100,101].

Using *Aspergillus niger*, it is possible to produce ferulic acid without the use of other microorganisms or enzyme preparations. The efficiency of ferulic acid synthesis was 358.72 μg per 1 g of decarboxylated wheat bran [102]. Similarly, the bacterium *Lactobacillus fermentum JN248* was used to produce ferulic acid, yielding 10.24 mg per 1 g of decarboxylated wheat bran [103].

Sulfuric acid-treated wheat bran hydrolysate can be used to produce acetone, butanol, and ethanol. When cultivating *Clostridium beijerinckii* ATCC55025, the yields of acetone, butanol, and ethanol were 2.2, 8.8, and 0.8 g/L, respectively [104]. Also, on a medium with wheat bran hydrolysate obtained by sulfuric acid treatment, *Aspergillus terreus* CICC40205 can be cultivated to produce itaconic acid. The itaconic acid titer using this mutant strain was 49.65 g/L [105].

Another method for ethanol production is the cultivation of *S. diastaticus* ATCC13007 on wheat bran hydrolysate obtained in the presence of alpha-amylase, cellulase, beta-glucosidase, cellobiase, hemicellulase, and xylanase. The yield ranged from 8.9 to 11.4 g/L of the nutrient medium[106].

Equally interesting is the production of carotenoids through fermentation using *Rhodosporidium toruloides* DSM 4444. Through chemical hydrolysis in the presence of $FeCl_3$ and microwave exposure, followed by enzymatic hydrolysis, it is possible to achieve carotenoid yields of up to 14.8 mg/g, as well as lipid yields of up to 5.2 g/L [107].

7. Conclusion

Based on the results of conducted information research, analysis of scientific publications, and comparison of experimental data obtained by researchers from different scientific groups, it has been concluded that the search for applications of wheat bran is relevant both in established industries and in more innovative fields. The chemical composition of wheat bran has been described, and various industries and forms of processing wheat bran for their application have been considered. In addition to the known use as feed additives, the processing of wheat bran potentially allows their use as a cheap building material or adsorbent, while chemical treatment enables the extraction of various individual components. One of the promising solutions for the processing of wheat bran is the production of various products through bioconversion. Wheat bran represents a cheap substrate, although it is limited by the presence of a large number of complex and insoluble compounds. Pre-hydrolyzed wheat bran becomes a more accessible source of carbon and energy, which allows it to be used for the cultivation of various microorganisms or their consortia, thus revealing its potential as a substrate for the production of a wide range of biologically active molecules. Thus, the combination of various hydrolysis methods opens up opportunities for the biosynthesis of certain hard-to-access enzymes, sugars, vitamins, and simple organic acids. This approach significantly expands the potential practical applications of wheat bran in modern industry, highlighting its versatility and economic feasibility in various technological processes.

REFERENCES

1. Apprich, S., Tirpanalan, Ö., Hell, J., Reisinger, M., Böhmdorfer, S., Siebenhandl-Ehn, S. et al. (2014). Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT — Food Science and Technology*, 56(2), 222–231. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.003
2. Onipe, O. O., Jideani, A. I. O., Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12), 2509–2518. https://doi.org/10.1111/ijfs.12935
3. Rossi, D., Rossi, S., Cinelli, P., Seggiani, M. (2024). Emerging opportunities in the valorisation of wheat bran byproduct as additive in polymer composite materials. *Materials Today Sustainability*, 27, Article 100832. https://doi.org/10.1016/J.MTSUST.2024.100832
4. Fan, L., Ma, S., Li, L., Huang, J. (2024). Fermentation biotechnology applied to wheat bran for the degradation of cell wall fiber and its potential health benefits: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 275(Part 1), Article 133529. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133529
5. Andersson, A. A. M., Dimberg, L., Åman, P., Landberg, R. (2014). Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 294–311. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.003
6. Vitaglione, P., Napolitano, A., Fogliano, V. (2008). Cereal dietary fibre: A natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. *Trends in Food Science and Technology*, 19(9), 451–463. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.02.005
7. Saini, P., Islam, M., Das, R., Shekhar, S., Sinha, A. S. K., Prasad, K. (2023). Wheat bran as potential source of dietary fiber: Prospects and challenges. *Journal of Food Composition and Analysis*, 116, Article 105030. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105030
8. Prückler, M., Siebenhandl-Ehn, S., Apprich, S., Höltinger, S., Haas, C., Schmid, E. et al. (2014). Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *LWT — Food Science and Technology*, 56(2), 211–221. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2013.12.004
9. FAO Food Price Index. FAO Cereal Supply and Demand Brief. Retrieved from https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en Accessed February 15, 2025
10. Cai, L., Choi, I., Lee, C. -K., Park, K. -K., Baik, B. -K. (2014). Bran characteristics and bread-baking quality of whole grain wheat flour. *Cereal Chemistry*, 91(4), 398–405. https://doi.org/10.1094/cchem-09-13-0198-r
11. Hemdane, S., Jacobs, P. J., Dornez, E., Verspreet, J., Delcour, J. A., Courtin, C. M. (2016). Wheat (*Triticum aestivum* L.) bran in bread making: A Critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 28–42. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12176
12. Ye, G., Wu, Y., Wang, L., Tan, B., Shen, W., Li, X. et al. (2021). Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran. *LWT*, 149, Article 111996. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111996
13. Xiao, Y., Liu, Y., Wang, X., Li, M., Lei, H., Xu, H. (2019). Cellulose nanocrystals prepared from wheat bran: Characterization and cytotoxicity assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 225–233. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.160
14. Xie, X. (Sherry), Cui, S. W., Li, W., Tsao, R. (2008). Isolation and characterization of wheat bran starch. *Food Research International*, 41(9), 882–887. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.07.016
15. Li, C., Dhital, S., Gidley, M. J. (2023). High amylose wheat foods: A new opportunity to improve human health. *Trends in Food Science and Technology*, 135, 93–101. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.017
16. Zeng, J., Li, G., Gao, H., Ru, Z. (2011). Comparison of A and B starch granules from three wheat varieties. *Molecules,* 16(12), 10570–10591. https://doi.org/10.3390/molecules161210570
17. Guo, L., Chen, H., Zhang, Y., Yan, S., Chen, X., Gao, X. (2023). Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemical properties and their effect on flour-based food systems. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 4172–4186. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.08.019
18. Qi, X., Tester, R. F. (2016). Effect of native starch granule size on susceptibility to amylase hydrolysis. *Starch*, 68(9–10), 807–810. https://doi.org/10.1002/star.201500360
19. Prisenznáková, L., Nosáľová, G., Hromádková, Z., Ebringerová, A. (2010). The pharmacological activity of wheat bran polysaccharides. *Fitoterapia*, 81(8), 1037–1044. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2010.06.027
20. Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358–3393. https://doi.org/10.1002/anie.200460587
21. Chashchilov, D. V. (2024). Regenerated Cellulose. Review. Part 1. Cellulose structure, solvent systems, and dissolution mechanisms. *Polymer Science, Series D*, 17(2), 466–473. https://doi.org/10.1134/S1995421224700801
22. Jarvis, M. C. (2022). Hydrogen bonding and other non-covalent interactions at the surfaces of cellulose microfibrils. *Cellulose,* 30(2), 667–687. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04954-3
23. Arantes, V., Saddler, J. N. (2010). Access to cellulose limits the efficiency of enzymatic hydrolysis: The role of amorphogenesis. *Biotechnology for Biofuels*, 3(1), Article 4. https://doi.org/10.1186/1754-6834-3-4
24. Zhu, X., Xin, X., Gu, Y. (2019). Cellulose and Hemicellulose Synthesis and Their Regulation in Plant Cells. Chapter in a book: Extracellular Sugar-Based Biopolymers Matrices. Springer Nature Switzerland AG, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12919-4_7
25. Scapini, T., dos Santos, M. S. N., Bonatto, C., Wancura, J. H. C., Mulinari, J., Camargo, A. F. et al. (2021). Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for hemicellulose recovery. *Bioresource Technology*, 342, Article 126033. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126033
26. Marquez-Escalante, J. A., Carvajal-Millan, E., Yadav, M. P., Kale, M., Rascon-Chu, A., Gardea, A. A. et al. (2018). Rheology and microstructure of gels based on wheat arabinoxylans enzymatically modified in arabinose to xylose ratio. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(3), 914–922. https://doi.org/10.1002/jsfa.8537
27. Carvajal-Millan, E., Landillon, V., Morel, M. H., Rouau, X., Doublier, J. L., Micard, V. (2005). Arabinoxylan gels: Impact of the feruloylation degree on their structure and properties. *Biomacromolecules,* 6(1), 309–317. https://doi.org/10.1021/bm049629a
28. Watt, D. K., Brasch, D. J., Larsen, D. S., Melton, L. D., Simpson, J. (2000). Oligosaccharides related to xyloglucan: Synthesis and X-ray crystal structure of methyl α-l-fucopyranosyl-(1→2)-β-d-galactopyranosyl-(1→2)-α-d-xylopyranoside and the synthesis of methyl α-l-fucopyranosyl-(1→2)-β-d-galactopyranosyl-(1→2)-β-d-xylopyranoside. *Carbohydrate Research*, 325(4), 300–312. https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)00017-3
29. Shrestha, U. R., Smith, S., Pingali, S. V., Yang, H., Zahran, M., Breunig, L. et al. (2019). Arabinose substitution effect on xylan rigidity and self-aggregation. *Cellulose*, 26(4), 2267–2278. https://doi.org/10.1007/s10570-018-2202-8
30. Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., Boerjan, W. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, 153(3), 895–905. https://doi.org/10.1104/pp.110.155119
31. Ahadyani, N., Abdollahi, M. (2024). Phenolation, amination and cross-linking of lignin: synthesis and characterization of functionalized lignin. *Polymer Bulletin*, 81(10), 8643–8661. https://doi.org/10.1007/s00289-023-05103-x
32. Lu, F. -J., Chu, L. -H., Gau, R. -J. (1998). Free radical-scavenging properties of lignin. *Nutrition and Cancer*, 30(1), 31–38. https://doi.org/10.1080/01635589809514637
33. Huang, W., Tian, F., Wang, H., Wu, S., Jin, W., Shen, W. et al. (2023). Comparative assessment of extraction, composition, and in vitro antioxidative properties of wheat bran polyphenols. *LWT*, 180, Article 114706. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114706
34. Arnata, I.W., Anggreni, A. A. M. D., Arda, G., Masruchin, N., Sartika, D., Fahma, F. et al. (2024). Minimizing food oxidation using aromatic polymer: From lignin into nano-lignin. *Food Research International*, 197(Part 1), Article 115159. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115159
35. Marangon, C. A., Otoni, C. G., Bertuso, P. C., Rossi, P. F., dos Santos, D. M., Lourençon, T. V. et al. (2024). Side-stream lignins: Potential antioxidant and antimicrobial agents in milk. *Food Research International*, 180, Article 114091. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114091
36. Guo, J., Wang, F., Zhang, Z., Wu, D., Bao, J. (2021). Characterization of gluten proteins in different parts of wheat grain and their effects on the textural quality of steamed bread. *Journal of Cereal Science*, 102, Article 103368. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103368
37. Lebert, L., Buche, F., Sorin, A., Aussenac, T. (2022). The wheat aleurone layer: Optimisation of its benefits and application to bakery products. *Foods,* 11(22), Article 3552. https://doi.org/10.3390/foods11223552
38. Alzuwaid, N. T., Sissons, M., Laddomada, B., Fellows, C. M. (2020). Nutritional and functional properties of durum wheat bran protein concentrate. *Cereal Chemistry*, 97(2), 304–315. https://doi.org/10.1002/cche.10246
39. Arte, E., Huang, X., Nordlund, E., Katina, K. (2019). Biochemical characterization and technofunctional properties of bioprocessed wheat bran protein isolates. *Food Chemistry*, 289, 103–111. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.020
40. Meziani, S., Nadaud, I., Gaillard-Martinie, B., Chambon, C., Benali, M., Branlard, G. (2012). Proteomic analysis of the mature kernel aleurone layer in common and durum wheat. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 323–330. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.01.010
41. Uttam, A. N., Padte, S., Raj, G. J. V., Govindaraju, K., Kumar, S. (2023). Isolation, characterization, and utilization of wheat bran protein fraction for food application. *Journal of Food Science and Technology*, 60(2), 464–473. https://doi.org/10.1007/s13197-022-05617-8
42. Chaquilla-Quilca, G., Balandrán-Quintana, R. R., Huerta-Ocampo, J. Á., Ramos-Clamont Montfort, G., Luna-Valdez, J. G. (2018). Identification of proteins contained in aqueous extracts of wheat bran through a proteomic approach. *Journal of Cereal Science*, 80, 31–36. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.005
43. Sopanen, T., Laurière, C. (1989). Release and Activity of Bound β-Amylase in a Germinating Barley Grain. *Plant Physiology*, 89(1), 244–249. https://doi.org/10.1104/pp.89.1.244
44. Mamytova, N., Sergalykyzy, Z., Kuzovlev, V., Khakimzhanov, A., Yrgynbayeva, S. (2024). Features of amylase inhibitors in wheat grains. *Experimental Biology*, 100(3), 166–174. https://doi.org/10.26577/bb.2024.v100.i3.014
45. Pastorello, E. A., Farioli, L., Conti, A., Pravettoni, V., Bonomi, S., Iametti, S. et al. (2007). Wheat IgE-mediated food allergy in European patients: Alpha-amylase inhibitors, lipid transfer proteins and low-molecular-weight glutenins. Allergenic molecules recognized by double-blind, placebo-controlled food challenge. *International Archives of Allergy and Immunology*, 144(1), 10–22. https://doi.org/10.1159/000102609
46. Mustafa, A., Åman, P., Andersson, R., Kamal-Eldin, A. (2007). Analysis of free amino acids in cereal products. *Food Chemistry*, 105(1), 317–324. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.11.044
47. Ertl, P., Zebeli, Q., Zollitsch, W., Knaus, W. (2016). Feeding of wheat bran and sugar beet pulp as sole supplements in high-forage diets emphasizes the potential of dairy cattle for human food supply. *Journal of Dairy Science*, 99(2), 1228–1236. https://doi.org/10.3168/jds.2015-10285
48. Noort, M. W. J., van Haaster, D., Hemery, Y., Schols, H. A., Hamer, R. J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality — Evidence for fibre–protein interactions. *Journal of Cereal Science*, 52(1), 59–64. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.003
49. Nogata, Y., Nagamine, T. (2009). Production of free amino acids and γ-Aminobutyric acid by autolysis reactions from wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1331–1336. https://doi.org/10.1021/jf802420w
50. Brandolini, A., Hidalgo, A. (2012). Wheat germ: Not only a by-product. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(sup. 1), 71–74. https://doi.org/10.3109/09637486.2011.633898

51. Wood, I. P., Cook, N. M., Wilson, D. R., Ryden, P., Robertson, J. A., Waldron, K. W. (2016). Ethanol from a biorefinery waste stream: Saccharification of amylase, protease and xylanase treated wheat bran. *Food Chemistry*, 198, 125–131. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.108
52. Di Lena, G., Vivanti, V., Quaglia, G. B. (1997). Amino acid composition of wheat milling by-products after bioconversion by edible fungi mycelia. *Food / Nahrung*, 41(5), 285–288. https://doi.org/10.1002/food.19970410507
53. Roberts, P. J., Simmonds, D. H., Wootton, M., Wrigley, C. W. (1985). Extraction of protein and solids from wheat bran. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 36(1), 5–10. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740360103
54. Jung, G.-W., Uddin, M. S., Kwon, K.-T., Chun, B.-S. (2010). Comparison of supercritical and near-critical carbon dioxide extraction of carotenoid enriched wheat bran oil. *African Journal of Biotechnology*, 9(45), 7702–7709.
55. Gebruers, K., Dornez, E., Boros, D., Fraś, A., Dynkowska, W., Bedo, Z. et al. (2008). Variation in the content of dietary fiber and components thereof in wheats in the healthgrain diversity screen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 9740–9749. https://doi.org/10.1021/jf800975w
56. Sun, Y., Cui, S. W., Gu, X., Zhang, J. (2011). Isolation and structural characterization of water unextractable arabinoxylans from Chinese black-grained wheat bran. *Carbohydrate Polymers*, 85(3), 615–621. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.03.021
57. Li, W., Cui, S. W., Kakuda, Y. (2006). Extraction, fractionation, structural and physical characterization of wheat β-d-glucans. *Carbohydrate Polymers*, 63(3), 408–416. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.09.025
58. Ou, S., Kwok, K. -C. (2004). Ferulic acid: Pharmaceutical functions, preparation and applications in foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(11), 1261–1269. https://doi.org/10.1002/jsfa.1873
59. Buranov, A. U., Mazza, G. (2009). Extraction and purification of ferulic acid from flax shives, wheat and corn bran by alkaline hydrolysis and pressurised solvents. *Food Chemistry*, 115(4), 1542–1548. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.059
60. Das, S., Singh, S., Garg, S. (2022). Agri-residual waste, wheat bran as a biosorbent for mitigation of dye pollution in industrial wastewaters. *Journal of Basic Microbiology*, 62(3–4), 465–479. https://doi.org/10.1002/jobm.202100502
61. Chung, W. J., Shim, J., Ravindran, B. (2022). Application of wheat bran based biomaterials and nano-catalyst in textile wastewater. *Journal of King Saud University — Science*, 34(2), Article 101775. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101775
62. Haq, H. A., Javed, T., Abid, M. A., Zafar, S., Din, M. I. (2021). Adsorption of crystal violet dye from synthetic textile effluents by utilizing wheat bran (Triticum aestivum). *Desalination and Water Treatment*, 224, 395–406. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27178
63. Adachi, A., Ikeda, C., Takagi, S., Fukao, N., Yoshie, E., Okano, T. (2001). Efficiency of rice bran for removal of organochlorine compounds and benzene from industrial wastewater. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1309–1314. https://doi.org/10.1021/jf001147c
64. Chen, S., Yue, Q., Gao, B., Xu, X. (2010). Equilibrium and kinetic adsorption study of the adsorptive removal of Cr(VI) using modified wheat residue. *Journal of Colloid and Interface Science*, 349(1), 256–264. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.057
65. Bulut, Y., Baysal, Z. (2006). Removal of Pb(II) from wastewater using wheat bran. *Journal of Environmental Management*, 78(2), 107–113. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.03.010
66. Singh, K. K., Singh, A. K., Hasan, S. H. (2006). Low cost bio-sorbent 'wheat bran' for the removal of cadmium from wastewater: Kinetic and equilibrium studies. *Bioresource Technology*, 97(8), 994–1001. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.043
67. Ogata, F., Uematsu, Y., Nagai, N., Nakamura, M., Tabuchi, A., Saenjum, C. et al. (2022). Wheat brans as waste biomass based on a potential bio–adsorbent for removing platinum(IV) ions from aqueous phase. *Bioresource Technology Reports*, 20, Article 101238. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101238
68. Dey, T., Bhattacharjee, T., Nag, P., Ritika, Ghati, A., Kuila, A. (2021). Valorization of agro-waste into value added products for sustainable development. *Bioresource Technology Reports*, 16, Article 100834. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100834
69. Wang, D., Min, Y., Yu, Y. (2015). Facile synthesis of wheat bran-derived honeycomb-like hierarchical carbon for advanced symmetric supercapacitor applications. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 19(2), 577–584. https://doi.org/10.1007/S10008-014-2639-0
70. Wang, H., Zhang, P., Song, X., Zhang, M., Kong, X., Jin, S. et al. (2020). Wheat bran derived carbon toward cost-efficient and high performance lithium storage. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(42), 15898–15905. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04670
71. Ren, J., Du, X., Zhang, W., Xu, M. (2017). From wheat bran derived carbonaceous materials to a highly stretchable and durable strain sensor. *RSC Advances*, 7(37), 22619–22626. https://doi.org/10.1039/c7ra01837a
72. Schmid, D., Olsson, E.L., Vainio, E., Wu, H., Karlström, O., Hupa, L. (2025). Fate of phosphorus and potassium in gasification of wheat bran and sunflower seed shells. *Fuel*, 384, Article 133950. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133950
73. Kumar, A., Pandit, S., Sharma, K., Agrawal, S., Kuhad, R. C., Mathuriya, A. S. et al. (2024). Microbial degradation of cellulose extracted from wheat bran for bioelectricity production using microbial fuel cell. *Process Safety and Environmental Protection*, 190(Part A), 574–585. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.076
74. Al-Mazrouei, N., Ahmed, W., Al-Marzouqi, A. H. (2023). Characterization and comparative analysis of natural, sustainable composite material properties using bio-binder for eco-friendly construction applications. *Buildings,* 13(5), Article 1324. https://doi.org/10.3390/buildings13051324
75. Gaydabrus, M., Mussafirov, D., Tabakaev, R. (2018). Research of the opportunity of using bran as a building material. *MATEC Web of Conferences*, 194, Article 01018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819401018
76. Subash, M. ch., Muthiah, P. (2021). Eco-friendly degumming of natural fibers for textile applications: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, Article 100304. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100304
77. Di Canto, J. A.T., Malfait, W. J., Wernery, J. (2023). Turning waste into insulation — A new sustainable thermal insulation board based on wheat bran and banana peels. *Building and Environment*, 244, Article 110740. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110740
78. Rahman, A., Fehrenbach, J., Ulven, C., Simsek, S., Hossain, K. (2021). Utilization of wheat-bran cellulosic fibers as reinforcement in bio-based polypropylene composite. *Industrial Crops and Products*, 172, Article 114028. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114028
79. Zou, Z., Purnawan, M. A., Wang, Y., Ismail, B. B., Zhang, X., Yang, Z. et al. (2025). A novel antimicrobial peptide WBp-1 from wheat bran: Purification, characterization and antibacterial potential against *Listeria monocytogenes*. *Food Chemistry*, 463(Part 2), Article 141261. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141261
80. Zhuang, M., Li, J., Wang, A., Li, G., Ke, S., Wang, X. et al. (2024). Structurally manipulated antioxidant peptides derived from wheat bran: Preparation and identification. *Food Chemistry*, 442, Article 138465. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138465
81. Ahmed, M. A. M., Ali, M. F., Mohamed, N. M., Bayoumi, S. A. L., Zahran, A. M., Elsayh, K. I. (2024). Exploring the efficacy of various wheat bran extracts in promoting burn wound healing: A comparative analysis. *Journal of Ethnopharmacology*, 319(Part 1), Article 117174. https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117174
82. Gong, Y., Fu, L., Wang, C., Deng, T., Chen, N., Chen, J. (2023). Study on the preparation of wheat bran carbon material (CM) and its preliminary tanning property in leather industry. *Industrial Crops and Products*, 205, Article 117468. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117468
83. Yang, T., Zhang, Y., Guo, L., Li, D., Liu, A., Bilal, M. et al. (2023). Antifreeze polysaccharides from wheat bran: The structural characterization and antifreeze mechanism. *Biomacromolecules*, 25(7), 3877–3892. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.3c00958
84. Zhao, A., Shi, P., Yang, R., Gu, Z., Jiang, D., Wang, P. (2022). Isolation of novel wheat bran antifreeze polysaccharides and the cryoprotective effect on frozen dough quality. *Food Hydrocolloids*, 125, Article 107446. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107446
85. Galbe, M., Zacchi, G. (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59(6), 618–628. https://doi.org/10.1007/S00253-002-1058-9
86. Abbas, M., Atiq-ur-Rahman, M., Manzoor, F., Farooq, A. (2012). A quantitative analysis and comparison of nitrogen, potassium and phosphorus in rice husk and wheat bran samples. *Pure and Applied Biology*, 1(1), 14–15.
87. Saroj, R., Kaur, S., Malik, M. A., Puranik, V., Kaur, D. (2024). Thermal processing of wheat bran: Effect on the bioactive compounds and dietary fiber. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 32, Article 100433. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2024.100433
88. Tavanai, T., Kadivar, M., Alsharif, M. A. (2025). The effect of hydrothermal treatment on the physico-chemical properties of wheat bran and the rheological characteristics of the resulting dough. *Journal of Cereal Science*, 121, Article 104098. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.104098
89. Farkas, C., Rezessy-Szabó, J. M., Gupta, V. K., Truong, D. H., Friedrich, L., Felföldi, J. et al. (2019). Microbial saccharification of wheat bran for bioethanol fermentation. *Journal of Cleaner Production*, 240, Article 118269. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118269
90. Chamlagain, B., Edelmann, M., Katina, K., Varmanen, P., Piironen, V. (2024). Vitamin B_{12} production in solubilized protein extract of bioprocessed wheat bran with *Propionibacterium freudenreichii. LWT*, 192, Article 115731. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115731
91. Chamlagain, B., Peltonen, L., Edelmann, M., Ramos-Diaz, J. M., Kemppinen, A., Jouppila, K. et al. (2021). Bioaccessibility of vitamin B12 synthesized by *Propionibacterium freudenreichii* and from products made with fermented wheat bran extract. *Current Research in Food Science*, 4, 499–502. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.009
92. Li, M., Tang, H., Hu, H., Liu, X., Xue, D., Yu, X. et al. (2024). Production of acetic acid from wheat bran by catalysis of an acetoxylan esterase. *Bioresource Technology*, 396, Article 130443. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130443
93. Liu, M. -qi, Huo, W. -kang, Xu, X., Weng, X. -yan. (2017). Recombinant *Bacillus amyloliquefaciens* xylanase A expressed in *Pichia pastoris* and generation of xylo-oligosaccharides from xylans and wheat bran. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 656–663. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.073
94. Zhang, D., Liu, H., Wang, S., Liu, Y., Ji, H. (2023). Wheat bran fermented by Lactobacillus regulated the bacteria–fungi composition and reduced fecal heavy metals concentrations in growing pigs. *Science of The Total Environment*, 858(Part 3), Article 159828. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159828
95. Bhavana, B. K., Mudliar, S. N., Debnath, S. (2023). Life cycle assessment of fermentative xylitol production from wheat bran: A comparative evaluation of sulphuric acid and chemical-free wet air oxidation-based pretreatment. *Journal of Cleaner Production*, 423, Article 138666. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138666
96. Verma, N., Kumar, V. (2020). Impact of process parameters and plant polysaccharide hydrolysates in cellulase production by *Trichoderma reesei* and *Neurospora crassa* under wheat bran based solid state fermentation. *Biotechnology Reports*, 25, Article e00416. https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00416
97. Abdella, A., Mazeed, T. E. -S., El-Baz, A. F., Yang, S. -T. (2016). Production of β-glucosidase from wheat bran and glycerol by *Aspergillus niger* in stirred tank and rotating fibrous bed bioreactors. *Process Biochemistry*, 51(10), 1331–1337. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.004
98. Gomathi, D., Muthulakshmi, C., Kumar, D. G., Ravikumar, G., Kalaiselvi, M., Uma, C. (2012). Submerged fermentation of wheat bran by *Aspergillus flavus* for production and characterization of carboxy methyl cellulase. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(1Sup), S67-S73. https://doi.org/10.1016/s2221-1691(12)60132-4
99. Cruz-Davila, J., Perez, J. V., del Castillo, D. S., Diez, N. (2022). Fusarium graminearum as a producer of xylanases with low cellulases when grown on wheat bran. *Biotechnology Reports*, 35, Article e00738. https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00738

100. Demir, H., Tari, C. (2014). Valorization of wheat bran for the production of polygalacturonase in SSF of *Aspergillus sojae*. *Industrial Crops and Products*, 54, 302–309. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.025
101. Demir, H., Tari, C. (2016). Bioconversion of wheat bran for polygalacturonase production by *Aspergillus sojae* in tray type solid-state fermentation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 106, 60–66. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.011
102. Yin, Z. N., Wu, W. J., Sun, C. Z., Liu, H. F., Chen, W. B., Zhan, Q. P. et al. (2019). Antioxidant and anti-inflammatory capacity of ferulic acid released from wheat bran by solid-state fermentation of *Aspergillus niger*. *Biomedical and Environmental Sciences*, 32(1), 11–21. https://doi.org/10.3967/bes2019.002
103. Deng, H., Jia, P., Jiang, J., Bai, Y., Fan, T. -P., Zheng, X., et al. (2019). Expression and characterisation of feruloyl esterases from Lactobacillus fermentum JN248 and release of ferulic acid from wheat bran. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 272–277. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.086
104. Liu, Z., Ying, Y., Li, F., Ma, C., Xu, P. (2010). Butanol production by Clostridium beijerinckii ATCC55025 from wheat bran. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 37(5), 495–501. https://doi.org/10.1007/s10295-010-0695-8
105. Wu, X., Liu, Q., Deng, Y., Li, J., Chen, X., Gu, Y. et.al. (2017). Production of itaconic acid by biotransformation of wheat bran hydrolysate with Aspergillus terreus CICC40205 mutant. *Bioresource Technology*, 241, 25–34. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.080
106. Favaro, L., Basaglia, M., Casella, S. (2012). Processing wheat bran into ethanol using mild treatments and highly fermentative yeasts. *Biomass and Bioenergy*, 46, 605–617. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.07.001
107. Di Fidio, N., Carmassi, L., Kasmiarti, G., Fulignati, S., Licursi, D., Galletti, A. M. R. et al. (2024). Chemical and enzymatic hydrolysis of waste wheat bran to sugars and their simultaneous biocatalytic conversion to valuable carotenoids and lipids. *Catalysis Today*, 442, Article 114941. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114941

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Gabdulla F. Kurbanov, Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–937–164–45–66 E-mail: tatanka.sn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3958-7326	**Курбанов Габдулла Фаритович** — лаборант-исследователь, лаборатория биотехнологий и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7–937–164–45–66 Email: tatanka.sn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3958-7326
Artem O. Prichepa, Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Тел.: +7–931–588–40–14 E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629	**Причепа Артем Олегович** — лаборант-исследователь, лаборатория биотехнологий и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7–931–588–40–14 E-mail: prichepa.a@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1037-5629
Anatoliy P. Nepomnyashiy, Junior Researcher, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–929–116–25–29 E-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704	**Непомнящий Анатолий Павлович** — младший научный сотрудник, лаборатория биотехнологий и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.:+7–929–116–25–29 e-mail: nepomnyashiy.95@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0088-2704
Ekaterina Yr. Ivanova, Research Assistant, Laboratory of Biotechnology and Bioengineering, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–905–999–07–15 E-mail: e_iva.nova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0793-2719	**Иванова Екатерина Юрьевна** — лаборант-исследователь, лаборатория биотехнологий и биоинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7–905–999–07–15 E-mail: e_iva.nova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0793-2719
Natalya Yu. Sharova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Тел.: +7–900–624–11–09 E-mail: n.sharova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-4208-9299 * corresponding author	**Шарова Наталья Юрьевна** — доктор технических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7–900–624–11–09 E-mail: n.sharova@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-4208-9299 * автор для контактов
Contribution	**Критерии авторства**
Gabdulla F. Kurbanov: conducting information research, creating drawings and tables. **Artyom O. Prichepa**: conducting information research, creating tables. **Ekaterina Yr. Ivanova**: conducting information research. **Anatoliy P. Nepomnyashiy**: conducting information research, creating drawings. **Natalya Yu. Sharova**: systematization of information data results, editing the article.	**Курбанов Г. Ф.**: проведение информационных исследований, создание рисунков и таблиц. **Причепа А. О.**: проведение информационных исследований, создание таблиц. **Иванова Е. Ю.**: проведение информационных исследований. **Непомнящий А. П.**: проведение информационных исследований, создание рисунков. **Шарова Н. Ю.**: систематизация результатов информационных данных, редактирование статьи.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-213-220

Received 05.11.2024
Accepted in revised 12.05.2025
Accepted for publication 14.05.2025
© Nepovinnykh N. V., Kozlov S. V., Ziruk I. V., Kutsenkova V.S,, Ghorghi Z. B., Hesarinejad M. A., Yeganehzad S., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

ASSESSMENT OF SAFETY AND TOLERABILITY OF HYBRID GEL ORAL ADMINISTRATION IN AN EXPERIMENT ON WISTAR RATS

Nataliia V. Nepovinnykh[1]*, Sergey V. Kozlov[1], Irina V. Ziruk[1], Vasilissa S. Kutsenkova[1], Zohreh B. Ghorghi[2,3], Mohammad A. Hesarinejad[2], Samira Yeganehzad[2]

[1] Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
[2] Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
[3] University of Tuscia, Viterbo, Italy

KEY WORDS:
oleogel, hydrogel, hybrid gel, safety, tolerability, hematological parameters, biochemical parameters, linear Wistar rats

ABSTRACT

Due to the negative health effects such as cardiovascular diseases, diabetes and obesity, the consumers avoid foods high in saturated fatty acids. For this reason, one of the main goals of the food industry is to develop the substitutes for solid fats rich in unsaturated fatty acids. Recent studies have shown that oleogels can successfully replace saturated fats in various foods such as cakes, biscuits, meat products, chocolate and ice cream. We have developed a hybrid gel in which oleogel is made up from the composition of hydrogel and oleogel in a ratio of 5:95. The hydrogel is obtained from a 2 % solution of sodium alginate in combination with oleogel made from grape seed oil and beeswax in a concentration of 20 %. The safety assessment of the food hybrid gel was carried out on laboratory animals (linear Wistar rats). The animals were split into three groups to conduct the research. The rats of the first group got per oral injection with the gel being researched at a dose of 1 g of hybrid gel / kg of rat weight, the second group received three-fold increased dose — 3 g of hybrid gel / kg of rat weight for 30 days, the third control group was fed with a standard diet. Based on the results obtained, the safety and tolerability of oral administration of an edible hybrid gel based on oleogel made up from beeswax in Wistar rats was defined. The prospects for creating edible hybrid gels with oleogel from beeswax seem promising, as they solve current dietary and health issues while providing functional and sensory benefits in food formulations.

FUNDING: The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00108 (https://rscf.ru/en/project/24-26-00108/).

ACKNOWLEDGMENT: The Authors would also like to thank Research Institute of Food Science and Technology (RIFST) and Iran Small Industries and Industrial Parks Organization (ISIPO), (Khorasan Razavi Branch) for their supports.

Поступила 05.11.2024
Поступила после рецензирования 12.05.2025
Принята в печать 14.05.2025
© Неповинных Н. В., Козлов С. В., Зирук И. В., Куценкова В. С., Горги З. Б., Хесаринеджад М. А., Еганехзад С., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ И ПЕРЕНОСИМОСТИ ПЕРОРАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО ГЕЛЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА КРЫСАХ ЛИНИИ WISTAR

Неповинных Н. В.[1]*, Козлов С. В.[1], Зирук И. В.[1], Куценкова В. С.[1], Горги З. Б.[2,3], Хесаринеджад М. А.[2], Еганехзад С.[2]

[1] Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия
[2] Научно-исследовательский институт пищевых наук и технологий, Мешхед, Исламская республика Иран
[3] Университет Тускиа, Витербо, Италия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
олеогель, гидрогель, гибридный гель, безопасность, переносимость, гематологические показатели, биохимические показатели, крысы линии Wistar

АННОТАЦИЯ

Негативные последствия для здоровья, такие как сердечно-сосудистые заболевания, диабет и ожирение, в том числе связанные с чрезмерным потреблением продуктов с высоким содержанием насыщенных жиров, призывают пищевую промышленность разрабатывать новые технологии заменителей твердых жиров, богатых ненасыщенными жирными кислотами. Недавние исследования показали, что олеогели могут успешно заменять насыщенные жиры в различных пищевых продуктах, таких как торты, печенье, мясные изделия, шоколад и мороженое. Нами разработан способ производства гибридного геля из смеси гидрогеля и олеогеля в соотношении 5:95, соответственно. Гидрогель представляет собой 2 %-ый раствор альгината натрия. Олеогель был изготовлен из масла виноградных косточек и пчелиного воска в концентрации 20 %. Оценку безопасности пищевого гибридного геля осуществляли на лабораторных животных (крысы линии Wistar). Для проведения исследований было сформировано три группы животных. Крысам первой группы орально вводили исследуемый гель в дозе 1 г гибридного геля/кг массы крысы, второй в трехкратно увеличенной дозе — 3 г гибридного геля/кг массы крысы в течение 30 дней, третья группа контрольная — содержалась на стандартном рационе. На основании полученных результатов была установлена безопасность и переносимость перорального применения съедобного гибридного геля на основе олеогеля из пчелиного воска на крысах линии Wistar. Перспективы создания съедобных гибридных гелей с олеогелем из пчелиного воска представляются многообещающими, поскольку они решают текущие диетические проблемы и проблемы со здоровьем, обеспечивая при этом функциональные и сенсорные преимущества в рецептурах пищевых продуктов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00108 (https://rscf.ru/project/24-26-00108/).

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность Научно-исследовательскому институту пищевой науки и технологий (RIFST) и Организации малых предприятий и промышленных парков Ирана (ISIPO) (филиал в Хорасане Резави) за поддержку.

FOR CITATION: **Nepovinnykh, N.V, Kozlov, S.V., Ziruk, I.V., Kutsenkova, V.S,, Ghorghi, Z.B., Hesarinejad, M.A. et al.** (2025). Assessment of safety and tolerability oral administration of hybrid gel in an experiment on Wistar rats. *Food Systems,* 8(2), 213–220. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-213-220

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Неповинных Н. В., Козлов С. В., Зирук И. В., Куценкова В. С., Горги З. Б., Хесаринеджад М. А. и др.** (2025). Оценка безопасности и переносимости перорального применения гибридного геля в эксперименте на крысах линии Wistar. *Пищевые системы*, 8(2), 213–220. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-213-220

1. Introduction

Restrictions imposed at the legislative level on application of trans and saturated fats [1,2], the growing concern of the scientific community and the food consumers about the negative impact of such types of fats on their health [3,4] urge the food industry to develop new technologies that contribute to the reformulation and modification of fat-containing food products composition. A wide range of well-studied fatty acids ensures that fat-based structuring is fairly versatile. Careful selection of the triglyceride composition in combination with proper processing will make it possible to create fat-containing food systems with a various range of hardness and melting points [5]. The production of food oleogels (oleogelation) is currently one of the safest technological methods to reduce the content or completely replace saturated and trans fats in food products [6,7]. In addition, the regulation of properties by adjusting the composition and combinations of gel systems by various combinations of hydrogels and oleogels leads to the formation of so-called hybrid gels (or bigels) with both hydrophilic and lipophilic properties [8,9].

Edible oleogels and hybrid gels are developed in many methods and are used in the food industry in the production of various food products: spreads [10–13], pastry [14,15] and confectionery products [16,17], cheese [18,19] and meat products [20–24]. As a result of the research, the developers have obtained acceptable reformulated food products with similar technological and rheological properties as the traditional food products or even food products with improved technical functionality. By their nature, oleogels are a variety of soft materials, that range from viscoelastic liquid to solid matter, consisting of an organic liquid (vegetable oil) and a gelling component, an organogelator capable of producing the formation of an ordered supramolecular structure and structuring of vegetable oil [25]. In most cases, low molecular weight amphiphilic molecules are responsible for gelation [26], which provide thermoregulative properties to the gel [27,28]. However, some biomacromolecules attract special attention, such as natural waxes, gums and biopolymers with gelling properties in oily media, [29,30].

Currently, recommendations for an optimal fatty acid intake profile often focus on limiting saturated fat intake to less than 10 % of the caloric content, thus maintaining trans fatty acid intake at the lowest possible level, and replacing saturated fats with the foods rich in mono- and polyunsaturated fatty acids [1]. However, this is a definite challenge for the food industry, since saturated fats, unlike unsaturated liquid oils, feature a solid consistency and provide the appropriate texture and stability to the finished food. Their exclusion may lead to a decrease in the consumer properties of the food products [6]. The solution to this problem can be found in oleogels and hybrid gels, which are healthy substitutes for solid fats obtained by converting liquid unsaturated oil into an elastic solid product with the help of organogelators and without changing the chemical characteristics of the liquid oil [7,9].

As can be seen, the process of obtaining and applying the various forms of oleogels and hybrid gels has been well studied in recent decades by the foreign scientists and domestic researchers at the scientific school of A. A. Kochetkova [4,13,15]. However, relatively few clinical evaluations of the volunteers who consumed the hybdrid gels, and biomedical studies of impact of oleogels and hybrid gels on the health status of laboratory animals have been conducted. For example, clinical trials of oleogels were organized in 2008 by the scientists from the University of Guelph (Canada) under the leadership of the professor Marangoni [31], who possesses extensive experience in the creation and application of oleogels in food industry. They conducted studies of the lipid composition of the relevant blood fraction in the volunteers after consuming the developed monoglyceride gels. Studies have shown that the blood lipid composition was lower in the group of the volunteers who consumed the developed monoglyceride gel than in the volunteers who consumed a compositionally equivalent oil-water mixture [31].

Later studies conducted by this group of the scientists have shown that coconut oil in the form of oleogel, compared with coconut oil in liquid form, featured better effect on triglycerides, glucose, insulin levels in the blood and appetite when consumed simultaneously with foods rich in carbohydrates [32].

Korean researchers conducted studies to determine the effect of edible oleogel on lipid metabolism in rats fed with a high-fat diet, and found that the use of oleogel based on rapeseed oil and beeswax in the diet effectively reduces adipogenesis and improves angiogenesis in obese rats [33]. Similar studies were conducted earlier by another group of scientists [34], who showed that the use of oleogel reduced the level of triglycerides by about 30 % in blood serum and liver, and increased the level of triglycerides excreted in the faeces by about 30 % compared with rats fed with separate components (rice bran wax and rice bran oil).

In this regard, conducting biomedical research of new forms of edible hybrid gels on laboratory animals remains relevant.

This study is aimed to develop and evaluate the safety and tolerability of edible hybrid gel in an *in vivo* experiment conducted on Wistar rats.

2. Materials and methods

2.1. Materials

The following prescription ingredients were used as material for the preparation of gels: sodium alginate (Parsian Gum Tam Co., Iran), beeswax (Zanburkala Co., Iran), grape seed oil (Monini Co., Italy), drinking water.

2.2. Oleogels and hybrid gels preparation

Oleogel samples were prepared by mixing 60 ml of grape seed oil with 10, 15, and 20 % beeswax according to the procedure presented in the article [29]. To produce a hybrid gel, 10 ml of 2 % sodium alginate in the form of a hydrogel [28] was mixed with oleogel, which contained 20 % beeswax, at four different ratios of hydrogel: oleogel (0:100, 1:99, 5:95, 10:90) [17] by mixing using a mechanical stirrer RZR2102 control (Heidolph, Germany) at 600 rpm for 45 minutes [28].

2.3. Microstructure of oleogels and hybrid gels

For analyze the shape and size of the crystals in oleogels and hybrid gels, transient polarized light microscopy (model BX60, Olympus Optical Co. Ltd, Japan) was used in dark and light fields at magnification of 100 times for oleogels and 400 times for hybrid gels.

2.4. Textural characteristics of oleogels and hybrid gels

The textural characteristics of oleogels and hybrid gels were studied using a texture analyzer (TA.XTplusC, Stable micro system, England). To assess the hardness of each oleogel sample, a penetration test was performed using a 2 mm penetrating probe 50 kg. The texture test was performed at least three times with a pre-penetration rate, a rate during penetration, and a post-penetration rate of 1, 2, and 10 mm/s, respectively, and a penetration depth of 5 mm at a temperature of 25 °C. Exponent software of version 6.1.1.0 was used to analyze the texture tests values.

2.5. Thermal properties of oleogels and hybrid gels

The thermal properties (initial and final melting points) of the samples were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC-600 model, Wuhan Bonnin Technology Ltd., China) using SPICO software (DSC1.0.0, China). To conduct the experiment, a sample weighing 18 mg was placed in an aluminum container, hermetically sealed, and heated from 25 °C (T_o is the initial melting point) to 100 °C, (T_m is the maximum melting point) at a heat rising rate of 5 °C/min [28].

2.6. Animal experiments

The experiment with laboratory animals was conducted in the vivarium of the Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov in accordance with the "Rules for work using experimental animals" (dated 12. Aug. 1977 No. 755), "International principles of the Helsinki Declaration on Humane Treatment of Animals", GOST ISO 10993-1-2011[1]. These studies were conducted according to the approved protocol and in accordance with the researcher's Standard Operating Procedures. The format of the study is defined by the "Rules for conducting a preclinical study of a medicinal product for veterinary use, a clinical study of a medicinal product for veterinary use, a bioequivalence study of a medicinal product for veterinary use" (No. 101 dated 06.Mar. 2018) and the "Guidelines for conducting Preclinical Studies of medicinal Products. Part One (2012). The zoohygienic conditions of all experimental animals were identical, regulated by the recommendations for the maintenance and feeding of laboratory animals (GOST 33215-2014)[2]. According to the study protocol, white Wistar rats with an initial body weight of 180–185 g participated in the experiment. The rats were split into three groups for the study with 12 animals each. The first group of rats (n = 12) was individually and orally fed with the test hybrid gel at a dose of 1 g / kg, once a day, for 30 days, the second group of rats (n = 12) received the hybrid gel orally at a three-fold increased dose of 3 g / kg, according to the same scheme. The third (control) group of rats (n = 12) was fed with a standard diet and did not receive a hybrid gel.

[1] GOST ISO 10993–1–2011. «Medical devices. Biological evaluation of medical devices. Part 1. Evaluation and testing». Retrieved from https://docs.cntd.ru/document/1200100813 Accessed October 12, 2024

[2] GOST 33215–2014 «Guidelines for accommodation and care of animals. Environment, housing and management» Retrieved from https://docs.cntd.ru/document/1200127789 Accessed October 14, 2024

Daily observations of experimental animals were carried out throughout the experiment. At the same time, attention was focused on the appearance and behavior of rats, their consumption of feed and water. The body weight of the animals was determined one day before the start of the experiment and kept being measured weekly until the end of the experiment. Body temperature was measured using a 153-IRB infrared thermometer (Bioseb SAS, France). At the beginning of the experiment, individual body weight values did not deviate from the average value in the group by more than 10%. The animals were weighed on a PA2102C scale (Ohaus, USA).

To assess the effect of the hybrid gel on the hematological and biochemical parameters of animal blood, it was aspirated before the start of the experiment and on the 30th day after the last feeding with the hybrid gel.

Blood was taken from the left ventricle of the heart using an inhalation anesthetic (isoflurane); the skin at the aspiration site was previously disinfected with a 95% solution of ethyl alcohol.

Clinical blood analysis was performed on a MicroCC-20Vet hematology analyzer (High Technology Inc., USA).

Biochemical studies of blood serum (determination of total protein, albumin, globulin, creatinine, urea, glucose, and the activity of major enzymes) were performed on a StatFax 3300 analyzer (Awareness Technology Inc., USA) using diagnostic systems from Deacon DS (Russia).

Histological sections of 5–7 microns thick were cut off using a Microm HM 525 freezing microtome (Microm International GmbH, Germany) and a Microm HM 450 sledging microtome (Microm International GmbH, Germany). For an overview, the prepared histological sections were stained with hematoxylin and eosin. Histological studies were performed using a Biomed C-1 biological microscope (Micromed, Russia) and an LF — 302 fluorescence microscope (Leader Precision Instrument Co. Ltd, China) at a magnification of 100 times. Morphometric data — the radius from the central veins to the wall of the liver lobules — were examined using a biological microscope with an eyepiece ruler of 60 notch divisions and a screw eyepiece micrometer MOB-1–15x (Micromed, Russia).

2.7. Statistical analysis

All studies of oleogels and hybrid gels were carried out three times. The SPSS software (version 16, USA) was used to create a fully randomized complete factor analysis to compare samples with a significance level series at 5%. The version 2010 multiple Duncan test was used to compare averages, and Microsoft Excel was used to plot graphs.

The results of studies on laboratory animals are presented as average values with a significance level of $P=0.05$ compared with the parameters of intact animals. Statistical data processing was carried out on the basis of Fischer and Student criteria.

3. Results and discussions

3.1. Microstructure, textural characteristics and thermal properties of oleogels

The microstructure of oleogels was examined under a polarized light microscope for better understanding the impact of beeswax concentration (10%, 15%, and 20%) on crystal formation (Figure 1).

As can be seen from Figure 1, the crystal network undergoes significant changes along with an increase in the concentration of beeswax in the system. Large number of crystals are observed as the beeswax concentration increases. The smallest crystals were found in an oleogel sample with a beeswax concentration of 10%. Since the oleogel mixture undergoes a cooling process and becomes solid, the increased presence of beeswax molecules in the gel matrix gives the crystals more opportunities to orderly arrange themselves in close proximity to each other. Consequently, this leads to the formation of larger crystal structures [28].

The textural parameters of oleogels from grape seed oil and beeswax were studied at concentrations of 10%, 15% and 20%, as they are shown in Table 1. The results of this study are consistent with the results published by Öğütcü and Yılmaz [10], as well as Hwang et al. [35], which prove that an increase in wax concentration in oil leads to an increase in the hardness and adhesiveness of oleogels.

Table 1. **Textural characteristics of oleogels**
Таблица 1. **Текстурные характеристики олеогелей**

Texture characteristics	Beeswax concentration in the oleogel composition		
	20%	15%	10%
Hardness, N	23.09 ± 0.95^a	5.74 ± 0.12^b	1.92 ± 0.07^c
Adhesiveness, $N.s^{-1}$	-14.45 ± 0.67^a	-14.44 ± 0.81^a	-3.74 ± 0.10^b

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly ($P>0.05$).

As can be seen from the data, there was a significant difference in the hardness of oleogel samples with concentrations of 20, 15, and 10%. This increase may be due to the higher content of beeswax molecules available in the gel matrix. As more and more of the liquid phase (oil) enters the crystal mesh of the beeswax, the structure of the oleogel solidifies [36].

In a study conducted by Öğütcü and Yılmaz [10], the textural properties of walnut oil oleogels with the addition of beeswax were evaluated, which showed that an increase in the concentration of oleogel in the composition leads to an increase of hardness and adhesiveness. Similarly, another study using soybean oil oleogels with sunflower wax showed similar results, especially with respect to the strength parameter, along with an increase in wax concentration [37, 38].

For further analysis of the characteristics of crystals formed in oleogels, the method of differential scanning calorimetry was applied. The thermal properties of oleogels (initial (T_o) and maximum (T_m) melting points are shown in Table 2.

Table 2. **Thermal properties of oleogels**
Таблица 2. **Термические свойства олеогелей**

Thermal properties	Beeswax concentration in the oleogel composition		
	20%	15%	10%
T_o, °C	56.7 ± 0.46^a	55.1 ± 0.61^b	52.0 ± 0.53^c
T_m, °C	59.8 ± 0.70^a	58.2 ± 0.49^b	56.0 ± 0.38^c

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly ($P>0.05$).

In a study conducted by Jana and Martini [39], it was found that certain processing conditions can influence on phase separation in wax/oil systems. The wax concentration and the type of oil are important factors influencing the wax crystallization process. An increase in the beeswax concentration in the oleogel leads to an increase in the number of beeswax molecules in the system, which leads to a more uniform appearance of the final product. This is consistent with the conclusions of the other researchers [10]. The initial and maximum melting points increased along with an increase in the percentage of beeswax in the oleogels.

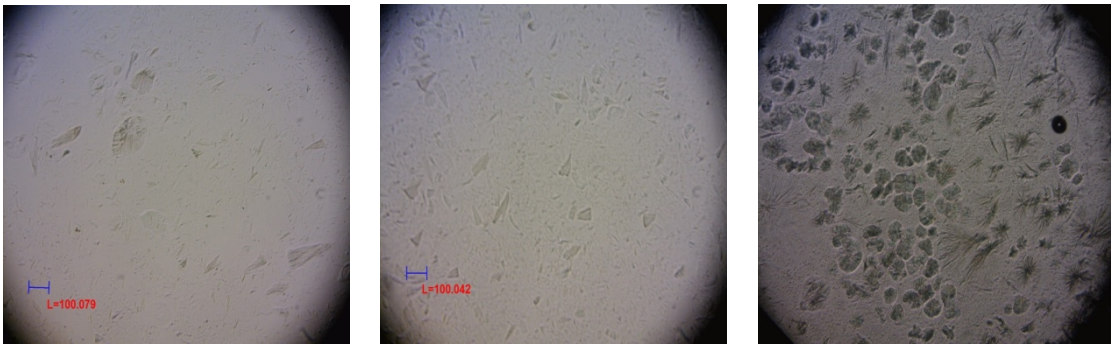


Figure 1. **Microstructure of oleogels (A – oleogel with 10% beeswax, B — oleogel with 15% beeswax, C — oleogel with 20% beeswax)**
Рисунок 1. **Микроструктура олеогелей (А — олеогель с 10% пчелиного воска, В — олеогель с 15% пчелиного воска, С — олеогель с 20% пчелиного воска)**

This phenomenon can be explained by an increase in the number of crystals formed due to an increase in the surface area of beeswax molecules in the mixture. As the number of crystals increases, the temperature of the crystallization beginning and the melting point also increase.

In their study, the scientists [27] used a combination of walnut oil with beeswax and monoglycerides. The results showed that the melting point and enthalpy of oleogel were generally similar in the samples of commercial shortening. Thus, these oleogels can be considered suitable alternatives for similar applications and do not create problems with the thermal regime of food products processing. In addition, an increase in the concentration of oleogel led to an increase in the melting point and enthalpy values in the samples. This discovery points to an important technological aspect in which the appropriate level of oleogel addition can be determined based on thermal parameters and other measurements, taking into account specific end-use requirements (for example, food texture, taste, etc.).

Thus, based on the research conducted, an oleogel sample with a beeswax concentration of 20% was selected for the production of hybrid gels, as it demonstrated the best textural characteristics and thermal properties. The developed sample possessed the taste and smell of beeswax, but this effect can be masked with flavoring agents when developing food products.

3.2. Microstructure, textural characteristics and thermal properties of hybrid gels

The microstructure of hybrid gels was studied using a polarized light microscope. The data obtained show that as the hydrogel ratio in the hybrid gel increased, the average particle size also increased slightly, as shown in Figure 2.

However, no significant differences were found ($P>0.05$), possibly due to the fact that all hybrid gel samples were produced using the same mixing process (mixing speed), resulting in particles of approximately identical size. This conclusion is consistent with the research conducted by Martins and co-authors [8].

When making hybrid gels, it is important to take into account the ratio of the gel-forming phases (hydrogel and oleogel) in the overall gel composition. Table 3 shows the hardness and adhesiveness data for various hybrid gel samples.

Table 3. **Textural characteristics of hybrid gels**

Таблица 3. **Текстурные характеристики гибридных гелей**

Texture characteristics	Hydrogel: oleogel ratio in hybrid gels			
	0:100	1:99	5:95	10:90
Hardness, gf	321.47±3.60^{c}	323.37±4.22^{c}	396.13±4.58^{b}	472.27±3.67^{a}
Adhesiveness, gf.s^{-1}	154.40±4.21^{c}	143.07±3.86^{d}	187.23±4.32^{b}	242.23±4.32^{a}

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly ($P>0.05$).

It can be seen from the data in Table 3 that the textural characteristics of hybrid gels increase along with an increase in the hydrogel ratio in the hybrid gel, which is most likely due to an increase in the number of hydrogen bonds. The greater the number of hydrogen bonds, the stronger the sample becomes. The hardness data did not show a significant difference between the 1:99 sample and the control sample, as the ratio was not high enough to set sufficient hydrogen bonds. However, significant differences were already observed in the hydrogel: oleogel ratio of 5:95 and 10:90, respectively [38].

Figure 3 shows data on the thermal properties of the hybrid gels under study.

As can be seen from the data in Figure 3, the initial and maximum temperatures of the hybrid gel samples melting increased along with an increase in the amount of hydrogel in the hybrid gel, which can also be explained by the high moisture content in the hybrid gel system, leading to the formation of more hydrogen bonds. Their destruction requires more energy, which leads to an increase in the system melting point temperature along with increasing the share of hydrogel in the hybrid gel.

Previous researchers [39] reported that hydrocolloidal molecules in the form of intramolecular and/or intermolecular bonds contribute to the formation of denser layers in oleogels. It takes more energy to overcome these bonds. In addition, the beeswax in the hybrid gel system forms a gel-like mesh that traps oil droplets and potentially binds to hydrocolloid molecules. This mesh creates a dense environment and is able to trap water molecules. The peak values for hybrid gels of 10:90 and 5:95 showed no significant difference ($P>0.05$). This indicates that in the 5:95 sample, almost all vegetable oil molecules formed bonds with trapped water molecules, while in the 10:90 sample the number of bonds did not increase. This fact is also confirmed by the research of Kwon and Chang, demonstrating that the excessive water in the gel system was retained inside the oil droplets by beeswax, without increasing the number of intermolecular bonds between water and vegetable oil [40].

One sample of a hybrid gel in a hydrogel: oleogel ratio of 5:95 was selected as the best one to study safety and tolerability.

3.3. Assessment of safety and tolerability of edible hybrid gel oral administration in an experiment on Wistar rats

In the course of the conducted studies, it has been reliably established that prolonged oral administration of the hybrid gel for 30 days does not adversely affect the basic physiological parameters of the rats. The experimental animals were active throughout the experiment, reacted adequately to external stimuli, and actively consumed food and water. The appearance of the animals corresponded to the species criteria, no grooming violations were noted. No side effects, adverse reactions, or serious adverse reactions were detected in laboratory animals during and after the use of the hybrid gel preparation in the recommended and three-fold increased dose. Table 4 shows data on the rats body temperature dynamics in the course of their consuming hybrid gel. As can be seen throughout the experiment, the parameters remained within the limits of normal physiological values in all groups.

Table 4. **Dynamics of body temperature in rats after oral administration of hybrid gel**

Таблица 4. **Динамика температуры тела крыс при применении гибридного геля**

Name of the group	Body temperature in rats during the experiment, °C	
	1st day	30th day
First group (experimental group)	40.9±0.5^{a}	40.9±0.4^{a}
Second group (experimental group)	41.0±0.3^{a}	40.6±0.4^{a}
Third group (control group)	40.8±0.5^{a}	40.6±0.3^{a}

^{a} — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly ($P>0.05$).

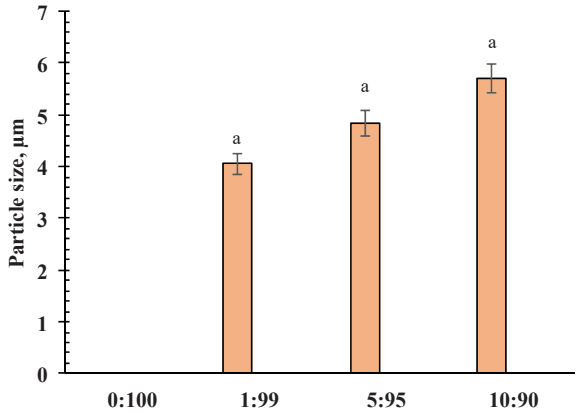


Figure 2. **Particle size of hybrid gels**
(a — measurement error according to the statistical analysis data)

Рисунок 2. **Размер частиц в образцах гибридных гелей**
(a — погрешность в соответствии с данными по статистическому анализу)

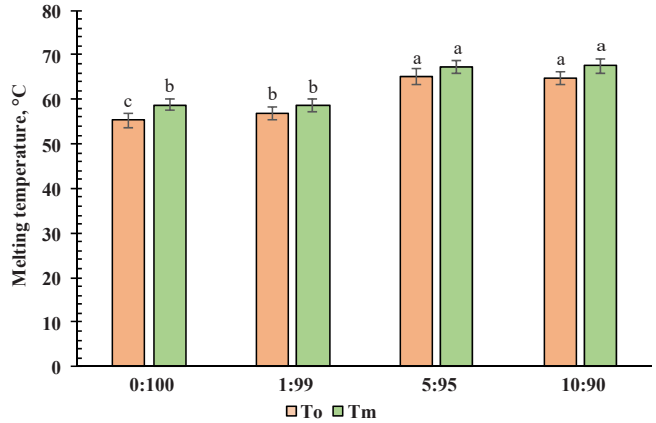


Figure 3. **Thermal properties of hybrid gels**
(a, b, c — measurement errors according to statistical analysis data)

Рисунок 3. **Термические свойства гибридных гелей**
(a, b, c — погрешности в соответствии с данными по статистическому анализу)

Table 5 shows the hematological parameters of rat blood after oral administration of the hybrid gel, which proves that before the start of the experiment hematological parameters of peripheral blood in all groups of rats were within the normal physiological values. In animals of the first and second experimental groups, on the first day after the last oral administration of the hybrid gel, no significant differences were found between the final and initial values. From the results obtained, it can be concluded that the use of the developed hybrid gel in the diet of Wistar rats in a single and three-fold increased dose for 30 days does not provide a toxic effect on the hematological parameters of animal blood.

Table 5. **Hematological parameters of rat blood after oral administration of hybrid gel**

Таблица 5. **Гематологические показатели крови крыс после перорального введения гибридного геля**

Parameter	Days of the experiment	Name of the group: First group (experimental group)	Second group (experimental group)	Third group (control group)	Norm
Erythrocytes, $\times 10^{12}$/L	0	7.25 ± 0.7^a	7.29 ± 0.4^a	7.14 ± 0.5^a	4.6–10
	30	7.38±0.7^a	7.68 ± 0.7^a	7.29 ± 0.6^a	
Hemoglobin, g/L	0	117.9 ± 6.2^a	120.4 ± 5.7^b	115.7 ± 8.3^a	93–153
	30	125.3 ± 6.4^a	119.3 ± 6.4^b	126.5±5.4^a	
Leukocytes, $\times 10^9$/L	0	10.8 ± 2.6^a	12.7 ± 3.4^b	11.9 ± 4.9^c	5.5–19.5
	30	4.8 ± 3.9^a	8.9 ± 1.5^b	12.4 ± 3.6^c	
Neutrophils, %	0	26.2 ± 1.8^a	27.6 ± 2.7^a	26.2 ± 3.2^a	18–30
Eosinophils, %		5.6 ± 0.7^a	6.2 ± 0.6^b	5.2 ± 1.6^a	1–8
Monocytes, %		3.8 ± 1.0^a	4.0 ± 1.2^b	4.2 ± 1.0^b	0–10
Basophils, %		0.0 ± 0.0^a	0.4 ± 0.7^b	0.6 ± 0.7^c	0–3
Lymphocytes, %		24.3 ± 1.9^a	23.6 ± 3.9^a	24.8 ± 3.2^a	12–45
Neutrophils, %	30	26.0 ± 3.4^a	25.2 ± 3.2^a	26.6 ± 2.6^a	18–30
Eosinophils, %		4.8 ± 1.4^a	4.8 ± 1.4^a	5.2 ± 1.6^b	1–8
Monocytes, %		3.8 ± 1.0^a	3.6 ± 1.1^a	4.6 ± 0.7^b	1–10
Basophils, %		0.2 ± 0.6^a	0.4 ± 0.7^b	0.5 ± 0.7^c	0–3
Lymphocytes, %		22.8 ± 3.0^a	66.2 ± 3.0^b	63.6 ± 3.4^b	12–45

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly (P>0.05).

When analyzing the biochemical parameters of the blood serum of the rats (Table 6), which were orally injected with an edible hybrid gel daily for 30 days, it was reliably established that there was no negative effect on the hepatocellular and urinary systems. Given the fact that the liver is the central organ of metabolism and it plays a major role in the detoxification of nutrients supplied with the feed, the negative impact of enteral food products will primarily affect liver's functional activity. During the experiment on the oral administration of the hybrid gel, no violations of the functional activity of hepatocytes were detected. Along with this, the kidneys are responsible for removing metabolic products from the animal's body. Thus, it can be stated that the metabolites of the edible gel do not adversely affect the functional activity of the urinary system. These statements are confirmed by the absence of changes in biochemical parameters in all experimental groups of the rats throughout the experiment.

Another parameter that highlights the physiological development of the rats is body weight increase. The results of the dynamics of the rats body weight increase against the background of edible hybrid gel consumption for 30 days are shown in Table 7.

Analyzing the data, it was found that the weight growth rates of the rats that consumed the edible hybrid gel and the rats in the control group had no significant differences, and all of them corresponded to the normal weight criteria for this rat breed. The weight increase in 30 days was 39 ± 2 g for the first experimental group, 38 ± 2 g for the second experimental group, and 41 ± 1 g for the third control group.

The results of the conducted studies allow concluding that after a course of oral administration of the edible hybrid gel, no external signs of intoxication were observed in the rats throughout the experiment. All the rats in both the experimental and control groups were active. The reaction to external stimuli was preserved, appetite and water consumption were not impaired. The dynamics of body weight gain in the rats of the experimental groups had no significant differences between the control group, and corresponded to the breed criteria.

Table 6. **Biochemical parameters of rat blood serum after oral administration of hybrid gel**

Таблица 6. **Биохимические показатели сыворотки крови крыс после перорального введения гибридного геля**

Parameter	Days of the experiment	Name of the group: First group (experimental group)	Second group (experimental group)	Third group (control group)	Norm
AST, IU/L	0	206.8 ± 2.2^a	208.3 ± 1.9^c	207.9 ± 3.2^b	60–223
	30	138.9 ± 2.3^a	173.7 ± 2.7^b	209.9 ± 2.7^c	
ALT, IU/L	0	59.9± 3.3^a	63.7± 2.3^b	64.9± 1.3^c	34–76
	30	38.5± 1.3^a	61.1± 3.4^b	65.5± 1.5^c	
Creatinine, mmol/L	0	65.8 ± 2.5^a	67.3 ± 4.7^c	63.4 ± 5.0^b	44–85
	30	83.7 ± 1.3^c	74.4 ± 3.1^b	62.1 ± 6.2^a	
Urea, mmol/L	0	5.7 ± 3.1^a	6.9 ± 2.1^c	5.9 ± 1.1^b	3–7.8
	30	6.9 ± 1.1^c	6.3 ± 2.3^b	5.4 ± 1.3^a	
Glucose, mmol/L	0	12.2 ± 1.6^a	12.8 ± 2.2^c	12.4 ± 2.1^b	3–13
	30	13.1 ± 1.9^c	12.8 ± 1.2^b	12.4 ± 1.8^a	
Albumin, g/L	0	24.8 ± 1.9^b	25.3 ± 2.8^c	24.1 ± 1.7^a	25–38
	30	25.8 ± 1.5^b	26.1 ± 2.8^c	23.7 ± 1.8^a	
Total protein, g/L	0	53.8 ± 3.6^b	54.1 ± 3.2^c	51.6 ± 1.2^a	59–82
	30	54.6 ± 4.3^b	54.9 ± 3.3^c	52.1 ± 2.8^a	
Globulin, g/L	0	29.0 ± 3.2^b	28.8 ± 3.1^b	27.5 ± 1.8^a	20–32
	30	28.9 ± 4.2^a	28.8 ± 4.2^a	28.4 ± 2.2^a	
Alkaline phosphatase, mmol/L	0	2.6 ± 0.7^a	3.1 ± 1.6^b	2.9 ± 0.6^a	2–4
	30	3.2 ± 0.9^b	2.6 ± 0.8^a	2.7 ± 1.1^a	

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly (P>0.05).

Table 7. **Dynamics of body weight gain in the rats after oral administration of hybrid gel**

Таблица 7. **Динамика прироста массы тела у крыс после перорального введения гибридного геля**

Days of the experiment	Weight of rats after oral hybrid gel administration, g: First group (experimental group)	Second group (experimental group)	Third group (control group)
1st day	180 ± 7^a	181 ± 5^a	185 ± 6^a
30th day	219 ± 4^a	219 ± 3^a	226 ± 3^b

a, b — average data of repetitions with the same superscripts do not differ significantly (P>0.05).

The biochemical parameters of blood corresponded to physiological norms, while there were no significant changes in those values in the experimental and control groups during the experiment. The data obtained proves the absence of violations of the functional state of the kidneys and liver in experimental laboratory animals.

On the 30th day of the experiment, one animal was selected from each group, and euthanasia was performed with subsequent liver extraction for histological studies (Figure 4).

Analyzing the data in Figure 4, it can be seen that a clear, multifaceted lobular liver parenchyma is visualized on histological sections, delimited by loose connective tissue. Inside the lobules, hepatocyte cells are quite expressed in the form of a hexagon, the nuclei of the latter are sufficiently visualized in the amount of 2–3 pieces. Between the lobules, the liver triads are clearly visible, represented by the interlobular veins and arteries, as well as the bile duct. In the liver of laboratory animals of all experimental groups, the walls of the central vessels of the lobules are sufficiently structured, their layers are well expressed, a small number of them were blood-filled, which indicates a more intensive blood circulation in the largest wall-mounted digestive gland.

The morphometric parameters of the liver (radius from the lobule wall to the central vein) of all experimental groups of rats are shown in Table 8.

Table 8. **Morphometric parameters of the liver**

Таблица 8. **Морфометрические показатели печени**

Radius of liver lobules, microns		
First group (experimental group)	Second group (experimental group)	Third group (control group)
11.21 ± 0.53^b	13.42 ± 0.52^c	08.10 ± 0.41^a

a, b, c — average data of repetitions in one line with the same superscripts do not differ significantly (P>0.05).

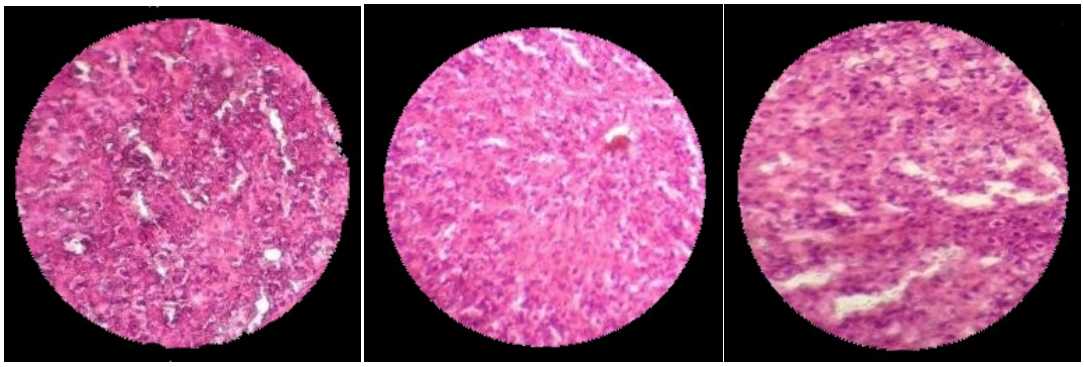


Figure 4. **Histological studies of rats liver after oral administration of hybrid gel** (A — first experimental group, B — second experimental group, C — control group). Staining with hematoxylin and eosin, at magnification ×100

Рисунок 4. **Гистологические исследования печени крыс после перорального введения гибридного геля** (А — первая экспериментальная группа, В — вторая экспериментальная группа, С — контрольная группа). Окраска гематоксилин и эозином, при увеличении ×100

Table 8 shows that the radius from the central vein to the lobule wall in the rats of the control group averaged 08.10±0.41 microns, in the first experimental group — 11.21±0.53 microns, and in the second — 13.42±0.52 microns.

Data analyses from histological and morphometric studies of the liver of the rats from the control group and experimental group demonstrated that no significant differences were detected, which proves the safety of using the hybrid gel in the diet of the animals.

4. Conclusions

Analysis of the microstructural, textural and thermal properties of oleogels and hybrid gels has shown that beeswax improves textural and thermal characteristics, while the hydrogel portion affects the adhesion and hardness of gel matrices. During the research it was reliably established that prolonged oral administration of the hybrid gel did not cause clinical signs of intoxication, the rats of all experimental groups adequately reacted to external irritating factors throughout the study period, the rats were active, their appetite and water consumption were relevant to their natural physiological form. During the experiment, a positive increase in body weight was observed, which corresponded to the age and physiological norm of the laboratory rats. Based on the results obtained, the safety and tolerability of hybrid gel oral administration in Wistar rats was proved. The prospects for creating edible hybrid gels seem promising, as they solve current dietary and health issues while providing functional and sensory benefits in food formulations. Continuous research and progress in this area will be crucial to unlock the entire potential of these innovative ingredients in the food industry.

REFERENCES

1. FAO. (2010). Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation. FAO, Rome, Italy, 2010.
2. Menaa, F., Menaa, A., Tréton J., Menaa, B. (2013). Technological approaches to minimize industrial *trans* fatty acids in foods. *Journal of Food Science*, 78(3), R377-R386. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12055
3. Guasch-Ferré, M., Babio, N., Martínez-González, M. A., Corella, D., Ros, E., Martín-Peláez, S. et al. (2015). Dietary fat intake and risk of cardiovascular disease and all-cause mortality in a population at high risk of cardiovascular disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 102(6), 1563–1573. https://doi.org/10.3945/ajcn.115.116046
4. Кочеткова, А.А., Воробьева, В.М., Саркисян, В.А., Воробьева, И.С. (2024). Приоритетные особенности пищевой продукции для здоровьесбережения. *Мясные технологии*, 12(264), 24–28. [Kochetkova, A. A., Vorob'eva, V.M., Sarkisyan, VA., Vorob'ev, I.S. (2024). Priority features of food products for health protection. *Meat Technology*, 12(264), 24–28. (In Russian)] https://doi.org/10.33465/2308-2941-2024-12-24-28
5. Daniel, J., Rajasekharan, R. (2003). Organogelation of plant oils and hydrocarbons by long-chain saturated FA, fatty alcohols, wax esters, and dicarboxylic acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 80(5), 417–421. https://doi.org/10.1007/s11746-003-0714-0
6. Stortz, T. A., Zetzl, A. K., Barbut, S., Cattaruzza, A., Marangoni, A. G. (2012). Edible oleogels in food products to help maximize health benefits and improve nutritional profiles. *Lipid Technology*, 24(7), 151–154. https://doi.org/10.1002/lite.201200205
7. Puşcaş, A., Mureşan, V., Socaciu, C., Muste, S. (2020). Oleogels in food: A review of current and potential applications. *Foods*, 9, 70–97. https://doi.org/10.3390/foods9010070
8. Martins, A. J., Silva, P., Maciel, F., Pastrana, L. M., Cunha, R. L., Cerqueira, M. A. et al. (2019). Hybrid gels: Influence of oleogel/hydrogel ratio on rheological and textural properties. *Food Research International*, 116, 1298–1305. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.019
9. Sinha, S. S., Upadhyay, A., Singh, A., Mishra, S., Pandey, N. (2024). Bigels a versatile gel composite for tailored application in food industries: A review. *Food Structure*, 41, Article 100380. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100380
10. Öğütcü, M., Yılmaz, E. (2014). Oleogels of virgin olive oil with carnauba wax and monoglyceride as spreadable products. *Grasas y Aceites*, 65(3), Article e040. https://doi.org/10.3989/gya.0349141
11. Mert, B., Demirkesen, I. (2016). Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product. *Food Chemistry*, 199, 809–816. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.087
12. Palla, C., Giacomozzi, A., Genovese, D. B., Carrín, M. E. (2017). Multi-objective optimization of high oleic sunflower oil and monoglycerides oleogels: Searching for rheological and textural properties similar to margarine. *Food Structure*, 12, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.foostr.2017.02.005
13. Sobolev, R., Frolova, Yu., Sarkisyan, V., Kochetkova, A. (2023). Waxy oleogels for partial substitution of solid fat in margarines. *Gels*, 9(9), Article 683. https://doi.org/10.3390/gels9090683
14. Giacomozzi, A. S., Carrín, M. E., Palla, C. A. (2018). Muffins elaborated with optimized monoglycerides oleogels: From solid fat replacer obtention to product quality evaluation. *Journal of Food Science*, 83(6), 1505–1515. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14174
15. Фролова, Ю.В., Соболев, Р.В., Саркисян, В.А., Кочеткова, А.А. (2022). Формирование органолептического профиля сахарного печенья с модифицированным жировым компонентом. *Вопросы питания*, 91(2), 93–98. [Frolova, Yu.V., Sobolev, R.V., Sarkisyan, V.A., Kochetkova, A.A. (2022). Formation of the organoleptic profile of sugar cookies with a modified fat component. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*, 91(2), 93–98. (In Russian)] https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-2-93-98
16. Patel, A. R., Rajarethinem, P. S., Gręd owska, A., Turhan, O., Lesaffer, A., De Vos, W. H. et al. (2014). Edible applications of shellac oleogels: Spreads, chocolate paste and cakes. *Food and Function*, 5(4), 645–652. https://doi.org/10.1039/c4fo00034j
17. Ghorghi, Z. B., Yeganehzad, S., Hesarinejad, M. A., Faezian, A., Kutsenkova, V., Gao, Z. et al. (2023). Fabrication of novel hybrid gel based on beeswax oleogel: Application in the compound chocolate formulation. *Food Hydrocolloids*, 140, Article 108599. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108599
18. Bemer, H. L., Limbaugh, M., Cramer, E. D., Harper, W. J., Maleky, F. (2016). Vegetable organogels incorporation in cream cheese products. *Food Research International*, 85, 67–75. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.016
19. Wang, Q., Espert, M., Hernández, M. J., Salvador, A., Sanz, T. (2024). Effect of cellulose ether emulsion and oleogel as healthy fat alternatives in cream cheese. Linear and nonlinear rheology, texture and sensory properties. *Food Hydrocolloids*, 150, Article 109740. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109740
20. Lupi, F. R., Gabriele, D., Baldino, N., Seta, L., de Cindio, B., De Rose, C. (2012). Stabilization of meat suspensions by organogelation: A rheological approach. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114(12), 1381–1389. https://doi.org/10.1002/ejlt.201200212
21. Jimenez-Colmenero, F., Salcedo-Sandoval, L., Bou, R., Cofrades, S., Herrero, A. M., Ruiz-Capillas, C. (2015). Novel applications of oil-structuring methods as a strategy to improve the fat content of meat products. *Trends in Food Science and Technology*, 44(2), 177–188. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.011
22. Barbut, S., Wood, J., Marangoni, A. (2016). Quality effects of using organogels in breakfast sausage. *Meat Science*, 122, 84–89. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.022
23. Moghtadaei, M., Soltanizadeh, N., Goli, S. A. H. (2018). Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger. *Food Research International*, 108, 368–377. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.051

24. Oh, I., Lee, J., Lee, H. G., Lee, S. (2019). Feasibility of hydroxypropyl methylcellulose oleogel as an animal fat replacer for meat patties. *Food Research International*, 122, 566–572. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.012
25. Co, E. D. Marangoni, A.G. (2012). Organogels: An alternative edible oil-structuring method. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(5), 749–780. https://doi.org/10.1007/s11746-012-2049-3
26. Wang, Z., Chandrapala, J., Truong, T., Farahnaky, A. (2023). Multicomponent oleogels prepared with high- and low-molecular-weight oleogelators: Ethylcellulose and waxes. *Foods*, 12(16), Article 3093. https://doi.org/10.3390/foods12163093
27. Öğütcü, M., Yılmaz, E. (2015). Characterization of hazelnut oil oleogels prepared with sunflower and carnauba waxes. *International Journal of Food Properties*, 18(8), 1741–1755. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.933352
28. Banerjee, S., Das, R. K., Terech, P., de Geyer, A., Aymonier, C., Loppinet-Serani, A. et al. (2013). Hybrid organogels and aerogels from co-assembly of structurally different low molecular weight gelators. *Journal of Materials Chemistry*, 1(20), 3305–3316. https://doi.org/10.1039/C3TC30104D
29. BaratianGhorghi, Z., Faezian, A., Yeganehzad, S., Hesarinejad, M. A. (2022). Changes in thermal, textural, color and microstructure properties of oleogel made from beeswax with grape seed oil under the effect of cooling rate and oleogelator concentration. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 11(1), 43–54. https://doi.org/10.22101/jrifst.2022.283673.1242
30. Martins, A. J., Cerqueira, M. A., Fasolin, L. H., Cunha, R. L., Vicente, A. A. (2016). Beeswax organogels: Influence of gelator concentration and oil type in the gelation process. *Food Research International*, 84, 170–179. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.03.035
31. Marangoni, A. G., Idziak, S. H. J., Rush, J. W. E. (2008). Controlled release of food lipids using monoglyceride gel phases regulates lipid and insulin metabolism in humans. *Food Biophysics*, 3, 241–245. https://doi.org/10.1007/s11483-008-9054-y
32. Tan, S.-Y., Wan-Yi Peh, E., Marangoni, A. G., Henry, C. J. (2017). Effects of liquid oil vs. oleogel co-ingested with a carbohydrate-rich meal on human blood triglycerides, glucose, insulin and appetite. *Food and Function*, 8, 241–249. https://doi.org/10.1039/C6FO01274D
33. Issara, U., Park, S., Lee, S., Lee, J., Park, S. (2020). Health functionality of dietary oleogel in rats fed high-fat diet: A possibility for fat replacement in foods. *Journal of Functional Foods,* 70, Article 103979. https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103979
34. Limpimwong, W., Kumrungsee, T., Kato, N., Noriyuki, Y., Thongngam, M. (2017). Rice bran wax oleogel: A potential margarine replacement and its digestibility effect in rats fed a high-fat diet. *Journal of Functional Foods,* 39, 250–256. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.10.035
35. Hwang, H.-S., Kim, S., Singh, M., Winkler-Moser, J. K., Liu, S. X. (2012). Organogel formation of soybean oil with waxes. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(4), 639–647. https://doi.org/10.1007/s11746-011-1953-2
36. Куценкова, В.С., Неповинных, Н. В., Еганехзад, С. А. (2023). Гибридный гель для замены твердых жиров в кондитерских изделиях. *Техника и технология пищевых производств*, 1(53), 183–191. [Kutsenkova, V.S., Nepovinnykh, N.V., Yeganehzad, S.A. (2023). Hybrid gel as a substitute for hard fats in confectionery. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1(53), 183–191. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2426
37. Martins, A. J., Silva, P., Maciel, F., Pastrana, L. M., Cunha, R. L., Cerqueira, M. A. et al. (2019). Hybrid gels: Influence of oleogel/hydrogel ratio on rheological and textural properties. *Food Research International*, 116, 1298–1305. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.019
38. Неповинных, Н. В., Еганехзад, С. А. (2024). Влияние соотношения гидрогель/олеогель на физико-химические и текстурные свойства пищевых гибридных гелей. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(396), 88–91. [Nepovinnykh, N.V., Yeganehzad, S.A. (2024). Influence of hydrogel/oleogel ratio on physico-chemical and textural properties of food hybrid gels. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), 88–91. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.14
39. Jana, S., Martini, S. (2014). Effect of high-intensity ultrasound and cooling rate on the crystallization behavior of beeswax in edible oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(41), 10192–10202. https://doi.org/10.1021/jf503393h
40. Kwon, U. H., Chang, Y. H. (2022). Rheological and physicochemical properties of oleogel with esterified rice flour and its suitability as a fat replacer. *Foods*, 11(2), Article 242. https://doi.org/10.3390/foods11020242

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Nataliia V. Nepovinnykh, Doctor of Technical Science, Professor, Foodstuff Technology Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov 4, building 3, Peter Stolypin Ave., 410012, Saratov, Russia Tel.: +7–917–209–30–94 E-mail: nnepovinnykh@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-9202 * corresponding author	**Наталия Владимировна Неповинных** — доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра технологии продуктов питания, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова 410012, Россия, Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3 Тел.: +7–917–209–30–94 E-mail: nnepovinnykh@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-9202 * автор для контактов
Sergey V. Kozlov, Doctor of Veterinary Science, Professor, Animal Diseases and Veterinary and Sanitary Expertise Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov 4, building 3, Peter Stolypin Ave., 410012, Saratov, Russia Tel.: +7–917–214–19–38 E-mail: kozlovsv@sgau.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2164-8140	**Сергей Васильевич Козлов** — доктор ветеринарных наук, профессор, кафедра болезни животных и ветеринарно-санитарная экспертиза, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилов 410012, Россия, Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3 Тел.: +7–917–214–19–38 E-mail: kozlovsv@sgau.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2164-8140
Irina Vladimirovna Ziruk, Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Department of Morphology, Animal Pathology and Biology, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov 4, building 3, Peter Stolypin Ave., 410012, Saratov, Russia Tel.: +7–917–324–48–56 E-mail address: iziruk@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7300-3956	**Ирина Владимировна Зирук** — доктор ветеринарных наук, профессор, кафедра морфологии, патологии животных и биологии, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова 410012, Россия, Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3 Тел.: +7–917–324–48–56 E-mail: iziruk@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7300-3956
Vasilissa S. Kutsenkova, Candidate of Technical Science, Docent, Foodstuff Technology Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov 4, building 3, Peter Stolypin Ave., 410012, Saratov, Russia Tel.: +7–927–115–66–01 E-mail: vasilissakutsenkova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2468-9725	**Василисса Сергеевна Куценкова** — кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии продуктов питания, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова 410012, Россия, Саратов, проспект Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3 Тел.: +7–927–115–66–01 E-mail vasilissakutsenkova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2468-9725
Zohreh Baratian Ghorghi, PhD, Department of Food Sensory and Cognitive Science, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST) Km. 12 Quchan Highway- Mashhad, Mashhad, Iran Department for Innovation in Biological, Agro-Food, and Forest Systems, University of Tuscia 01100 Viterbo, Italy Tel.: +98 35425365 E-mail: zbg_82@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7662-5945	**Горги Зохре Б.** — PhD, отдел пищевых сенсорных и когнитивных наук, Научно-исследовательский институт пищевых наук и технологий 97895, Иран, Мешхед, 12 км, трасса Мешхед-Кучан Факультет инноваций в биологических, агропродовольственных и лесных системах, Университет Тушии 01100 Витербо, Италия Tel.: +98 35425365 E-mail: zbg_82@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7662-5945
Mohammad Ali Hesarinejad, PhD, Assistant Professor, Department of Food Sensory and Cognitive Science, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST) Km. 12 Quchan Highway- Mashhad, Mashhad, Iran Tel.: +98 35425365 E-mail: ma.hesarinejad@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2799-6982	**Хесаринеджад Мохаммад А.** — PhD, доцент, отдел пищевых сенсорных и когнитивных наук, Научно-исследовательский институт пищевой науки и технологии 91895, Иран, Мешхед, 12 км, трасса Мешхед-Кучан Tel.: +98 35425365 E-mail: ma.hesarinejad@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2799-6982

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Samira Yeganehzad, PhD, Associate Professor, Department of Food Sensory and Cognitive Science, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST) Km. 12 Quchan Highway- Mashhad, Mashhad, Iran Tel.: +98 35425365 E-mail: s.yeganehzad@rifst.ac.ir ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7467-4778	**Еганехзад Самира** — PhD, адъюнкт профессор, отдел пищевых сенсорных и когнитивных наук, Научно-исследовательский институт пищевой науки и технологии, 91895, Иран г. Мешхед, 12 км, трасса Мешхед-Кучан Tel.: +98 35425365 E-mail: s.yeganehzad@rifst.ac.ir ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7467-4778
Contribution	**Критерии авторства**
N. V. Nepovinnykh — scientific guidance, analysis of research results, writing and editing, attracting funding **S. V. Kozlov** — conducting and analyzing the results of hybrid gel safety and tolerability studies on laboratory animals. **I. V. Ziruk** — conducting and analyzing research results on the safety and tolerability of hybrid gels on the morphology of internal organs of laboratory animals. **V. S. Kutsenkova** — literature review, conducting and processing results of experimental studies, writing. **Zohreh Baratian Ghorghi** — conducting and analyzing results of studies of physicochemical characteristics of oleogels and hybrid gels. **Mohammad Ali Hesarinejad** — analyzing results of studies of physicochemical characteristics of oleogels and hybrid gels. **Samira Yeganehzad** — scientific guidance, analysis of research results, writing and editing.	**Неповинных Н. В.** — научное руководство, анализ результатов исследований, написание и редактирование, привлечение финансирования. **Козлов С. В.** — проведение и анализ результатов исследований безопасности и переносимости гибридных гелей на лабораторных животных. **Зирук И. В.** — проведение и анализ результатов исследований безопасности и переносимости гибридных гелей на морфологию внутренних органов лабораторных животных **Куценкова В. С.** — обзор литературы, проведение и обработка результатов экспериментальных исследований, написание статьи. **Горги Зохре Б.** — проведение и анализ результатов исследований физико-химических характеристик олеогелей и гибридных гелей. **Хесаринеджад Мохаммад А.** — анализ результатов исследований физико-химических характеристик олеогелей и гибридных гелей. **Еганехзад Самира** — научное руководство, анализ результатов исследований, написание и редактирование.
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-221-230

Поступила 18.04.2025
Поступила после рецензирования 12.05.2025
Принята в печать 14.05.2025
© Барковская И. А., Рябова А. Е., Рожкова И. В., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

КОМПЛЕКСНАЯ МОДИФИКАЦИЯ БЕЛКОВОГО ПРОФИЛЯ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ КАК ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ОБОГАЩЕННЫХ БЕЛКОВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ

Барковская И. А.*, Рябова А. Е., Рожкова И. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
йододефицит, переработка сыворотки, хелатирование цинка, направленный гидролиз, связывание йода

АННОТАЦИЯ

В условиях сохраняющейся проблемы дефицита эссенциальных микроэлементов, таких как йод (йододефицит фиксируется у 68% населения планеты), актуальной задачей является разработка эффективных подходов к созданию пищевых ингредиентов и продуктов с биодоступными формами микроэлементов. В связи с этим в работе исследована комплексная модификация белкового профиля молочной сыворотки с целью создания белкового ингредиента, обогащенного йодом и цинком. По результатам ряда проведенных исследований определены оптимальные параметры модификации белкового профиля посредством термоселективного фракционирования в присутствии хелатора (58 °С; pH 3,0; массовая доля хелатора 0,2%; 120 минут). Установлены рациональные условия хелатирования цинка сывороточными белками (40 °С; pH 8,0; 60 минут), обеспечивающие максимальную концентрацию органически связанного микроэлемента: 169,8 ± 27,3 мг на 100 г белка. В результате протеазного скрининга выявлено, что трипсин обеспечивает увеличение количества функциональных участков, способных связывать йод, при условии сохранения начальной концентрации цинка, связанного с белками. Приведены оптимальные параметры гидролиза белков трипсином (44 °С; pH 8,0; 180 минут). Установлены эффективные режимы предварительного гидролиза сывороточных белков, обогащенных цинком (фермент-субстратное соотношение 1/100 CPROT г/г; 44 °С; pH 8,0; 165 минут), и йодирования субстрата (20 °С; pH 8,0; 12 ч). Эти режимы обеспечивают концентрацию органически связанного йода 2,5 ± 0,4 г на 100 г белка и сохранение начальной концентрации органически связанного цинка. Для каждого этапа иммобилизации микроэлементов определены рациональные параметры баромембранной очистки белковой матрицы от неорганических форм йода и цинка: трехкратная ультрадиафильтрация для этапа хелатирования цинка и нанодиафильтрация для этапа йодирования. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых функциональных пищевых продуктов и технологий глубокой переработки молочной сыворотки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 24-26-00220.

Received 18.04.2025
Accepted in revised 12.05.2025
Accepted for publication 14.05.2025
© Barkovskaya I. A., Ryabova A. E., Rozhkova I. V., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

COMPLEX MODIFICATION OF WHEY PROTEIN PROFILE AS AN APPROACH TO THE CREATION OF ENRICHED PROTEIN INGREDIENTS

Irina A. Barkovskaya*, Anastasia E. Ryabova, Irina V. Rozhkova

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

KEY WORDS:
iodine deficiency, whey processing, zinc chelation, directed hydrolysis, iodine binding

ABSTRACT

In the context of the persistent problem of deficiency of essential trace elements such as iodine (iodine deficiency is recorded in 68% of the world's population), an urgent task is the development of effective approaches to the creation of food ingredients and products with bioavailable forms of trace elements. In this regard, the work investigated the complex modification of protein profile of milk whey in order to create a protein ingredient enriched with iodine and zinc. Based on the results of a number of studies, the optimal parameters of protein profile modification by thermoselective fractionation in the presence of chelator (58 °C; pH 3.0; mass fraction of chelator 0.2%; 120 minutes) were determined. The rational conditions of zinc chelation by whey proteins (40 °C; pH 8.0; 60 minutes) were established, providing the maximum concentration of organically bound trace element: 169.8±27.3 mg per 100 g of protein. The protease screening revealed that trypsin provides an increase in the number of functional sites capable of binding iodine, provided that the initial concentration of zinc bound to proteins is maintained. Optimal parameters of protein hydrolysis by trypsin (44 °C; pH 8.0; 180 min) are given. Effective modes of preliminary hydrolysis of zinc-enriched whey proteins (enzyme-substrate ratio 1/100 CPROT g/g; 44 °C; pH 8.0; 165 minutes) and substrate iodization (20 °C; pH 8.0; 12 h) were established, providing the concentration of organically bound iodine 2.5±0.4 g per 100 g of protein and preserving the initial concentration of organically bound zinc. Rational parameters of baromembrane purification of protein matrix from inorganic forms of iodine and zinc were determined for each stage of trace elements immobilization: 3-fold ultradiafiltration for the stage of zinc chelation and nanodiafiltration for the stage of iodination. The obtained results can be used in the development of new functional food products and technologies for deep processing of whey.

FUNDING: This work was performed under the Russian Science Foundation grant No. 24-26-00220.

1. Введение

Одной из основных глобальных проблем продовольственного сектора является недостаточная обеспеченность населения продуктами питания и потребление низкокачественной пищи, вызывающее неинфекционные алиментарные заболевания [1,2]. Из-за потребления продуктов массового спроса с низкой пищевой ценностью у более 2 млрд человек сформировался «скрытый голод», характеризующийся дефицитом макро- и микроэлементов [3,4]. В этом контексте одной из основных проблем, с которой сталкивается современное общество, является дефицит белка и эссенциальных микроэлементов, таких

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Барковская, И. А., Рябова, А. Е., Рожкова, И. В.** (2025). Комплексная модификация белкового профиля молочной сыворотки как подход к созданию обогащенных белковых ингредиентов. *Пищевые системы*, 8(2), 221–230. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-221-230

FOR CITATION: **Barkovskaya, I. A., Ryabova, A. E., Rozhkova, I. V.** (2025). Complex modification of whey protein profile as an approach to the creation of enriched protein ingredients. *Food Systems,* 8(2), 221–230. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-221-230

как йод [5,6]. Оценка распространенности дефицита 15 основных микроэлементов для 34 возрастных групп из 185 стран, основанная на возрастных и гендерных потребностях в питательных веществах, выявила недостаточное потребление йода у 5 млрд человек (68 % населения мира) [7]. Кроме того, проблема усугубляется ростом населения: согласно прогнозам ООН, к 2050 году мировое население достигнет отметки в 9,7 млрд человек, что приведет к усилению конкуренции за пищевые ресурсы и к усложнению задачи по удовлетворению потребностей в макро- и микроэлементах [8,9]. Авторы [10] освещают последствия перенаселения планеты, указывая на повышение спроса на пищевые продукты вдвое. В этой связи актуализируется вопрос разработки эффективных стратегий обеспечения людей полноценным питанием и глубокой переработки пищевого сырья.

В поисках решений данной проблемы ученые рассматривают возможность разработки алиментарных средств доставки микроэлементов, таких как йод, для профилактики и нивелирования широкой распространенности дефицитов [11]. Одной из известных стратегий является биофортификация — способ борьбы с микронутриентной недостаточностью, подразумевающий повышение массовой доли витаминов и минералов в основном спектре сельскохозяйственных культур путем применения удобрений при выращивании или селекции и/или генной инженерии [12,13]. Dipti Rai с соавторами [12] и Grzegorz Izydorczyk с соавторами [14] отмечают, что обогащение сельскохозяйственных культур универсальнее и эффективнее обогащения пищевых продуктов. Этот подход охватывает основные культуры, потребляемые большинством населения, и не требует изменения рациона.

Существует также «конкурирующая» стратегия биофортификации — диверсификация питания, подразумевающая биоразнообразие рациона. Однако, как сообщают ученые [5], оба подхода подвергаются критике:

- биофортификация не учитывает потребление широкого спектра микроэлементов, и рандомизированные клинические исследования являются спорными, поскольку предоставляют недостаточно достоверных данных о воздействии биофортификации на разные группы населения (женщины, дети, пожилые люди). Кроме того, при обогащении агрокультур йодом выявлены следующие недостатки: высокая сорбция йода почвой из-за взаимодействия с гуминовыми кислотами, метилирование йода, ведущее к высвобождению (CH_3I) в атмосферу, и неустойчивость некоторых растений к высоким концентрациям йода. Эти факторы снижают эффективность биофортификации и иногда уменьшают урожайность [14].
- исследования диверсификации питания (особенно в странах с низким и средним уровнем дохода) дали спорные результаты, отражая неоднозначные данные о снижении риска неинфекционных алиментарных заболеваний и связи разнообразия питания с массой тела у подростков и взрослых.

Помимо обогащения растительного сырья на стадии выращивания, специалистами агросектора проведен ряд исследований, посвященных повышению массовой доли йода и других микроэлементов в сырье животного происхождения. Так, авторы исследования [15] представили принципы коррекции рациона питания молочного стада посредством введения селена (органического — 0,23 мг и неорганического — 0,34 мг на кг сухого вещества) и йода (неорганического — 5,68 мг на кг сухого вещества). В результате проведенной оценки массовая доля йода в молоке опытных животных увеличилась с 19,69 до 110,06 мкг на 100 г молока. При этом после переработки молока-сырья на сыр, йогурт и сухое молоко в продукты перешло 269,70 ± 20,66 мкг, 176,30 ± 3,18 и 1568,65 ± 100,42 мкг на 100 г продукта соответственно.

Наряду с обогащением сырья для производства продуктов животного и растительного происхождения, разработка йодированных пищевых продуктов ежедневного пользования (FMCG) и добавок является широким направлением научных исследований во всем мире [11,16]. Существуют технологии обогащения различными формами йода (органическая и неорганическая) пищевых продуктов: хлебобулочных, молочных, пищевой соли. Проводится обогащение хлебобулочных изделий разными формами йода: йодированной солью, «Йодказеином», «Амитоном». Авторы исследования [17] сообщают о содержании 78–97,5 мкм йода в 200–250 г хлеба, что обеспечивает суточную потребность в микроэлементе на 52–65 %. Накоплен опыт в части обогащения молочных продуктов йодсодержащими добавками. Так, в исследовании [11] приведены результаты производства творога с внесением пищевых добавок «Йодказеин» и «Биойод» в количестве 7 мг и 25 мг на кг молока соответственно. В твороге, обогащенном казеином, содержание йода составляет от (46,2 ± 1,1) до (46,4 ± 0,9) мг на 100 г, а при обогащении сывороточными белками — от (48,5 ± 0,9) до (48,2 ± 1,1) мг на 100 г. Это соответствует сохранению йода на уровне 94–97 % [14]. Коллективы авторов разработали технологию обогащения стерилизованного и пастеризованного молока [18–20], кефира и творога [19] йодказеином с содержанием йода в органической форме в количестве от 5 до 50 мкг на 100 г продукта [21]. Несмотря на широкий спектр разработанных стратегий профилактики и нивелирования дефицита йода, проблема недостаточного потребления микроэлемента все еще сохраняется. Это обусловлено недостатками средств обогащения йодом, такими как низкая стабильность йодированной соли при транспортировке, хранении и термической обработке [22], плохая растворимость некоторых форм йода, а также отсутствие в продуктах и добавках микроэлементов, способствующих метаболизму йода, например цинка [23–25]. Одним из перспективных объектов для таких исследований является молочная сыворотка (как подсырная, так и творожная), поскольку содержит сывороточные белки, обладающие способностью к связыванию йода и цинка благодаря особенностям строения и аминокислотного состава. Кроме того, вопрос переработки вторичного сырья молочной отрасли также является ключевым, требующим расширения возможностей глубокой переработки молочной сыворотки. Таким образом, целью данного исследования являлось изучение механизмов связывания йода и цинка с белками молочной сыворотки. Полученные данные могут способствовать разработке новых пищевых ингредиентов и специализированных продуктов, направленных на профилактику дефицитных состояний и на улучшение нутритивного статуса населения.

2. Объекты и методы

Объектами на разных этапах исследований являлись подсырная сыворотка, полученная при производстве полутвердого сыра «Качотта» на ООО «Итальянские традиции» (Россия); сывороточные белки, обогащенные цинком; гидролизаты сывороточных белков, обогащенные йодом и цинком; информация о субстратной специфичности пепсина (EC3.4.23.1), протеиназ P1 (КФ 3.4.21.96) и K (КФ 3.4.21.64), химотрипсина A (КФ 3.4.21.1), панкреатической эластазы (КФ 3.4.21.36), фицина (КФ 3.4.22.3), стим бромелайна (КФ 3.4.22.32), термолизина (КФ 3.4.24.27), папаина (КФ 3.4.22.2), субтилизина (КФ 3.4.21.62), коколизина (КФ 3.4.24.30), химазы (КФ 3.4.21.39), трипсина (КФ 3.4.21.4); коммерческий ферментный препарат панкреатического трипсина («Новозаймс», Дания). Все реактивы, используемые в исследовании, были не ниже марки «ч. д. а» со степенью чистоты не менее 99 %.

Часть исследований выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ). Эксперименты проводили в стеклянных биореакторах с рубашкой (ООО «Алхитех», Россия) вместимостью 1000 (ЛС-0132) и 5000 мл (ЛС-0118), оснащенных термостатом модели MLW U (MLW, Германия) для поддержания температуры. Центрифугирование белковой смеси проводили на лабораторной центрифуге ОПН-8 (ОАО «ТНК «Дагестан», Россия). Стандартизацию сыворотки по массовой доле белка, очистку обогащенного белкового субстрата от неорганических примесей микроэлементов проводили с использованием метода баромембранной фильтрации на пилотной установке АЛ 362 (ООО «Альтаир», Россия) с блоком мембранных элементов из полиэфирсульфона с отсечкой по молекулярной массе 5,0 и 0,6 кДа (ультра- (UF) и нанофильтрация (NF) соответственно). Уровень pH корректировали внесением концентрированной соляной кислоты (ООО «Сигма Тех», Россия) или 5М раствора гидроксида калия (ООО «Компонент-Реактив», Россия). Значение pH анализировали с помощью лабораторного pH-метра inoLab pH Level 1 (WTW, Германия). Для обогащения сывороточных белков цинком и йодом использовали раствор $ZnSO_4$ с концентрацией ионов Zn^{2+} 80 г/л (ООО «Альдоса», Россия) в первом случае и раствор I_2 в 50 % растворе KI с концентрацией ионов молекулярного йода 200 г/л (ООО «Альдоса», Россия).

Массовую долю общего азота в надосадочной жидкости определяли методом Кьельдаля по ГОСТ 34454-2018[1] с применением автоматического анализатора Kjeltec2400 (Foss Electric, Дания).

Фракционный состав белков выявляли в электрофорезной камере MiniPROTEAN Tetra (Bio-Rad, США) в 12,5 % полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия (SDS-PAGE) по методике [26]. Затем проводили денситометрию интенсивности окрашивания дорожек (кумасси бриллиантовый синий R-250) с количественным анализом в программе ImageJ согласно Методическим рекомендациям по анализу результатов одно- и двумерных электрофореграмм «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН [27]. В качестве эталона молекулярной массы белка (10–200 кДа) использовали стандарты Prestained Protein Marker IV (Servicebio, Китай).

[1] ГОСТ 34454-2018 ««Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом Кьельдаля» М.: Стандартинформ, 2018. — 14 с.

Массовую долю цинка определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой по ГОСТ 34633-2020[2] на приборе Agilent 5110 ICP-OES (Agilent Technologies, Малайзия).

Биоинформатическое моделирование выполняли с использованием баз данных NCBI (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/), BIOPEP-UWM (https://biochemia.uwm.edu.pl/biopep-uwm/), Uniprot (https://www.uniprot.org/), ToxinPred (https://webs.iiitd.edu.in/raghava/toxinpred/).

Степень гидролиза (DH) определяли спектрофотометрически по реакции первичных аминогрупп с 2,4,6-тринитробензосульфоновой кислотой с детектированием продуктов реакции при 340 нм на спектрофотометре-флуориметре Feyond-A400 (Allsheng, Китай) [28,29].

Массовую долю йода рассчитывали спектрометрическим методом по ГОСТ 26185–84[3].

Общее содержание свободных аминокислот определяли спектрофотометрически по реакции аминогрупп α-аминокислот с 2,4-динитрофторбензолом с последующей детекцией продуктов реакции при 420 нм [30].

Горечь белковых фрагментов выявляли органолептически в эквиваленте шкалы разведения стандарта кофеина [31].

Пептидный профиль гидролизата сывороточных белков и детектирование пептидов с ковалентно связанным йодом исследовали с использованием ВЭЖХ, соединенной с масс-спектрометром.

Идентификацию пептидов проводили при помощи программного обеспечения MaxQuant v. 2.0.3.0 с поисковым алгоритмом Andromeda (сравнение йодированных аминокислот и аминокислот без йода по молекулярной массе).

Планирование экспериментов, оптимизацию, визуализацию данных, статистический анализ осуществляли с использованием пакета программ Statistica 2010 (Statsoft, США) и Microsoft Excel (Microsoft, США) интерактивной среды разработки RStudio (Posit Software, США). Все измерения и исследования проводили в 3–5 повторностях с последующим определением стандартного отклонения. Для удобства визуального сравнения и интерпретации данных стандартное отклонение представлено на графиках в виде относительных величин, выраженных в процентах от среднего значения. За уровень статистической значимости принимали $p < 0,05$.

[2] ГОСТ 34633-2020 «Продукция пищевая. Определение массовой доли хрома, железа, никеля, меди, цинка методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» М.: Российский институт стандартизации, 2024. — 23 с.

[3] ГОСТ 26185-84 «Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа» М.: Стандартинформ, 2018. — 33 с.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследование процесса термоселективного осаждения α-ЛА в присутствии солей-хелаторов

Для повышения концентрации цинка, хелатируемого белками, в работе проводили исследование процесса термоселективного осаждения α-ЛА из молочной сыворотки. Подобная модификация белковой матрицы обоснована наличием сайтов связывания двухвалентных металлов в α-ЛА и БСА (KFLDDDLTDD и ECCHGDLLECADDRA соответственно) [32,33]. Ранее исследованные режимы термоселективного осаждения отражают недостаточную эффективность процесса в части термического воздействия (85 °C; 120 минут) на белки, что может негативно сказаться на их дальнейших функциональных свойствах, а также в части количества выделенного белка (снижение концентрации общего азота относительно начальной — 29%) [34]. В связи с этим роль солей-хелаторов (гексаметафосфата натрия — ГМФ) в процессе термоселективного осаждения α-ЛА из молочной сыворотки с массовой долей общего азота 3,56% изучали для достижения следующих целей: декальцинирование сывороточных белков, замещение иона кальция ионом цинка, снижение температуры денатурации α-ЛА, увеличение выхода α-ЛА и уменьшение соосаждения β-ЛГ. Для оптимизации процесса смоделирован и проведен полнофакторный эксперимент с четырьмя параметрами, варьируемыми на трех уровнях (Таблица 1).

Таблица 1. **Уровни вариации независимых параметров при многофакторных экспериментах по оптимизации условий термоденатурации α-ЛА в присутствии ГМФ**

Table 1. **Levels of variation of independent parameters in multifactorial experiments on optimization of conditions of α-LA thermodenaturation in the presence of SHMP**

Параметр	Переменная	Уровень варьирования		
		–1	0	1
Массовая доля ГМФ, %	X_1	0,050	0,175	0,300
Температура, °C	X_2	45	65	85
Активная кислотность, pH	X_3	3	6	9
Продолжительность, мин	X_4	30	75	120

Функция желательности оптимизации сформирована исходя из минимального значения содержания в супернатанте α-ЛА и максимального содержания β-ЛГ. Поверхности отклика влияния варьируемых параметров эксперимента на термоденатурацию сывороточных белков представлена на Рисунке 1. Анализ данных показал

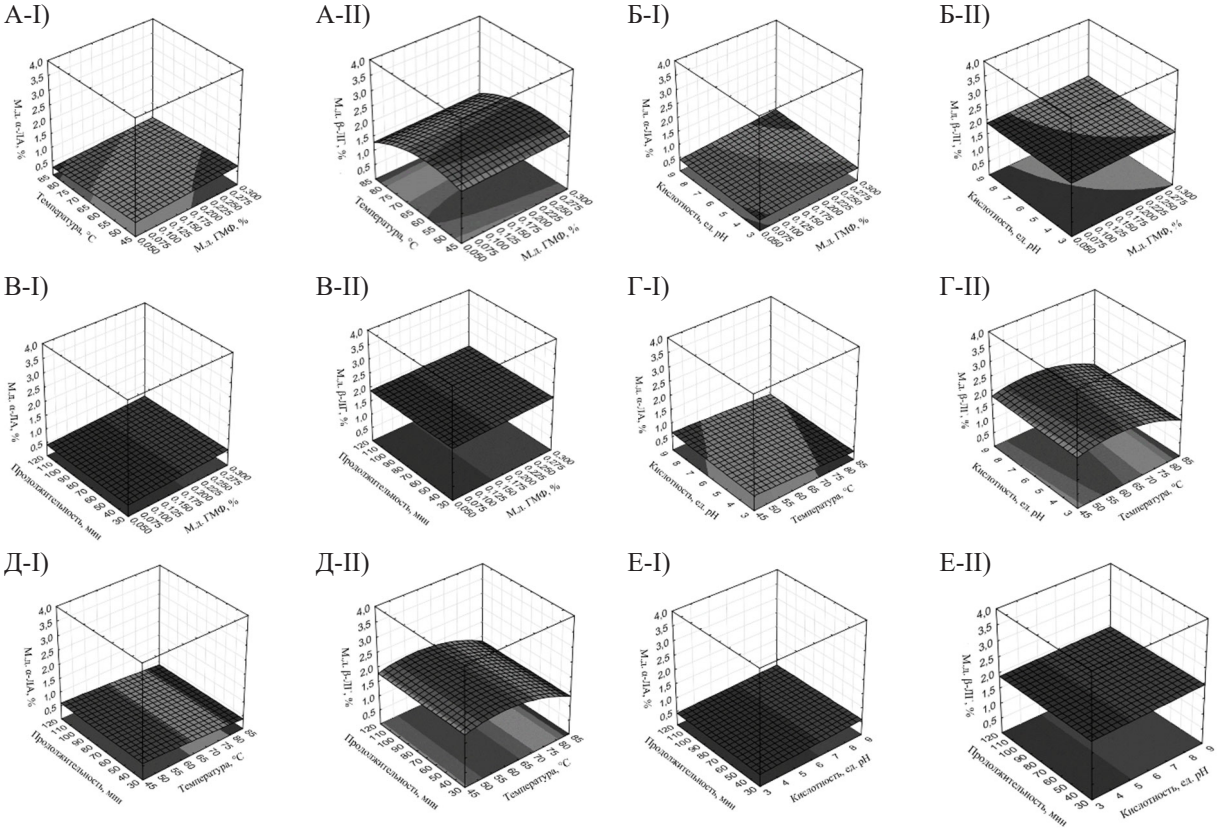


Рисунок 1. **Оптимизация условий селективной термоденатурации в присутствии хелатора (I - α-ЛА, II-β-ЛГ)**

Figure 1. **Optimization of the conditions of selective thermodenaturation in the presence of chelator (I - α-LA, II-β-LG)**

статистически значимое (p < 0,05) влияние фактора кислотности (X_3), а также совокупное влияние факторов массовой доли ГМФ (X_1) и температуры (X_2), массовой доли ГМФ (X_1) и кислотности (X_3) на максимальное снижение содержания α-ЛА в супернатанте.

Получены уравнения 1–2, описывающие зависимости процесса термоденатурации α-ЛА и β-ЛГ от варьируемых параметров:

$$Y_{\alpha\text{-ЛА}} = -0{,}246 - 3{,}297X_1 - 0{,}004X_2 + 0{,}475X_3 - 0{,}032X_3^2 - 0{,}001X_4 + 0{,}022X_1X_2 + 0{,}256X_1X_3 - 0{,}001X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_{\beta\text{-ЛГ}} = -1{,}211 + 0{,}106X_1 - 0{,}001X_1^2 + 0{,}056X_1X_3 \quad (2)$$

В результате проведенных исследований установлены оптимальные параметры процесса: температура — 58 °С, pH — 3,0, м. д. ГМФ — 0,2 % и продолжительность 120 минут, снижающие содержание общего азота в супернатанте относительно начальной концентрации на 42 %, а начальное содержание α-ЛА — примерно на 83 %. Функция желательности при заданных условиях составила 67 %. При этом соотношение β-ЛГ к α-ЛА в результате процесса изменилось с 2,2 к 1 (для субстрата) до 0,7 к 1 (Рисунок 2). Выявленные параметры осаждения коррелируют с литературными данными о температуре денатурации α-ЛА (приблизительно 60 °С). Кроме того, выявленный эффект частичного осаждения β-ЛГ, согласно McGuffey M. K. С соавторами [35], может быть связан с усилением его агрегации в матрице сывороточных белков под действием изменения конфигурации дисульфидных связей α-ЛА. По результатам проведенных исследований подтверждена гипотеза об увеличении выхода α-ЛА при использовании солей-хелаторов и установлены оптимальные параметры выделения α-ЛА из системы молочной сыворотки с использованием ГМФ, декальцинирующего белок и препятствующего его ренатурации.

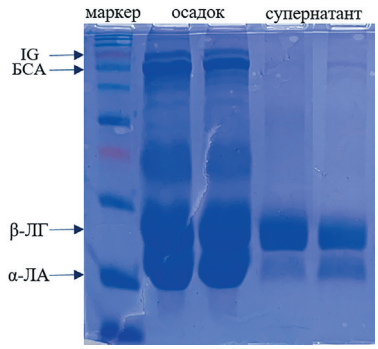


Рисунок 2. **Электрофореграмма продуктов термоденатурации сывороточных белков**

Figure 2. **Electropherogram of products of whey protein thermodenaturation**

Кроме того, полученные в ходе эксперимента данные фракционирования белков позволяют сделать вывод о том, что для модификации белковой матрицы, планируемой к использованию при обогащении эссенциальными микроэлементами, можно применять творожную сыворотку, поскольку низкое значение начальной активной кислотности сырья снижает затраты на его дополнительное подкисление до pH 3,0. Данный факт открывает новые возможности для переработки творожной сыворотки, пользующейся меньшей востребованностью в молочной промышленности, чем подсырная, ввиду особенностей физико-химических показателей.

3.2. Исследование кинетики хелатирования цинка модифицированной матрицей сывороточных белков

Согласно эмпирическим данным, последовательность обогащения белков по схеме цинк→йод является наиболее оптимальной, поскольку в противном случае наблюдается снижение концентрации цинка, обоснованное величиной энергии активации реакции координации микроэлемента [36]. В связи с этим далее в работе исследованы закономерности связывания цинка на модельных концентрированных системах с массовой долей белка 3 % и интактным распределением белков (WPC), а также на системах с превалирующим α-лактальбумином (WPC-α), полученных на предыдущем этапе исследования. Изучаемыми вариабельными параметрами являлись: pH среды (4,0; 6, 0; 8,0 ед. pH), температура (2; 10; 20; 30; 40 °С), концентрация ионов цинка (1,5; 9 и 15 мМ). Результаты исследования кинетики хелатирования цинка белками представлены на Рисунке 3.

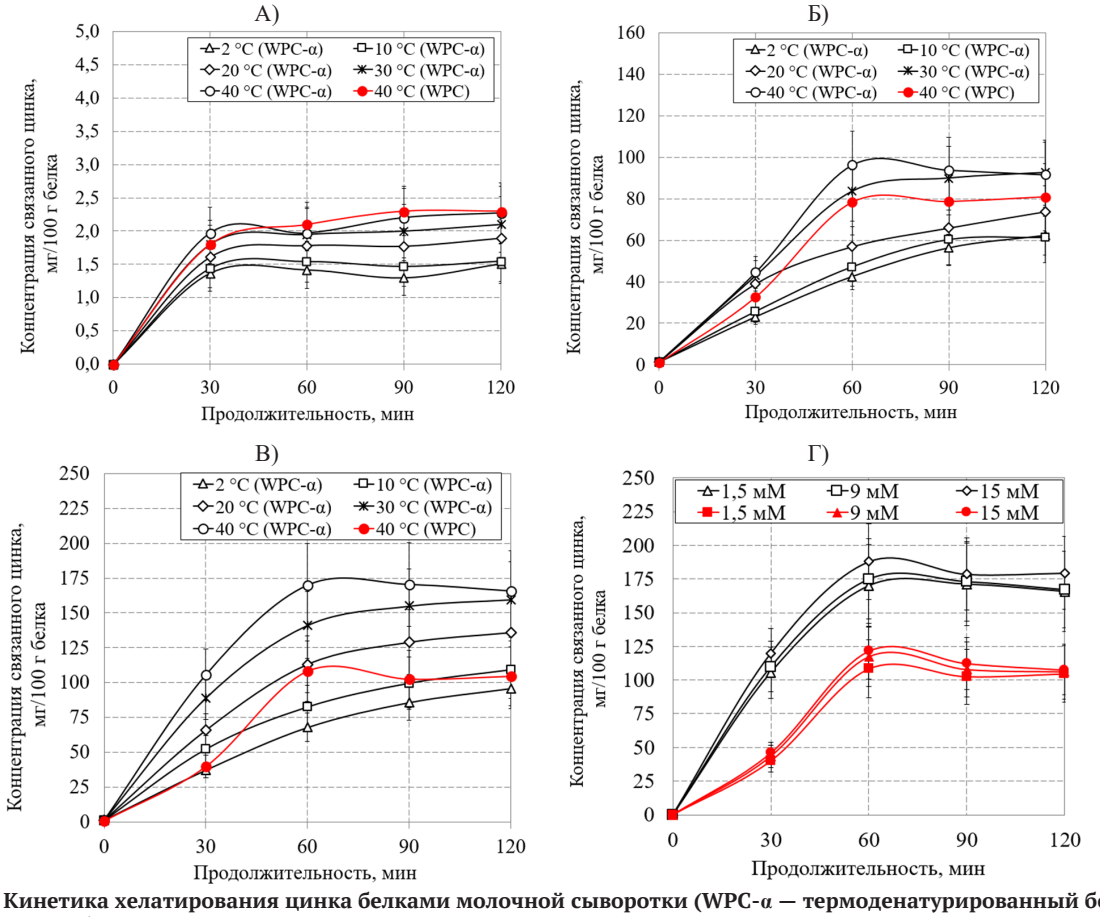


Рисунок 3. **Кинетика хелатирования цинка белками молочной сыворотки (WPC-α — термоденатурированный белковый концентрат с преобладанием α-ЛА (черные линии); WPC — контрольный концентрат с нативным распределением белков (красные линии); А — pH 4,0; Б — pH 6,0; В — pH 8,0; Г– зависимость от концентрации ионов цинка)**

Figure 3. **Kinetics of zinc chelation by whey proteins (WPC-α — thermodenaturated whey concentrate with prevalence of α-LA (black lines); WPC — control concentrate with native distribution of proteins (red lines); A — pH 4.0; Б — pH 6.0; B — pH 8.0; Г– dependence on concentration of zinc ions)**

По результатам исследования определен наиболее эффективный режим обогащения, соответствующий температуре 40 °С, pH 8 и продолжительности хелатирования 60 минут, что обеспечивает наибольшую концентрацию органически связанного цинка — 169,8 ± 27,3 мг на 100 г белка. Выявлено, что матрица с повышенным содержанием α-ЛА связала в 1,6 раза больше микроэлемента, чем сыворотка с нативным распределением белков. Данная особенность может быть обусловлена как наличием отдельных сайтов, содержащих аспарагиновую и глутаминовую кислоты, цистеин, метионин и пр., способных координировать ион цинка [37–39], так и наличием специфических сайтов связывания двухвалентных металлов α-ЛА и БСА (KFLDDDLTDD и ECCHGDLLECADDRA соответственно), декальцинированных в процессе термоденатурации белков [32,33]. Установлено отсутствие влияния концентрации вносимых в систему ионов цинка (в исследуемых пределах) на концентрацию хелатированного белками цинка. Содержание органически связанного с белками молочной сыворотки цинка согласуется с результатами эксперимента по хелатированию цинка α-ЛА: 1,58 мг микроэлемента на 1 г белка [40]. Однако авторы приведенного исследования утверждают, что рациональными параметрами для обогащения белков цинком являются температура 20 °С, pH 4,5 и продолжительность хелатирования 2 минуты. Вероятно, разница в эффективности режимов хелатирования цинка в нашем исследовании и исследовании [40] обоснована разными механизмами хелатирования. Предварительное проведение термоденатурации и декальцинирования α-ЛА и БСА в присутствии ГМФ могло повлиять на структуру белковых молекул, а также на формирование межмолекулярных взаимодействий белков в матрице, в связи с чем хелатирование цинка белками молочной сыворотки при pH 4 было наименее эффективным, чем при pH 8 [41–43]. Механизм формирования комплекса цинк-белок в исследовании [40], по-видимому, связан с отсутствием изменения вторичной структуры белка при pH 4,5 и 20 °С и с частичным изменением гидрофобности: высвобождением аминоксилотных групп, способных хелатировать цинк [44]. Можно сделать вывод о том, что при определении рациональных условий хелатирования ионов металлов сывороточными белками важно обращать внимание на его начальные структурные характеристики.

3.3. Подбор ферментного препарата, моделирование и оптимизация гидролиза модифицированных белков молочной сыворотки

Ранее проводили исследования, отражающие повышение количества связанного с белковыми фрагментами йода в результате частичного гидролиза полипептидной цепи, что может быть ассоциировано с увеличением количества ионогенных групп и с сорбционной активностью [45]. В связи с этим на следующем этапе исследования проведены протеазный скрининг и биоинформатическое моделирование гидролиза белков молочной сыворотки [46] с учетом потенциальных аминокислотных сайтов связывания йода и хелатирования цинка, интегрированных в дескрипторную модель. Ключевым критерием протеазного скрининга был выбор ферментного препарата (или комплекса ФП), обеспечивающего максимальное высвобождение пептидов, способных связывать йод. При этом требовалось сохранить максимальную концентрацию цинка, хелатированного белками (сайты связывания двухвалентных металлов в α-ЛА (KFLDDDLTDD) и БСА (ECCHGDLLECADDRA)), и минимизировать образование горьких пептидов и аминокислот. По результатам биоинформатического моделирования установлено, что трипсин является единственной протеазой, практически не затрагивающей сайты KFLDDDLTDD и ECCHGDLLECADDRA и отвечающей перечисленным критериям (Таблица 2).

Для оптимизации параметров гидролиза трипсином (*in vitro*) проводили полнофакторный эксперимент с тремя параметрами, варьируемыми на трех уровнях: температура (X_1), активная кислотность, pH (X_2), продолжительность гидролиза (X_3) (Таблица 3). Эксперимент проводили при фермент-субстратном соотношении (E/S) 1/100 CPROT г/г.

Таблица 3. **Уровни вариации независимых параметров при многофакторных экспериментах по оптимизации условий гидролиза WPC-α трипсином**

Table 3. **Levels of variation of independent parameters in multifactorial experiments on optimization of the conditions of WPC-α hydrolysis by trypsin**

Параметр	Переменная	Уровень варьирования		
		–1	0	1
Активная кислотность, pH	X_1	7	8	9
Температура, °С	X_2	30	40	50
Продолжительность, мин	X_3	30	105	180

Функция желательности соответствовала максимальной степени гидролиза субстрата трипсином, что было ассоциировано с доступностью аминокислотных сайтов для связывания йода. Поверхности отклика влияния варьируемых параметров эксперимента на степень гидролиза белкового субстрата трипсином представлены на Рисунке 4.

Таблица 2. **Моделирование гидролиза сывороточных белков трипсином**

Table 2. **Modeling of hydrolysis of whey proteins by trypsin**

Наименование фермента	Теоретическая степень гидролиза, %	Количество пептидов, потенциально хелатирующих ионы цинка, ед.	Количество пептидов, потенциально связывающих ионы йода, ед.	Количество свободных аминокислот, ед.	Количество фрагментов, обуславливающих горечь, ед.
α-лактальбумин					
Трипсин (КФ 3.4.21.4)	10,3	6	12	2	2
EQLTK - CEVFR - ELK - DLK - GYGGVSLPEWVCTTFHTSGYDTQAIVQNNDSTEYGLFQINNK - IWCK - DDQNPHSSNICNISCDK - FLDDDLTDDIMCVK - K - ILDK - VGINYWLAHK - ALCSEK - LDQWLCEK - L					
β-лактоглобулин					
Трипсин (КФ 3.4.21.4)	10,9	11	15	2	2
LIVTQTMK - GLDIQK - VAGTWYSLAMAASDISLLDAQSAPLR - VYVEELK - PTPEGDLEILLQK - WENGECAQK - K - IIAEK - TK - IPAVFK - IDALNENK - VLVLDTDYK - K - YLLFCMENSAEPEQSLACQCLVR - TPEVDDEALEK - FDK - ALK - ALPMHIR - LSFNPTQLEEQCHI					
БСА					
Трипсин (КФ 3.4.21.4)	13,7	46	68	7	4
R - GVFR - R - DTHK - SEIAHR - FK - DLGEEHFK - GLVLIAFSQYLQQCPFDEHVK - LVNELTEFAK - TCVADESHAGCEK - SLHTLFGDELCK - VASLR - ETYGDMADCCEK - QEPER - NECFLSHK - DDSPDLPK - LK - PDPNTLCDEFK - ADEK - K - FWGK - YLYEIAR - R - HPYFYAPELLYYANK - YNGVFQECCQAEDK - GACLLPK - IETMR - EK - VLASSAR - QR - LR - CASIQK - FGER - ALK - AWSVAR - LSQK - FPK - AEFVEVTK - LVTDLTK - VHK - ECCHGDLLECADDR - ADLAK - YICDNQDTISSK - LK - ECCDK - PLLEK - SHCIAEVEK - DAIPENLPPLTADFAEDK - DVCK - NYQEAK - DAFLGSFLYEYSR - R - HPEYAVSVLLR - LAK - EYEATLEECCAK - DDPHACYSTVFDK - LK - HLVDEPQNLIK - QNCDQFEK - LGEYGFQNALIVR - YTR - K - VPQVSTPTLVEVSR - SLGK - VGTR - CCTK - PESER - MPCTEDYLSLILNR - LCVLHEK - TPVSEK - VTK - CCTESLVNR - R - PCFSALTPDETYVPK - AFDEK - LFTFHADICTLPDTEK - QIK - K - QTALVELLK - HK - PK - ATEEQLK - TVMENFVAFVDK - CCAADDK - EACFAVEGPK - LVVSTQTALA					

КРАСНЫЕ – АК, одновременно координирующие Zn и связывающие I (**E; R; D; F**)
ГОЛУБЫЕ – АК, координирующие Zn (**C; H; M**)
ЗЕЛЕНЫЙ – АК, связывающие I (**G; Y; P; W; A**)
KFLDDDLTDD – сайт связывания двухвалентных металлов α-ЛА; ECCHGDLLECADDRA – сайт связывания двухвалентных металлов БСА

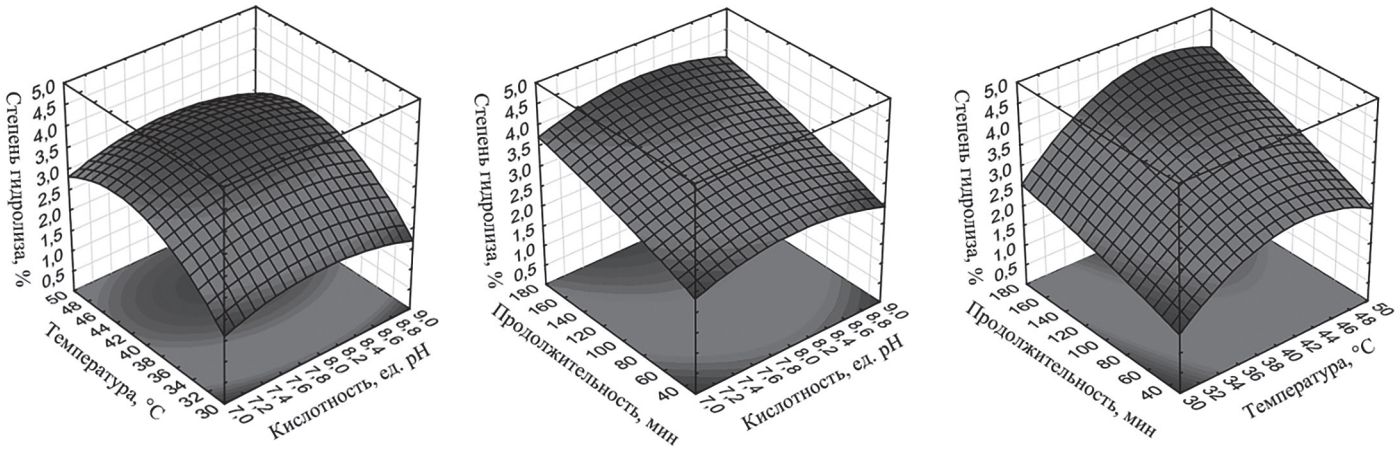


Рисунок 4. **Оптимизация условий процесса гидролиза WPC-α трипсином**
Figure 4. **Optimization of the conditions of the process of WPC-α hydrolysis by trypsin**

Установлено статистически значимое (p < 0,05) влияние линейных факторов температуры (X_2) и продолжительности гидролиза (X_3), а также их совокупного воздействия на увеличение DH. Кроме того, показано значимое влияние квадратичных факторов кислотности (X_1) и температуры (X_2), что говорит о существовании локальных оптимумов данных параметров процесса. Квадратичное влияние температуры на степень гидролиза и снижение изучаемого параметра при отклонении от оптимума также отмечены в других исследовательских работах [47].

По результатам проведенной оптимизации получено уравнение 3, включающее факторы, оказывающие значимое влияние на степень гидролиза WPC-α трипсином.

$$Y_{DH} = -40{,}816 + 6{,}846X_1 - 0{,}428X_1^2 + 0{,}749X_2 - 0{,}009X_2^2 + \\ + 0{,}003X_3 + 0{,}002X_2X_3 \quad (3)$$

По результатам оптимизации параметров процесса гидролиза WPC-α трипсином определены оптимальные режимы, соответствующие pH 8,0, температуре 44 °C, продолжительности гидролиза 180 минут, что обеспечивает степень гидролиза субстрата 4,35 % и уровень желательности 95,4 % (при исследуемом E/S).

3.4. Исследование кинетики связывания йода модифицированной матрицей сывороточных белков

Дальнейший этап исследования заключался в определении зависимости степени связывания йода с WPC и гидролизатами WPC-α (HWPC-α) от температурного (2; 10; 20; 30; 40 °C) и кислотного (6,0; 7,0; 8,0 ед. pH) факторов, продолжительности процесса (6; 12; 18; 24 ч) и концентрации ионов молекулярного йода (0,8; 1,6; 2,4 М). По результатам исследований, проведенных с нативными белками, установлено, что при значениях pH 6,0 и pH 7,0 йод не связывался с белками, что, согласно литературным данным, может быть обусловлено спецификой формирования ковалентной связи йода с ароматическими аминокислотами в щелочной среде ввиду наличия в молекуле гидроксильной группы, которая является сильным орто-пара-ориентантом, способствующим протеканию процесса электрофильного замещения [16]. Результаты исследования кинетики связывания йода с белками молочной сыворотки представлены на Рисунке 5.

Установлено, что при 20 °C, pH 8,0 и продолжительности йодирования 24 часа нативные сывороточные белки связывали наибольшее количество микроэлемента, равное 1,3±0,3 г йода на 100 г белка. Анализ данных показал, что оптимальные параметры йодирования — температура 20 °C, pH 8,0 и продолжительность 12 часов, при которых концентрация органического йода в гидролизате составила 2,5±0,5 г на 100 г белка. Для нативных белков концентрация йода за 12 часов составила 0,7±0,1 г на 100 г белка. Таким образом, подтверждено, что ферментативный гидролиз повышает степень связывания белка с йодом, которое, вероятно, обусловлено увеличением количества доступных функциональных групп, способных связать микроэлемент [45]. Кроме того, полученный результат согласуется с содержанием органически связанного йода в ранее разработанной пищевой добавке «Биойод», получаемой при ферментативном йодировании сывороточных белков [48].

На второй стадии исследования кинетики связывания йода с модифицированной матрицей сывороточных белков проведены исследования, направленные на оценку изменения участков связывания цинка и сайтов связывания йода в зависимости от продолжительности гидролиза субстрата (15; 30; 45; 60; 90; 120; 150 и 180 минут) и фермент-

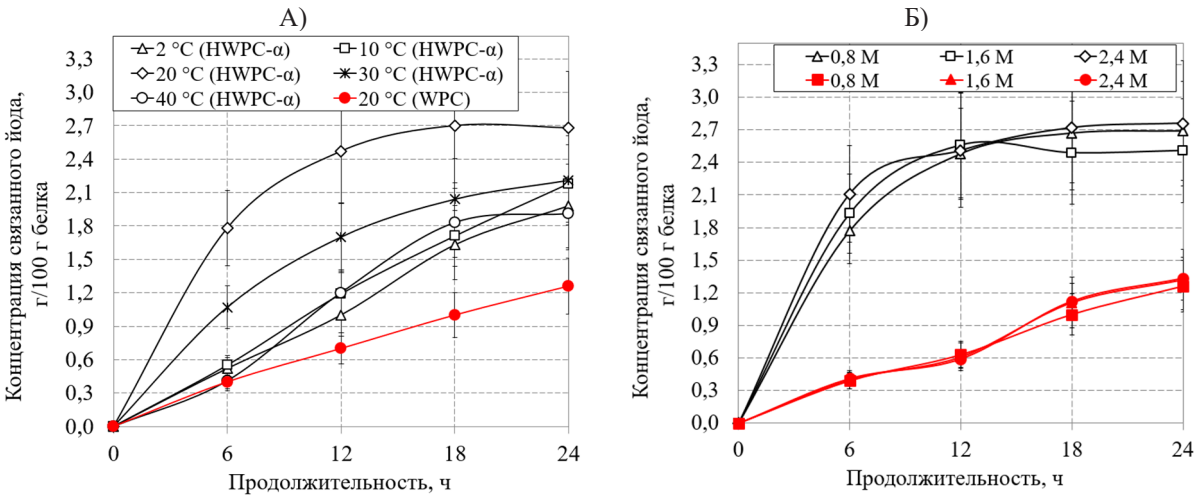


Рисунок 5. **Кинетика связывания йода с гидролизатами белков молочной сыворотки (HWPC-α — гидролизат белкового гидромодуля с повышенным содержанием α-ЛА) и концентратом белков молочной сыворотки (WPC — контрольный концентрат с интактным распределением белковых фракций); А — зависимость от температуры и продолжительности процесса, Б — зависимость от концентрации йода и продолжительности процесса)**
Figure 5. **Kinetics of the iodine binding with whey protein hydrolyzates (HWPC-α — hydrolysate of protein hydromodule with increased content of α-LA) and whey protein concentrate (WPC — control concentrate with intact distribution of protein fractions); A — dependence on process temperature and duration, Б — dependence on iodine concentration and process duration)**

субстратного соотношения (1/75; 1/100; 1/500 CPROT г/г). В качестве контролируемых параметров также исследовали следующие показатели: степень гидролиза, концентрацию свободных аминокислот и интенсивность горечи. Результаты представлены на Рисунках 6 и 7.

Установлено, что рациональным следует считать E/S1/100 CPROT г/г, так как при гидролизе WPC-α, обогащенного цинком, концентрация микроэлемента статистически значимо не изменялась (161,7 ± 26,7 мг/100 г белка) на протяжении 165 минут гидролиза (DH = 4,4 ± 0,3 %), а концентрация связанного йода при такой степени гидролиза белка достигала максимума (2,5 ± 0,4 г/100 г белка). Гидролизаты сывороточных белков характеризовались отсутствием горечи и концентрацией САК 1,8 ± 0,2 мг экв. глутаминовой кислоты/мл.

3.5. Подбор рациональных режимов очистки матриц микроэлемент-белок от неорганических примесей

Для очистки белкового субстрата с органически связанными формами микроэлементов от неорганического йода и цинка исследована эффективность баромембранных процессов на каждой стадии иммобилизации микроэлементов, с использованием мембранных элементов из полиэфирсульфона. Эксперименты проводили с применением мембран с порогом задержки 5,0 и 0,6 кДа (ультра- и нанофильтрация соответственно). Диафильтрацию (DF) проводили путем разбавления гидролизатов сопоставимым объемом обратноосмотической воды с последующим концентрированием при температуре (10 ± 2) °C. Определение эффективности очистки детектировали по массопереносу белковых веществ, цинка и йода в ретентате и пермеате. Результаты сравнения очистки гидролизатов методом ультра- и нанофильтрации представлены на Рисунке 8.

Установлены эффективные параметры очистки, соответствующие трехкратной диафильтрации с применением ультрафильтрационной мембраны (с порогом задержки 5 кДа) для WPC-α, обогащенного цинком, и диафильтрации с применением нанофильтрационной мембраны (с порогом задержки 0,6 кДа) для HWPC-α, обогащенного йодом и цинком. Конечная концентрация органически связанных микроэлементов составила 168,0 ± 26,3 мг/100 г белка и 2,5 ± 0,3 г/100 г для цинка и йода соответственно. Несмотря на то, что ранее для

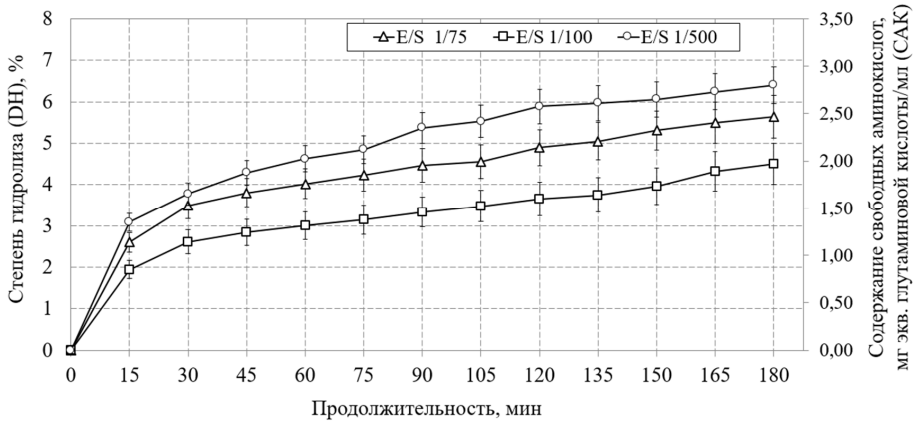


Рисунок 6. **Динамика изменения степени гидролиза и накопления свободных аминокислот в зависимости от фермент-субстратного соотношения в процессе гидролиза WPC-α трипсином**

Figure 6. **Dynamics of the change in the degree of hydrolysis and accumulation of free amino acids depending on the enzyme-substrate ratio in the process of WPC-α hydrolysis by trypsin**

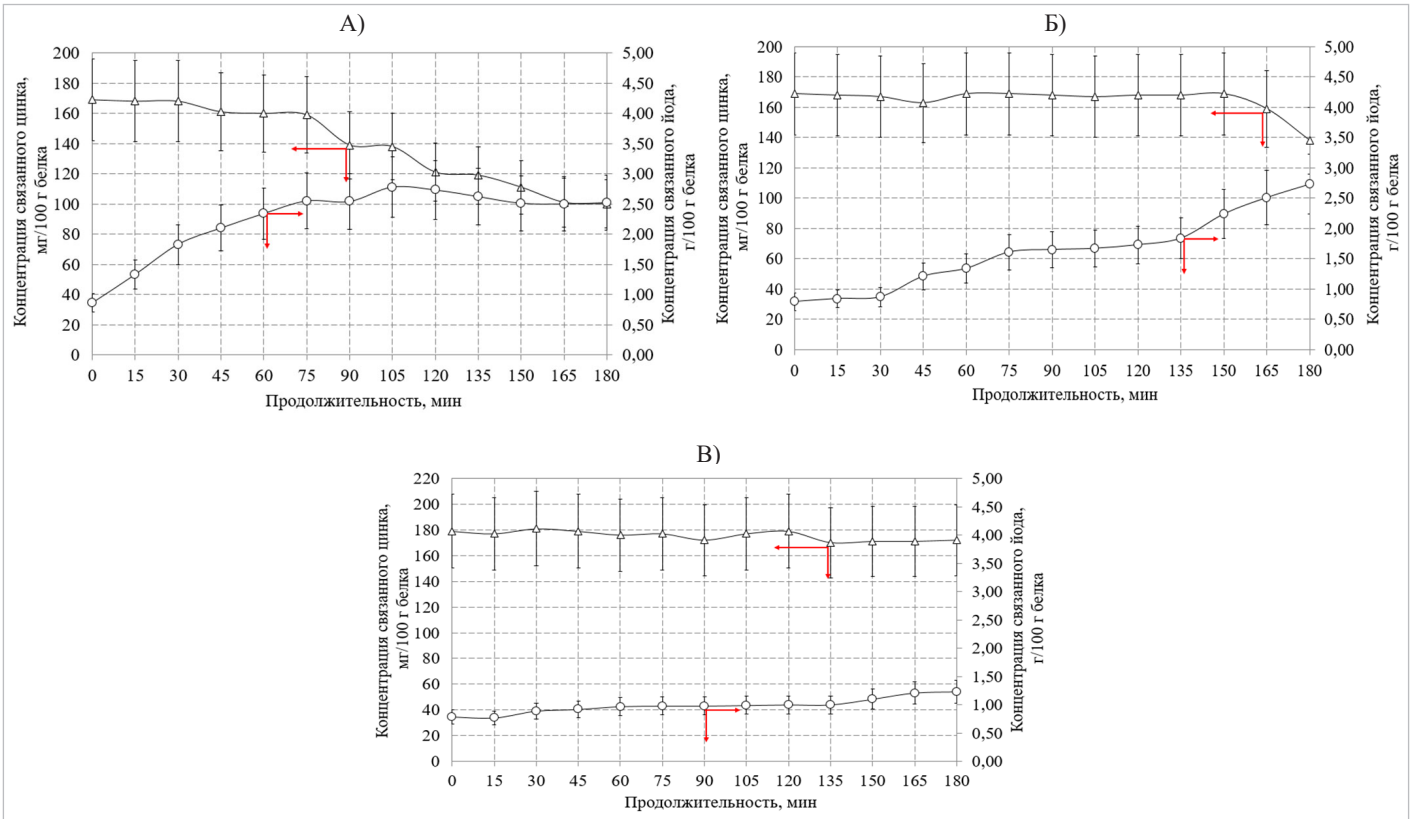


Рисунок 7. **Зависимость изменения концентрации связанного цинка и йода от фермент-субстратного соотношения и продолжительности гидролиза WPC-α трипсином (А – E/S1/75; Б — E/S1/100; В — E/S1/500)**

Figure 7. **Dependence of the change in the concentration of bound zinc and iodine on the enzyme-substrate ratio and duration of WPC-α hydrolysis by trypsin (А – E/S1/75; Б — E/S1/100; В — E/S1/500)**

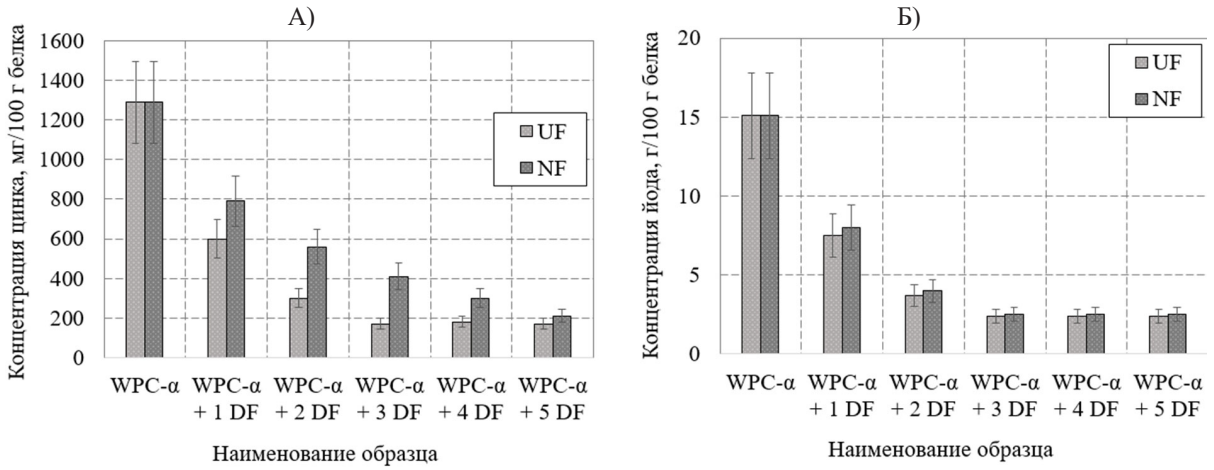


Рисунок 8. **Исследование процессов баромембранной очистки несвязанного с белком цинка (А) и йода (Б) из белкового субстрата WPC-α и HWPC-α методом ультра — и нанофильтрации с применением 5-кратной диафильтрации**

Figure 8. **Investigation of processes of baromembrane purification of zinc unbound to protein (A) and iodine (Б) from protein substrate of WPC-α and HWPC-α by the method of ultra- and nanofiltration using 5-fold diafiltration**

очистки гидролизата сывороточных белков с ковалентно связанным йодом от неорганических примесей микроэлементов применяли ультрафильтрацию [49], в настоящем исследовании при ультрафильтрации наблюдался переход через мембрану части гидролизованных белковых веществ, соответственно, происходила потеря связанного йода. Подобный эффект может быть обусловлен высвобождением пептидов с молекулярной массой менее 5 кДа при заданных условиях гидролиза, которые, по данным [50], могут составлять около 15 % от общего количества пептидов с разной молекулярной массой.

4. Выводы

По результатам проведения комплекса исследований установлены оптимальные условия термоселективного осаждения α-ЛА (58 °С; pH 3,0; 0,2 % ГМФ; 120 мин), обеспечивающие получение матрицы с измененным соотношением β-ЛГ к α-ЛА с 2,2 к 1 (для субстрата) до 0,7 к 1. Полученные данные об условиях фракционирования позволяют использовать в качестве сырья для получения белкового концентрата творожную сыворотку. Определены рациональные параметры хелатирования цинка модифицированными сывороточными белками: температура 40 °С, pH 8,0, продолжительность 60 минут, при этом содержание органически связанного цинка достигает 169,8 ± 27,3 мг в 100 г белка. В результате протеазного скрининга в качестве фермента, обеспечивающего сохранность ключевых участков связывания цинка и увеличения потенциальных сайтов связывания йода, выбран трипсин. Подбор оптимальных параметров гидролиза WPC-α трипсином позволил выявить наилучшие параметры процесса: температура 44 °С, pH 8,0 и продолжительность 180 минут, что обеспечило степень гидролиза 4,35 %. Также установлены эффективные режимы протеолиза сывороточных белков, обогащенных цинком (фермент-субстратное соотношение 1/100 CPROT г/г; 44 °С; pH 8,0; 165 минут), и йодирования гидролизата (20 °С; pH 8,0; 12 ч), обеспечивающие концентрацию органически связанного йода 2,5 ± 0,4 г на 100 г белка и сохранение начальной концентрации органически связанного цинка. Для каждого этапа обогащения белковой матрицы микроэлементами определены рациональные параметры баромембранной очистки белковой матрицы от неорганических форм йода и цинка: трехкратная ультрадиафильтрация для этапа хелатирования цинка и нанодиафильтрация для этапа связывания йода. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых функциональных пищевых продуктов и технологий глубокой переработки молочной сыворотки. Полученные данные подтверждают перспективность технологии последовательного хелатирования цинка и йодирования белков молочной сыворотки для создания пищевых ингредиентов профилактического назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

1. Niggli, U., Sonnevelt, M., Kummer, S. (2023). Pathways to advance agroecology for a successful transformation to sustainable food systems. Chapter in a book: Science and Innovations for Food Systems Transformation. Springer Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_18
2. Яшин, А. Н., Петров, А. Н. (2023). Актуальность разработки обогащенных микроэлементами продуктов питания для диетотерапии при сердечно-сосудистых заболеваниях. *Пищевые системы,* 6(3), 272–278. [Yashin, A. N., Petrov, A. N. (2023). The relevance of the development of food products enriched with trace elements for diet therapy in cardiovascular disease. *Food Systems,* 6(3), 272–278. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-272-278
3. Kumar, A., Kerketta, A., Dewali, S., Sharma, N., Panda, A. K., Bisht, S. S. (2023). Tackling hidden hunger: Understanding micronutrient deficiency and effective mitigation strategies. Chapter in a book: Emerging Solutions in Sustainable Food and Nutrition Security. Springer Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40908-0_12
4. Yilmaz, H., Yilmaz, A. (2025). Hidden hunger in the age of abundance: The nutritional pitfalls of modern staple crops. *Food Science and Nutrition,* 13(2), Article e4610. https://doi.org/10.1002/fsn3.4610
5. Malézieux, E., Verger, E. O., Avallone, S., Alpha, A., Ngigi, P. B., Lourme-Ruiz, A. et al. (2024). Biofortification versus diversification to fight micronutrient deficiencies: An interdisciplinary review. *Food Security,* 16, 261–275. https://doi.org/10.1007/s12571-023-01422-z
6. Thiviya, P., Gamage, A., Kapilan, R., Merah, O., Madhujith, T. (2022). Single cell protein production using different fruit waste: A review. *Separations*, 9(7), Article 178. https://doi.org/10.3390/separations9070178
7. Passarelli, S., Free, Ch. M., Shepon, A., Beal, T., Batis, C., Golden, Ch. D. (2024). Global estimation of dietary micronutrient inadequacies: A modelling analysis. *The Lancet Global Health,* 12(10), E1590–E1599. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(24)00276-6
8. Roth, J. A., Galyon, J. (2024). Food security: The ultimate one-health challenge. *One Health,* 19, Article 100864. https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2024.100864
9. Colgrave, M. L., Dominik, S., Tobin, B. A., Stockmann, R., Simon, C., Howitt, C. A. et al. (2021). Perspectives on future protein production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 69(50), 15076–15083. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c05989
10. Hendriks, S., Jean-François, S. Cole, M., Kambugu, F., Zilberman, D. et al. (2023). Ensuring access to safe and nutritious food for all through the transformation of food systems. Chapter in a book: Science and Innovations for Food Systems Transformation. Springer Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_4
11. Ladnova, O. L., Bolshakova, L. S., Kuzina, A. V., Izvekova, E. V., Merkulova, E. G., Ashikhina, L.A. (February 26–29, 2020). *Development of technology of cottage cheese enriched with iodine and succinic acid*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 640(3), Article 032016. Voronezh, Russian Federation, 2020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/3/032016
12. Rai, D., Chaudhary, Ch., Khatak, A., Banyal, S. (2024). A sustainable approach to combat micronutrient deficiencies and ensure global food security through biofortification. *European Journal of Nutrition and Food Safety,* 16(4), 15–30. https://doi.org/10.9734/ejnfs/2024/v16i41404
13. Li, J., Martin, C., Fernie, A. (2024). Biofortification's contribution to mitigating micronutrient deficiencies. *Nature Food,* 5(1), 19–27. https://doi.org/10.1038/s43016-023-00905-8
14. Izydorczyk, G., Ligas, B., Mikula, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Chojnacka K. (2021). Biofortification of edible plants with selenium and iodine–A systematic literature review. *Science of The Total Environment,* 754, Article 141983. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141983
15. Azorín, I., Madrid, J., Martínez-Miró, S., López, M., López, M. B., López, M. J. et al. (2024). Combined supplementation of two selenium forms (organic and inorganic) and iodine in dairy cows' diet to obtain enriched milk, cheese, and yogurt. *Animals*, 14(9), Article 1373. https://doi.org/10.3390/ani14091373
16. Барковская, И. А., Кручинин, А. Г., Рожкова, И. В. (2024). Дефицит йода в России: современное состояние проблемы, мировая практика и новые подходы к терапии. *Пищевые системы,* 7(2), 238–245. [Barkovskaya, I. A., Kruchinin, A. G., Rozhkova, I. V. (2024). Iodine deficiency in Russia: Current state of the problem, global practice and new approaches to therapy. *Food Systems,* 7(2), 238–245. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-2-238-245

17. Vinogradov, D. V., Lupova, E. I., Pityurina, I. S. (March 29–30, 2021). *The use of iodine-containing additives in bakery production technology.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 954(1), Article 012046. Omsk City, Western Siberia, Russian Federation, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012046
18. Бирюкова, З. А., Пантелеева, О. Г., Юрова, Е. А., Гончарова, А. Я. (2014). Сохранность йода в молоке при стерилизации и хранении. *Молочная промышленность,* 10, 54–56. [Biryukova, Z. A., Panteleeva, O. G., Yurova, E. A., Goncharova, A. Ya. (2014). Preservation of iodine in fortified milk at sterilization and storage. *Milk Industry*, 10, 54–56. (In Russian)]
19. Зобкова, З. С. (2020). Внедрение и коммерциализация результатов научно-исследовательских работ в цельномолочной отрасли. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством,* 1(1), 199–204. [Zobkova, Z. S. (2020). Implementation and commercialization of the investigations results in whole milk branch. *Topical Issues of the Dairy Industry, Cross-Sectoral Technologies and Quality Management Systems*, 1(1), 199–204. (In Russian)] https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-199-204
20. Танина, В. И., Ионова, И. И., Фильчакова, С. А., Лукин, Д. С. (2012). Питьевое молоко с йодсодержащими добавками. *Переработка молока,* 5(151), 16–17. [Tanina, V. I., Ionova, I. I., Filchakova, S. A., Lukin, D. S. (2012). Drinking milk with iodine-containing additives. *Milk Processing,* 5(151), 16–17. (In Russian)]
21. Барковская, И. А. (2024). Перспективы обогащения молочных консервов йодированными сывороточными белками. *Молочная промышленность,* 2, 35–39. [Barkovskaya, I. A. (2024). Prospects for fortifying preserved dairy products with iodized whey proteins. *Milk Industry*, 2, 35–39. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-6
22. Wachowska, M., Adamczak, M. (2023). Importance of iodine fortification in food production: Human health and technology. *Journal of Elementology,* 28(1), 199–222. https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2342
23. Arias-Borrego, A., Velasco, I., Gómez-Ariza, J. L., García-Barrera, T. (2022). Iodine deficiency disturbs the metabolic profile and elemental composition of human breast milk. *Food Chemistry,* 371, Article 131329. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131329
24. Bonofiglio, D., Catalano, S. (2020). Effects of iodine intake and nutraceuticals in thyroidology: Update and prospects. *Nutrients,* 12(5), Article 1491. https://doi.org/10.3390/nu12051491
25. Gharibzahedi, S. M. T., Jafari, S. M. (2017). The importance of minerals in human nutrition: Bioavailability, food fortification, processing effects and nanoencapsulation. *Trends in Food Science and Technology,* 62, 119–132. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.017
26. Мухидинов, З. К., Касымова, Г. Ф., Джураева, Ф. Н., Бобокалонов, Д. Т., Халикова, М. Д., Тешаев, Х. И. (2008). Белки молочной сыворотки: анализ компонентного состава в полиакриламидном геле, выделение основных сывороточных белков. *Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук,* 1, 52–57. [Muhidinov, Z. K., Kasimova, G. F., Juraeva, F. N., Bobokalonov, J. T., Khalikova, M. D., Teshaev, Kh. I. (2008). Whey protein: Composition analysis on the PAAG, separation by ion exchenge chromatography. *News of the Academy of sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physical, Mathematical, Chemical, Geological and Technical Sciences,* 1, 52–57. (In Russian)]
27. Полищук, Е. К., Арюзина, М. А., Спирина, М. Е., Котенкова, Е. А. (2023). Влияние pH на извлечение белков из поджелудочной железы Sus scrofa. *Пищевые системы,* 6(4), 539–546. [Polishchuk, E. K., Aryzina, M. A., Spirina, M. E., Kotenkova, E. A. (2023). Influence of pH on protein extraction from Sus scrofa pancreas. *Food Systems,* 6(4), 539–546. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-539-546
28. Adler-Nissen, J. (1979). Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 27(6), 1256–1262. https://doi.org/10.1021/jf60226a042
29. Spellman, D., McEvoy, E., O'cuinn, G., FitzGerald, R. J. (2003). Proteinase and exopeptidase hydrolysis of whey protein: Comparison of the TNBS, OPA and pH stat methods for quantification of degree of hydrolysis. *International Dairy Journal,* 13(6), 447–453. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(03)00053-0
30. Chen, L., Chen, Q., Zhang, Z., Wan, X. (2009). A novel colorimetric determination of free amino acids content in tea infusions with 2,4-dinitrofluorobenzene. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(2), 137–141. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.08.007
31. Spellman, D., O'cuinn, G., FitzGerald, R. J. (2009). Bitterness in *Bacillus* proteinase hydrolysates of whey proteins. *Food Chemistry,* 114(2), 440–446. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.067
32. Permyakov, E. A. (2020). α-Lactalbumin, amazing calcium-binding protein. *Biomolecules*, 10(9), Article 1210. https://doi.org/10.3390/biom10091210
33. UniProt. (n. d.). P02769 ALBU_BOVIN. Retrieved from https://www.uniprot.org/uniprotkb/P02769/entry Accessed March 08, 2025
34. Барковская, И. А., Кручинин, А. Г. (2024). Исследование процесса селективной термоденатурации белков молочной сыворотки. *Пищевая промышленность,* 11, 34–37. [Barkovskaya, I. A., Kruchinin, A. G. (2024). Study of the process of selective thermodenaturation of whey proteins. *Food Industry*, 11, 34–37. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.006
35. McGuffey, M. K., Otter, D. E., van Zanten, J. H., Foegeding, E. A. (2007). Solubility and aggregation of commercial α-lactalbumin at neutral pH. *International Dairy Journal,* 17(10), 1168–1178. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.04.003
36. Сордонова, Е. В., Жамсаранова, С. Д., Лыгденов, Д. В. (2018). Разработка и характеристика органических производных йода и цинка. *Вестник ВСГУТУ,* 2(69), 73–79. [Sordonova, E. V., Zhamsaranova, S. D., Lygdenov, D. V. (2018). Development and characterization of organic iodine and zinc derivatives. *ESSUTM Bulletin*, 2(69), 73–79. (In Russian)]
37. Кутяков, В. А., Салмина, А. Б. (2014). Металлотионеины как сенсоры и регуляторы обмена металлов в клетках. *Бюллетень сибирской медицины,* 13(3), 91–99. [Kutyakov, V. A., Salmina, A. B. (2014). Metallothioneins as sensors and controls exchange of metals in the cells. *Bulletin of Siberian Medicine,* 13(3), 91–99. (In Russian)]
38. Popov, I. A., Indeikina, M. I., Kononikhin, A. S., Starodubtseva, N. L., Nikolaev, E. N., Kozin, S. A. et al. (2013). ESI–MS identification of the minimal zinc-binding center in natural isoforms of β-amyloid domain 1–16. *Molecular Biology*, 47(3), 440–445. https://doi.org/10.1134/S002689331302012X
39. Pinto, L. D., Puppin, P. A. L., Behring, V. M., Alves, O. C., Rey, N. A., Felcman, J. (2012). Solution and solid state study of copper (II) ternary complexes containing amino acids of interest for brain biochemistry-2: Homocysteine with aspartate, glutamate or methionine. *Inorganica Chimica Acta,* 386, 60–67. https://doi.org/10.1016/j.ica.2012.01.025
40. Gołębiowski, A., Pomastowski, P., Rafińska, K., Zuvela, P., Wong, M. W., Pryshchepa, O. et al. (2022). Functionalization of alpha-lactalbumin by zinc ions. *ACS Omega,* 7(43), 38459–38474. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03674
41. Dissanayake, M., Ramchandran, L., Piyadasa, C., Vasiljevic, T. (2013). Influence of heat and pH on structure and conformation of whey proteins. *International Dairy Journal,* 28(2), 56–61. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2012.08.014
42. Калугина, Д. Н., Юрова, Е. А. (2021). Характеристики белкового состава в формировании сроков годности молока ультрапастеризованного. *Вестник КрасГАУ,* 10, 165–172. [Kalugina, D. N., Yurova, E. A. (2021). The protein composition characteristics in the formation of ultra pasteurized milk shelf life. *Bulliten of KSAU*, 10, 165–172. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-10-165-172
43. Алкадур, М. И., Пряничникова, Н. С., Юрова, Е. А., Петров, А. Н. (2024). Влияние термизации и пастеризации на качество сухого молока. *Техника и технология пищевых производств,* 54(2), 275–284. [Alkadour, M. I., Pryanichnikova, N. S., Yurova, E. A., Petrov, A. N. (2024). Effect of thermal treatment and pasteurization on milk powder quality. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(2), 275–284] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2506
44. Lam, R. S. H., Nickerson, M. T. (2015). The effect of pH and temperature pretreatments on the physicochemical and emulsifying properties of whey protein isolate. *LWT — Food Science and Technology,* 60(1), 427–434. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.031
45. Ибрагимова, З. Р., Цопанова, Е. И., Симеониди, Д. Д. (2015). Получение и аспекты рационального применения йодированных белков в технологии функциональных продуктов питания. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов,* 5(34), 73–77. [Ibragimova, Z. R., Tsopanova, E. I., Simeonidi, D. D. (2015). Preparation and aspects of the rational use of iodized proteins in technology of functional foods. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*, 5(34), 73–77. (In Russian)]
46. Kruchinin, A. G., Bolshakova, E. I. (2022). Hybrid strategy of bioinformatics modeling (in silico): Biologically active peptides of milk protein. *Food Processing: Techniques and Technology,* 52(1), 46–57. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-46-57
47. Ульрих, Е. В., Кригер, О. В., Потураева, Н. Л., Будрик, В. Г., Ботина, С. Г., Агаркова, Е. Ю. и др. (2012). Технология структурированного гипоаллергенного продукта. *Техника и технология пищевых производств,* 4(27), 76А-80. [Ulrikh, E. V., Kriger, O. V., Poturaeva, N. L., Budrik, V. G., Botina, S. G., Agarkova, E. J. et al. (2012). Technology of structurised hypoallergenic food product. *Food Processing: Techniques and Technology*, 4(27), 76A-80. (In Russian)]
48. Донская, Г. А., Креккер, Л. Г., Колосова, Е. В., Бычкова, Т. С., Карапетян, В. К. (2024). Радиопротекторные ингредиенты композиционного молочного продукта. *Вестник МГТУ,* 27(2), 193–204. [Donskaja, G. A., Krekker, L. G., Kolosova, E. V., Bychkova, T. S., Karapetyan, V. K. (2024). Radioprotective ingredients of a composite dairy product. Vestnik of MSTU, 27(2), 193-204. (In Russian)] https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-193-204
49. Большакова, Л. С., Литвинова, Е. В., Кузина, А. В., Лисицын, А. Б., Чернуха, И. М. (2013). Исследование профилактической эффективности биологически активной добавки Биойод. *Фундаментальные исследования,* 10–11, 2401–2404. [Bolshakova, L. S., Litvinova, E. V., Kuzina, A. V., Lisicyn, A. B., Chernuha, I. M. (2013). Study of prophylactic effectiveness of the biologicalski active additives Bioiod. *Fundamental Research*, 10–11, 2401–2404. (In Russian)]
50. Семенова, Е. С., Симоненко, Е. С., Симоненко, С. В., Зорин, С. Н., Петров, Н. А., Мазо, В. К. (2023). Исследование процесса гидролиза белков молока с использованием ферментных препаратов отечественного производства. *Пищевые системы,* 6(2), 224–232. [Semenova, E. S., Simonenko, E. S., Simonenko, S. V., Zorin, S. N., Petrov, N. A., Mazo, V. K. (2023). Study of the process of hydrolysis of milk proteins using enzyme preparations of domestic and production. *Food Systems*, 6(2), 224–232] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-224-232

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Барковская Ирина Александровна — аспирант, младший научный сотрудник, Лаборатория технологий биотрансформации и консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, ул. Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–499–236–02–36 E-mail: i_barkovskaya@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4779-1076 * автор для контактов	**Irina A. Barkovskaya**, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, All-Russian Dairy Research Institute 35/7, Lyusinovskaya str., 115093, Moscow, Russia Tel: +7–499–236–02–36 E-mail: i_barkovskaya@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4779-1076 * corresponding author
Рябова Анастасия Евгеньевна — доктор технических наук, научный сотрудник, Лаборатория технологий биотрансформации и консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, ул. Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–499–236–02–36 E-mail: a_ryabova@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5712-2020	**Anastasia E. Ryabova**, Doctor of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, All-Russian Dairy Research Institute 35/7, Lyusinovskaya str., 115093, Moscow, Russia Tel: +7–499–236–02–36 E-mail: a_ryabova@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5712-2020
Рожкова Ирина Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория прикладной микробиологии и геномики микроорганизмов, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, ул. Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–499–236–72–16 E-mail: i_rozhkova@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4441-4515	**Irina V. Rozhkova**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Applied Microbiology and Genomics of Microorganisms, Laboratory of Applied Microbiology and Microbial Genomics, All-Russian Dairy Research Institute 35/7, Lyusinovskaya str., 115093, Moscow, Russia Tel: +7–499–236–72–16 E-mail: i_rozhkova@vnimi.org ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4441-4515
Критерии авторства	**Contribution**
Концептуализация — **Барковская И. А.**; Обработка данных — **Барковская И. А.**; Исследование — **Барковская И. А.**, **Рожкова И. В.**; Управление проектом — **Рябова А. Е.**; Контроль — **Рябова А. Е.**; Написание текста — первоначальная версия — **Барковская И. А.**; Написание текста — рецензирование и редактирование — **Рябова А. Е.**, **Рожкова И. В.**	Conceptualization — **Barkovskaya I. A.**; Data curation — **Barkovskaya I. A.**; Investigation — **Barkovskaya I. A.**, **Rozhkova I. V.**; Project administration — **Ryabova A. E.**; Supervision — **Ryabova A. E.**; Writing — original draft — **Barkovskaya I. A.**; Writing — review & editing — **Ryabova A. E.**, **Rozhkova I. V.**
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-231-234

Received 20.01.2025
Accepted in revised 12.05.2025
Accepted for publication 14.05.2025
© Ammar A. S. M., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

DATE (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.) FRUITS AND SEEDS NANOTECHNOLOGY: A MINI REVIEW

Abdalla S. M. Ammar

Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

KEY WORDS:
nanoparticles, chemical composition, glycemic index, date fruits, date seeds

ABSTRACT

Nanotechnology is widely used in various sectors, and the increased interest in using nanoparticles in food technology is very clear. In this article, the history of dates and date production in Egypt was described. The anatomy of date fruit, classification of dates according to the moisture content, maturity stages, quality indices, and chemical composition, bioactive components and nutrients of dates, and the glycemic index and glycemic load of different varieties of dates worldwide were reviewed. The most recent date fruit nanoparticles (DFNPs) products and their applications for human health, such as anticancer, antimicrobial, and anti-fibrotic activities, were presented. The nutritional value of date kernels and their uses is of great interest in producing functional foods. Therefore, special emphasis has also been given to the novel date seed nanoparticles (DSNPs) products and their utilization. The role of these nanoparticles in nonfood sectors, such as yielding biodiesel, good thermal insulation in buildings, nanofillers as reinforcement materials in plastic, and as bio-adsorbent of pigments, was also considered.

Поступила 20.01.2025
Поступила после рецензирования 12.05.2025
Принята в печать 14.05.2025
© Аммар А. С. М., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

НАНОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПЛОДОВ И СЕМЯН ФИНИКА (*PHOENIX DACTYLIFERA* L.): МИНИ-ОБЗОР

Аммар А. С. М.

Факультет пищевой науки и технологии, сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
наночастицы, химический состав, гликемический индекс, финики, семена (косточки) финика

АННОТАЦИЯ

Нанотехнологии широко используются в различных областях, и очевиден возросший интерес к использованию наночастиц в пищевых технологиях. В этой статье описывается история фиников и производство фиников в Египте. Рассмотрено строение финика и классификация по содержанию влаги, стадиям зрелости, показателям качества и химическому составу, биоактивным компонентам и питательным веществам, а также гликемический индекс и гликемическая нагрузка различных сортов фиников по всему миру. Представлены новейшие продукты на основе наночастиц фиников (DFNP), и описаны их полезные для здоровья человека свойства, такие как противораковая, противомикробная и антифиброзная активность. Пищевая ценность финиковых косточек и их применение представляют большой интерес для производства функциональных продуктов питания. Поэтому особое внимание уделено новым продуктам на основе наночастиц финиковых косточек (DSNP) и их использованию. Также рассмотрена роль этих наночастиц в непищевых отраслях, таких как получение биодизеля, теплоизоляция для зданий, нанонаполнители в качестве армирующих добавок для пластика и биоадсорбенты пигментов.

1. Introduction

The ancient Egyptians used the fruits to make date wine, and ate them at the harvesting. Dried dates either pitted or unpitted, can be consumed directly as a complete healthy, and tasty meal rich in nutrients and they are very suitable for a variety of recipes in food processing and bakeries.

Egypt is the largest date-producing country in the world, and the world annual production in 2023 was estimated at 9.661.174 tons [1]. The production of dates (*Phoenix dactylifera* L.) in Egypt was estimated at 1.867.064 tons in 2023 [1] and nearly all of the produced dates are consumed by Egyptians. Egypt is famous for planting dry dates and has various types of most preferred dates. According to the moisture content in fruits there are three types of dates: dry dates (⩽18 % moisture), semi-dry dates (more than 18 to less than 30 % moisture) and soft dates (rutab) (⩾30 % moisture). There are more than 200 varieties of dates with different shapes and flavors, however, all of them are the same in composition. Date fruits are composed of epicarp (skin), fleshy mesocarp (pulp), endocarp and a seed called a kernel or pit or pyrene (Figure 1). Date seeds are non-edible parts (wastes) of date fruit processing which are normally being disposed [2]. Based on the nutritional value of date kernels, various publications have proposed their use as an antioxidant and dietary fiber ingredient in noodles [3], as a fat replacer in meat balls [4], as a caffeine-free coffee alternative and animal feed component [5].

Alghazal et al. [6] produced fortified date paste with free and calcium alginate microencapsulated *Bifidobacterium lactis* Bb-12. Date paste showed a protective effect for encapsulated bacteria. Also, El-Kholy [7] produced yoghurt fortified with date seed powder as a natural prebiotic stabilizer.

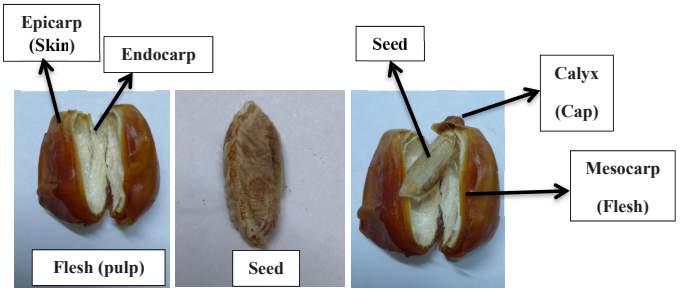


Figure 1. **The different fruiting components of the date palm fruit**
Рисунок 1. **Различные компоненты плода финиковой пальмы**

This article reviews using nanotechnology to produce various nanoparticles of date fruits and seeds and its utilization as well as quality indices, nutritional value and chemical composition of fruits.

FOR CITATION: **Ammar, A. S. M.** (2025). Date (*Phoenix dactylifera* L.) fruits and seeds nanotechnology: A mini review. *Food Systems,* 8(2), 231–234. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-231-234

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Аммар, А. С. М.** (2025). Нанотехнологии на основе плодов и семян финика (*Phoenix dactylifera* L.): мини-обзор. *Пищевые системы*, 8(2), 231–234. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-231-234

2. Objects and methods

The sources of information were the following scientific databases: Scopus, PubMed, Research Gate, Science Direct, and Google Scholar. The search strategy included the following keywords: nanoparticles, chemical composition, glycemic index, date fruits, date seeds. The following acceptance criteria for research characterization were considered: classification of dates according to the moisture content, maturity stages, quality indices, chemical composition, bioactive components and nutrients of dates, and the glycemic index and glycemic load of different varieties of dates worldwide. The most recent date fruit nanoparticles (DFNPs) and date seed nanoparticles (DSNPs) products and their applications.

The parameters of the publications were as follows: publications from 1982 until 2024 (40 references were selected for this review); language: English. Exclusion criteria: no access to the full-text articles. Based on the review, the author compiled information on the discussion of date (*Phoenix dactylifera* L.) fruits and seeds nanotechnology.

3. Nutritional value and chemical composition of dates

Dates have a high nutritional value. Dates contain minerals (i. e., K, Na, Mg, Ca and P). Fruits are a very good source of potassium. Furthermore, dates have trace elements including boron, cobalt, copper, fluorine, iron, manganese, selenium, and zinc. Also, fruits have vitamins B1, B2, B6, folic acid and ascorbic acid, proteins, fats, sugars. The sugar content of ripe dates represents about 80 % mainly in the form of sucrose, glucose and fructose [8]. Also, date fruits are rich in natural fibers. Always, dried dates contain double the level of nutrients especially carbohydrates, have lower water activity and consequently more shelf life in comparison to fresh dates. Also, bioactive ingredients are naturally present in dates especially phenolic acids, carotenoids, flavonoids, polyphenols, phytosterols, and α-tocopherols. Quality (degree of excellence of fresh date fruits) indicators include fruit size, chewiness, color, shape, cleanness and defects (i. e., sunburns, discoloration, insect infestation, skin separation, sugar crystallization, unpollinated fruits, fermented and spoiled dates). Growth stages and high-quality characteristics of date fruits are tabulated in Table 1.

The glycemic index (GI) is a scale that ranks food or drink by how much it increases blood sugar levels after it is consumed in comparison with pure glucose. Glycemic load (GL) = GI X dietary carbohydrate content (in grams) /100 [9,10]. Table 2 shows the glycemic index and glycemic load of different varieties of dates worldwide. Data in Table 2 exhibited that Sellaj date fruits had the highest GI value (74.6) followed by Maktoomi date fruits (71). While Zaghloul date fruits contained the lowest GI (30.3) followed by Boma'an date fruits (30.5).

4. Nanoparticles of date fruits and seeds

Nano-sized components are particles ranging from 1 to 100 nm in diameter with a high surface-to-volume ratio, which makes them more active and dispersed than larger one [16]. Food is considered nanofood if cultivated, produced, processed or packaged using nano techniques as well as with added nanoparticles [17,18].

Abdel Baky et al. [19] extended the date fruit shelf life and improved fruit quality using edible nanofilms for 2 months at 0 °C.

Ghani and Hussain [20] used the resultant extract either from date fruits or seeds as reducing and stabilizing agents for green synthesis of metal nanoparticles. Also, Khatami and Pourseyedi [21] performed green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using date palm kernel aqueous extract. The synthesized silver nanoparticles (AgNPs) showed an antimicrobial effect. Khalil et al. [22] formulated date palm extract nanoemulsion. The nanoemulsion exhibited an anticancer effect. Likewise, Abdel-Alim et al. [23] biosynthesized AgNPs using the aqueous extracts of Egyptian date palm kernels. The AgNPs exhibited an antimicrobial effect. Also, Ma'abreh et al. [24] produced gel from nanoparticles of date palm syrup. Charti et al. [25] green synthesized zinc oxide nanoparticles using aqueous date palm wood extract. Hasson et al. [26] produced date palm silver nanoparticles that exhibited high antibacterial activity against gram-negative bacteria. Ali et al. [27] prepared a nanocatalyst consisting of CaO and Fe_3O_4 accompanied by $CaFe_2O_4$ which was used for catalytic transesterification of palm seed oil for yielding biodiesel. Nasabi et al. [28] used titanium dioxide nanoparticles as a decolorant for decolorizing date syrup. Tables 3 and 4 present a summary of novel date fruit nanoparticles (DFNPs) and date seed nanoparticles (DSNPs) and their utilization, respectively. Also, Figure 2 shows various functional foods and nonfood products generated from date seed nanoparticles (DSNPs).

Table 1. **Maturity stages and high-quality properties of date fruits [11]**

Таблица 1. **Стадии зрелости и показатели высокого качества фиников [11]**

Maturity stages	Quality criteria	Description
Hababouk, Kimri, Khalal, Rutab, and Tamr	Flesh	Thick
	Seed	Small
	Size	Adequate
	Brightness	Glossy
	Skin	Smooth
	Foreign materials	Free

Table 2. **The glycemic index and glycemic load of different varieties of dates worldwide**

Таблица 2. **Гликемический индекс и гликемическая нагрузка различных сортов фиников по всему миру**

Dates variety	GI	GL	References
Khalas	35.5	n/a	[12]
Barhi	49.7	n/a	
Boma'an	30.5	n/a	
Fara'd	54.0	n/a	[13]
Lulu	53.5	n/a	
Boma'an	46.3	n/a	
Dabbas	49.1	n/a	
Khalas	55.1	n/a	
Sellaj	74.6	24.0	[14]
Maktoomi	71.0	16.1	
Shaqra	42.8	9.2	
Sukkary	43.4	11.7	
Sag'ai	44.6	15.6	
Ajwah	55.9	8.5	
Ruthana	52.5	11.7	
Khudri	61.7	14.2	
Nabtat-ali	59.9	16.3	
Medjool	55.3	17.2	
Rashodia	50.9	12.4	
Partamoda	65.9	32.9	[15]
Malakabi	69.0	34.5	
Saadi	67.4	33.7	
Zaghloul	30.3	15.1	
Samani	34.6	17.3	

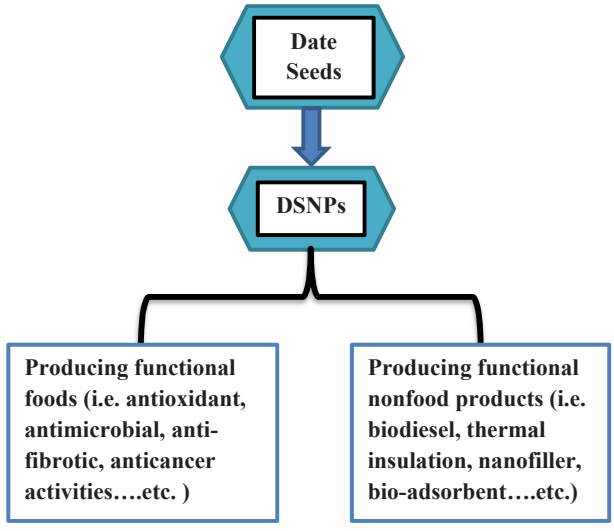


Figure 2. **Various functional foods and nonfood products generated from date seed nanoparticles (DSNPs)**

Рисунок 2. **Различные функциональные продукты питания и непищевые продукты, полученные из наночастиц финиковых косточек (DSNP)**

Table 3. **Novel date fruit nanoparticles (DFNPs) products and their applications**

Таблица 3. **Новые продукты на основе наночастиц фиников (DFNP) и их применение**

Date palm parts	DFNPs products	Application	References
Date fruit syrup	Producing gel from nanoparticles.	Gel nanoparticles to be used in developing date industry.	[24]
Ajwa date fruit	Ajwa nanopreparation	Ajwa nanopreparation protects from doxorubicin-associated cardiotoxicity.	[29]
Date fruits or seeds	Green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) using the extracts of date fruits or seeds	Increasing the anti-inflammatory effect of piroxicam drug and high antibacterial activity.	[21,26,30]
Date fruits	Date palm extract nanoemulsion.	The nanoemulsion exhibited an anticancer effect.	[22]
	Novel nano-extract of fresh fruit of “Hayany” [Egyptian date] was synthesized using a ball-milling technique.	Exhibiting the highest antimicrobial activity	[31]
	Using the powder form of date palm extract of Khalas cultivar and incorporating it into a nanolipid formulation such as a nanostructured lipid carrier prepared with palm oil.	Improving the antibacterial activity of the formulation (date palm extract + nanolipid)	[32]
	Using nano date press cake particles (waste generated from date juice extraction)	Producing soft carbonated date biobeverage rich in nutrients	[33]
	A date fruit extract loaded onto chitosan nanoparticles	Anti-fibrotic properties and improved liver function enzymes and endogenous antioxidant enzymes	[34]

Table 4. **Novel date seed nanoparticles (DSNPs) products and their utilization**

Таблица 4. **Новые продукты на основе наночастиц финиковых косточек (DSNP) и их применение**

Date palm parts	DSNPs products	Application	References
Date seeds	Synthesis of carbon nanotubes from Iraqi date palm seeds	Producing carbon nanotubes	[35]
	Preparing a nanocatalyst consisting of CaO and Fe_3O_4 accompanied by $CaFe_2O_4$	Transesterification of palm seed oil for yielding biodiesel	[27]
	Nanoemulsion of methanolic extract of date seeds	The methanolic extract of date seed-loaded nanoemulsion has more antioxidants and high drug release compared with conventional methanolic extract	[36]
	Nanoparticles of date pits	Nanoparticles of date pits and 50% by-volume epoxy provided good thermal insulation in buildings	[37]
	Nano date seed	Organic date seed nanofillers as reinforcement materials with MDPE and PET	[38]
	Synthesizing nanoparticles from date seeds (water and methanol extracts)	Enhancing their phenolic content and antioxidant activity to be used in food applications	[39]
	Fe_3O_4 nanoparticles in date seeds powder	Bio-adsorbent used to remove methylene blue from water	[40]

5. Conclusion

Currently, nanotechnology plays an important role in food technology. This study reviewed the most recent nanoparticles of date fruit products and their applications for human health, such as anticancer, antimicrobial, and anti-fibrotic activities. Likewise, the novel nanoparticles of date seed products and their utilization were reviewed. The role of these nanoparticles, such as yielding biodiesel, good thermal insulation in buildings, nanofillers as reinforcement materials in plastic, and bio-adsorbent of pigments was mentioned. Therefore, date kernels are of great interest in producing functional foods and very useful nonfood products.

REFERENCES

1. FAOSTAT. Crops and livestock products. Retrieved from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL Accessed December 19, 2024.
2. Mahmud, I. A., Mirghani, M. E. S., Alkhatib, M. F. R., Yusof, F., Shahabuddin, M., Rashidi, O. et al. (2017). Nutrients depictions of Barhi date palm (*Phoenix dactylifera* L.) kernels. *International Food Research Journal*, 24(Suppl), S325-S334.
3. Ammar, A.S.M. (2014). The effect of incorporation of date seed powder on the quality characteristics of noodles. *International Journal of Academic Research* 6(4), 32–37. https://doi.org/10.7813/2075-4124.2014/6-4/a.5
4. Ammar, A. S. M., Abd El-Hady, E. A., Abd El-Razik, M. M. (2014). Quality characteristics of low fat meat balls as affected by date seed powder, wheat germ and pumpkin flour addition. *Pakistan Journal of Food Sciences*, 24(4), 175–185.
5. Hossain, M.Z., Waly, M.I., Singh, V., Sequeira, V., Rahman, M.S. (2014). Chemical composition of date–pits and its potential for developing value–added product — a review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 64(4), 215–226. https://doi.org/10.2478/pjfns-2013-0018
6. Alghazal A. M., Saleh F. A., Alotaibi M. M. (2020). Fortification the dates paste *Bifidobacterium lactis* Bb-12 microencapsulated of calcium alginate. *The Scientific Journal of King Faisal University. Basic and Applied Sciences,* 21(2), 199–202. https://doi.org/10.37575/b/agr/2203 (In Arabic)
7. EL-Kholy, W. M. (2018). Production of probiotic yoghurt fortified with date seeds (*Phoenix dactylifera* L.) powder as prebiotic and natural stabilizer. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 96(1), 159–173.
8. Niazi, S., Khan, I.M., Rasheed, S., Niazi, F., Shoaib, M., Raza, H., Iqbal, M.W. (2017). An overview: Date palm seed coffee, a functional beverage. *International Journal of Public Health and Health Systems*, 2(2), 18–25.
9. Foster-Powell, K., Holt, S. H. A., Brand-Miller, J. C. (2002). International table of glycemic index and glycemic load values: 2002. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(1), 5–56. https://doi.org/10.1093/ajcn/76.1.5
10. Chlup, R., Bartek, J., Řezníčková, M., Zapletalová, J., Doubravová, B., Chlupová, L. et al. (2004). Determination of the glycaemic index of selected foods (white bread and cereal bars) in healthy persons. *Biomedical Papers*, 148(1), 17–25. https://doi.org/10.5507/bp.2004.003
11. Dowson, V. H. W. (1982). Date Production and Protection: With Special Reference to North Africa and the Near East. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1982.
12. Miller, C. J., Dunn, E. V., Hashim, I. (2002). Glycemic index of 3 varieties of dates. *Saudi Medical Journal*, 23(5), 536–538.
13. Alkaabi, J. M., Al-Dabbagh, B., Ahmad, S., Saadi, H. F., Gariballa, S., Ghazali, M. A. (2011). Glycemic indices of five varieties of dates in healthy and diabetic subjects. *Nutrition Journal*, 10, Article 59. https://doi.org/10.1186/1475-2891-10-59
14. AlGeffari, M. A., Almogbel, E. S., Alhomaidan, H. T., El-Mergawi, R., Barrimah, I. A. (2016). Glycemic indices, glycemic load and glycemic response for seventeen varieties of dates grown in Saudi Arabia. *Annals of Saudi Medicine*, 36(6), 397–403. https://doi.org/10.5144/0256-4947.2016.397
15. Mahmoud, L. A., Mahmoud, R. M., Ashoush, I. S. (2019). Assessment of glycemic index and chemical characterization for five Egyptian date fruit varieties. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*, 27(2), 1475–1482. https://doi.org/10.21608/ajs.2019.11885.1017
16. Ammar, A. S., Bazaraa, W. A. (2021). Juice nanotechnology: A mini review. *Food Systems*, 4(4), 255–258. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-4-255-258
17. Mousavi, S. R., Rezaei, M. (2011). Nanotechnology in agriculture and food production. *Journal of Applied Environmental and Biological Science*, 1(10), 414–419.
18. Bumbudsanpharoke N., Ko S. (2015). Nano-food packaging: An overview of market, migration research, and safety regulations. *Journal of Food Science*, 80 (5), R910-R923. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12861
19. Abdel Khafar, E. A., Abdullah, Z. E.-D., Aboul-Anean, H. E. D. (2020). Application of nano edible films to improve some dates in Saudi Arabia. *International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences*, 9(2), 69–84.
20. Ghani, S. S., Hussain, I. (2021). Dates (*Phoenix dactylifera* L.) extracts derived nanoparticles and its application. *Current Chemistry Letters,* 10, 235–254. https://doi.org/10.5267/j.ccl.2021.1.007
21. Khatami, M., Pourseyedi, S. (2015). *Phoenix dactylifera* (date palm) pit aqueous extract mediated novel route for synthesis high stable silver nanoparticles with high antifungal and antibacterial activity. *IET Nanobiotechnology*, 9(4), 184–190. https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2014.0052
22. Khalil, H. E., Alqahtani, N. K., Darrag, H. M., Ibrahim, H.-I. M., Emeka, P. M., Badger-Emeka, L. I. et al. (2021). Date palm extract (*Phoenix dactylifera*) PEGylated nanoemulsion: Development, optimization and cytotoxicity evaluation. *Plants*, 10(4), Article 735. https://doi.org/10.3390/plants10040735
23. Abdel-Alim, M. E., Samaan, K., Guillaume, D., Amla, H. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles using Egyptian date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seeds

and their antibacterial activity assessment. *Bioactivities*, 1(1), 1–8. https://doi.org/10.47352/bioactivities.2963-654x.180
24. Ma'abreh, A. S., Abu-Salah, K. M., Al-Awaadh, A. M., Mohamed, A. A. (2018). Properties of gel formulated from nanoparticles of palm date syrup. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7), Article e12890. https://doi.org/10.1111/jfpe.12890
25. Charti, I., Eddahbi, A., Abboud, Y., El Bouari, A. (August 20–21, 2018). *Rapid and green microwave-assisted synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous Phoenix dactylifera L. (Date palm) wood extract and evaluation of antibacterial and antifungal activities*. International Conference on Materials Science and Materials Chemistry, Paris, France, 2018.
26. Hasson S. O., Salman, S. A., Hassan, S. F., Abbas, S. M. (2021). Antimicrobial effect of eco- friendly silver nanoparticles synthesis by Iraqi date palm (*Phoenix dactylifera*) on gram-negative biofilm-forming bacteria. *Baghdad Science Journal*, 18(4), 1149–1156. https://doi.org/10.21123/bsj.2021.18.4.1149
27. Ali, M. A., Al-Hydary, I. A., Al-Hattab, T. A. (2017). Nano-magnetic catalyst CaO-Fe_3O_4 for biodiesel production from date palm seed oil. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 12(3), 460–468. https://doi.org/10.9767/bcrec.12.3.923.460-468
28. Nasabi, M., Labbafi, M., Khanmohammadi, M. (2017). Optimizing nano TiO_2 assisted decoloration process for industrial date syrup utilizing response surface methodology. *Journal of Food Process Engineering,* 40(5), Article e12537. https://doi.org/10.1111/ jfpe.12537
29. Al-Jaouni, S., Abdul-Hady, S., El-Bassossy, H., Salah, N., Hagras, M. (2019). Ajwa nanopreparation prevents doxorubicin-associated cardiac dysfunction: Effect on Cardiac Ischemia and antioxidant capacity. *Integrative Cancer Therapies,* 18, 1–9. https://doi.org/10.1177/1534735419862351
30. Sirry, S. M., Ali, S., Abdelaziz, A., Mohamed, A. (2020). Biosynthesis of silver nanoparticles using the extracts of palm date seeds (*phoenix dactylifera* L.) and its application in increasing the anti-inflammatory effect of piroxicam drug. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 11, Article 035017. https://doi.org/10.1088/2043-6254/aba837
31. Halabi, A. A., Elwakil, B. H., Hagar, M., Olama, Z. A. (2022). Date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) cultivar extracts: Nanoparticle synthesis, antimicrobial and antioxidant activities. *Molecules*, 27(16), Article 5165. https://doi.org/10.3390/molecules27165165
32. Elsewedy, H. S., Shehata, T. M., Alqahtani, N. K., Khalil, H. E., Soliman, W. E. (2023). Date palm extract (*Phoenix dactylifera*) encapsulated into palm oil nanolipid carrier for prospective antibacterial influence. *Plants*, 12(21), Article 3670. https://doi.org/10.3390/plants12213670
33. Ferweez, H., Elsyiad, S., Othman, A., Salah, Y. (2023). Effect of adding nano date press cake particles on physiochemical, microbiology analysis and sensory indices of soft carbonated date bio-beverage. *New Valley Journal of Agricultural Science*, 3(10), 142–158. https://doi.org/10.21608/nvjas.2023.232896.1244
34. Sahyon, H. A., El-Shafai, N. M., El-Mehasseb, I., Althobaiti, F., Aldhahrani, A., Elnajjar, N. (2023). The anti-toxic effect of the date palm fruit extract loaded on chitosan nanoparticles against CCl4-induced liver fibrosis in a mouse model. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, Article 123804. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123804
35. Kahdum, B. J., Lafta, A. J., Johdh, A. M. (2016). Synthesis and characterization of carbon nanotubes from Iraqi date palm seeds using chemical vapor deposition. *International Journal of ChemTech Research*, 9(12), 705–714.
36. Akhtar, J., Qadir, A., Aqil, M., Ahmad, U., Khan, N., Warsi, M. et al. (2020). Date seed extract-loaded oil-in-water nanoemulsion: Development, characterization, and antioxidant activity as a delivery model for rheumatoid arthritis. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 12(3), 308–316. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_268_20
37. Al Marri, M. G., Al-Ghouti, M. A., Shunmugasamy, V. C., Zouari, N. (2021). Date pits based nanomaterials for thermal insulation applications — Towards energy efficient buildings in Qatar. *PLoS ONE*, 16(3), Article e0247608. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247608
38. Elkhouly, H.I. (2021). Comparison of the effects of nano date seed as reinforcement material for medium-density polyethylene (MDPE) and polyethylene terephthalate (PET) using multilevel factorial design. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), 1462–1471. https://doi.org/10.1177/0967391120973501
39. Mostafa, H., Airouyuwa, J. O., Maqsood, S. (2022). A novel strategy for producing nano-particles from date seeds and enhancing their phenolic content and antioxidant properties using ultrasound-assisted extraction: A multivariate based optimization study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 87, Article 106017. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106017
40. Narasimharao, K., Al-Thabaiti, S., Rajor, H. K., Mokhtar, M., Alsheshri, A., Alfaifi, S. Y. et al. (2022). Fe3O4@date seeds powder: A sustainable nanocomposite material for wastewater treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3581–3597. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.176

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Abdalla S. M. Ammar, Professor, Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt Tel.: +2–0101–997–17–99 E-mail: abdallaammar@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9919-8760	**Аммар Абдалла С. М.**, профессор, Кафедра науки о питании и технологии, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа Тел.: +2–0101–997–17–99 E-mail: abdallaammar@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9919-8760
Contribution	**Критерии авторства**
The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism	Автор имеет единоличное отношение к написанию рукописи и несет ответственность за плагиат
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The author declares no conflict of interest.	Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-235-243

Поступила 19.01.2025
Поступила после рецензирования 05.05.2025
Принята в печать 12.05.2025
© Рождественская Л. Н., Ломовский И. О., Чугунова О. В., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

УНИФИКАЦИЯ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕЛОКСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ БОБОВОГО СЫРЬЯ

Рождественская Л. Н.[1,2]*, Ломовский И. О.[3], Чугунова О. В.[4]

[1]Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Новосибирск, Россия
[2]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия
[3]Институт химии твердого тела и механохимии сибирского отделения Российской Академии Наук, Новосибирск, Россия
[4]Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
бобовые, бобовые изоляты, бобовые концентраты, белоксодержащие продукты, функционально-технологические свойства, аналитические методы

АННОТАЦИЯ

Семена бобовых являются традиционной пищевой группой, имеющей высокую нутриентную плотность и сенсорные характеристики. Особенностью бобовых является их способность выступать в роли как основного пищевого ингредиента, так и выполнять функции пищевой добавки. В тоже время в исследованиях отсутствует единство подходов в использовании методик по определению функционально — технологических свойств (ФТС) бобовых ингредиентов, что не позволяет корректно сравнивать их результаты. Целью работы — обобщить имеющихся аналитические практики по исследованию ФТС белоксодержащих продуктов переработки бобового сырья (БСППБС), теоретически обосновать набор показателей для унифицированной комплексной системы оценки их качества и свойств. Под унифицированной системой понимается комплекс методик, обладающих высоким потенциалом для последующей стандартизации и возможностью применения в широком круге задач по определению физико-химических и ФТС БСППБС. Для решения задач исследования осуществлен поиск и обзор литературы, которые проведены с использованием PubMed, Research Gate, Google Scholar и Mendeley Web. Была выполнена полнотекстовая проверка 143 статьи, в результате чего сформирована окончательная выборка из 60 статей, подвергнутых тщательному изучению. Систематизация базировалась на наиболее достоверных и актуальных статьях последних 5 лет, детально описывающих особенности используемых методик исследования. Результатом работы является перечень показателей качества и методик анализов, определяющих дуальность в использования БСППБС. Выделен набор и используемые диапазоны критических параметров, требующих унификации для получения сопоставимых данных: температура, давление, pH, время и скорость взбивания и центрифугирования. Использование унифицированных методик определения ФТС позволит проводить адекватное сравнение БСППБС и полностью использовать имеющийся в них потенциал.

Received 19.01.2025
Accepted in revised 05.05.2025
Accepted for publication 12.05.2025
© Rozhdestvenskaya L. N., Lomovsky O. I., Chugunova O. V., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

UNIFICATION OF APPROACHES TO ASSESSING THE QUALITY AND FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF PROTEIN-CONTAINING PRODUCTS FROM PROCESSING LEGUME RAW MATERIALS

Lada N. Rozhdestvenskaya[1,2]*, Igor O. Lomovsky[3], Olga V. Chugunova[4]

[1]Novosibirsk Scientific Research Institute of Hygiene of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Novosibirsk, Russia
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
[3]Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
[4]Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

KEY WORDS:
pulses, legume isolates, legume concentrates, protein-containing products, functional and technological properties, analytical methods

ABSTRACT

Legume seeds are a traditional food group with high nutrient density and sensory characteristics. A distinctive feature of legumes is their ability both to act as the main food ingredient and to perform the functions of a food additive. At the same time, there is no unity of approaches in the use of methods for determining the functional and technological properties (FTP) of legume ingredients in studies, which does not allow for a correct comparison of their results. The aim of the work is to summarize the existing analytical practices for studying the FTP of protein-containing products of processing legume raw materials (PCPPLRM), to theoretically substantiate a set of indicators for a unified comprehensive system for assessing their quality and properties. A unified system is understood as a set of methods with high potential for subsequent standardization and the possibility of application in a wide range of tasks for determining the physicochemical properties and FTP of PCPPLRM. To solve the research tasks, a literature search and review were carried out using PubMed, Research Gate, Google Scholar and Mendeley Web. A full-text check of 143 articles was performed, resulting in a final selection of 60 articles that were subjected to careful study. The systematization was based on the most reliable and relevant articles of the last five years, which described in detail the features of the research methods used. The result of the work is a list of quality indicators and analysis methods that determine the duality in the use of PCPPLRM. A set and used ranges of critical parameters that require unification to obtain comparable data were identified: temperature, pressure, pH, time and speed of whipping and centrifugation. The use of unified methods for determining FTP will allow for an adequate comparison of PCPPLRM and the full use of their potential.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Рождественская, Л. Н., Ломовский, И. О., Чугунова, О. В.** (2025). Унификация подходов к оценке качества и функционально-технологических свойств белоксодержащих продуктов переработки бобового сырья. *Пищевые системы*, 8(2), 235–243. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-235-243

FOR CITATION: **Rozhdestvenskaya, L. N., Lomovsky, I. O., Chugunova, O. V.** (2025). Unification of approaches to assessing the quality and functional and technological properties of protein-containing products from processing legume raw materials. *Food Systems*, 8(2), 235–243. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-235-243

1. Введение

Рынок пищевой продукции постоянно подвергается качественной трансформации. Проблемы недостатка пищевых ресурсов в целом [1], белкового дефицита [2], дефицита эссенциальных для организма человека отдельных аминокислот или полиненасыщенных жирных кислот [3] и др. приводят к необходимости поиска новых востребованных пищевых источников с заданным составом и управляемым технологическим поведением. Сложившейся и хорошо изученной практикой в отношении большого количества поликомпонентных пищевых матриц является введение в состав различных изолятов и гидролизатов растительных белков [4–7].

Наиболее изученным представителем семейства бобовых является соя и продукты её переработки, в том числе концентраты и изоляты белков. Однако, в отношении других бобовых растений, накопленный опыт, особенно отечественный, гораздо более скромный [8]. В настоящее время идёт активный поиск методик получения концентратов белковой фракции, модификации как бобового растительного сырья в целом, так и получаемых концентратов и изолятов [9], а также модификации иных продуктов, получаемых в качестве побочных при основной переработке бобовых растений [10].

В отношении проблематики в области исследования бобовых, можно выделить следующие направления:

- исследования различных видов бобового сырья с учётом разнообразия зернобобовых культур: горох (посевной и полевой (пелюшка) (лат. Lathyrus oleraceus); кормовые бобы (лат. *Vicia Faba L.* или *Faba vulgaris)*, вика посевная/яровая (лат. *Vicia sativa)*, фасоль обыкновенная (лат. *Phaséolus vulgáris*), люпин (белый (лат. *Lupinus albus*), люпин желтый (лат. *Lupinus luteus*), люпин многолетний (лат. *Lupinus perennis*), люпин узколистный (лат. *Lupinus angustifolius*), соя (лат. *Glycine*), чечевица (лат. *Lens)*, чина посевная (лат. *Lathyrus sativus*), нут (лат. *Cícer*) с учётом особенностей сортовых отличий, особенностей регионов и технологий возделывания[1] и других отличий, обусловленных, например, применением методов генетической модификации;
- исследования, направленные на разработку технологий и параметров процессов получения: муки, экстрактов, концентратов, изолятов, гидролизатов, текстурированных продуктов, сухой аквафабы (продукт, получаемый сублимационной сушкой отвара семян бобовых);
- технологий разделения компонентов, включая глубокое фракционирование макронутриентов сырья с целью увеличения выхода всех компонент, включая белки, с их очисткой, концентрированием и модификацией функциональных и медико-биологических характеристик;
- поиск методов фракционирования макро- и микронутриентов сырья с получением белково-липидных и белково-углеводных составов с максимальным сохранением «фитохимического потенциала сопутствующих микронутриентов» [9,11];
- исследования, направленные на возможность использования инструментов цифровой нутрициологии и моделирования рецептур при обосновании включения БСППБС при разработке новых видов продукции.

В ходе исследований возникает проблема сравнения продуктов разной степени переработки по целому ряду показателей, в том числе их качественные характеристики и функционально-технологические свойства. В разных исследованиях, посвященных разработке продуктов на основе использования изолятов и гидролизатов бобовых культур и аквафабы, достаточно часто различается как сам перечень исследуемых показателей качества, безопасности и свойств, так и используемый аналитический инструментарий [12–15]. Неопределенность данного рода не позволяет свести в единую базу получаемые результаты исследований, поскольку выбор и разработка методик анализа в отдельных научных работах зачастую обусловлена скорее аналитическими и экономическими возможностями и задачами исследователя, чем ориентацией на последующую валидацию и стандартизацию используемых методик.

Фактически ни один из коммерчески реализуемых на рынке РФ БСППБС, несмотря на указание в технических спецификациях, например, значений жиро- или влагоудерживающей способности, не раскрывает особенностей методик определения этих свойств (ссылка на коммерческую тайну), что не позволяет обеспечить сопоставимость этих значений у разных производителей. Наиболее распространённым и эффективным методом устранения излишнего многообразия является унификация, которая охватывает как сам набор показателей, так и методики, используемые при их определении. Унификация в данном контексте рассматривается нами, как инструмент приведения к единообразию качественных характеристик БСППБС, установление единообразия параметров и режимов однотипных исследовательских процедур и выбор оптимального количества показателей, характеризующих значимые для их дальнейшего производственного использования ФТС. Перспективной целью проведения унификации является последующая стандартизация этих методов, юридическое закрепление проведенной унификации и уровня ее обязательности. В свою очередь стандартизация позволит в дальнейшем обеспечить единообразие и достоверность получаемых данных: провести аккредитацию лабораторий, аудит системы внутренних процедур контроля качества, аттестацию и оценку квалификации персонала [16]. Это обусловлено тем, что все официальные методы анализа базируются на протестированных и проверенных в ходе ряда верификационных испытаний в пищевом секторе методиках, что обеспечивает получение достоверных прецизионных данных.

На основании вышеизложенного, нами была сформулирована цель работы: обобщение имеющихся аналитических практик по исследованию функционально-технологических свойств (ФТС) БСППБС, с целью предложить теоретическое обоснование унифицированной системы оценки показателей качества. В соответствии с поставленной целью, в работе решались следующие задачи:

- выделить на основе имеющихся исследовательских аналитических практик основные качественные параметры и ФТС БСППБС;
- систематизировать используемые для определения ФТС БСППБС методы и выделить перечень контролируемых параметров измерения.

2. Объекты и методы

Поиск литературы для решения указанных задач проводился с использованием PubMed, Research Gate, Google Scholar и Mendeley Web. Была проведена полнотекстовая проверка 143 статей, в результате чего была сформирована окончательная выборка из 60 статей, подвергнутых тщательному изучению, в особенности самые достоверные (опирающиеся на максимальную аргументационную базу) и статьи последних 5 лет. Под максимальной аргументационной базой понимается не только подробное описание в источнике применяемой методики исследования свойств и особенности её модификации под конкретную исследовательскую задачу, но также описание механизма возникновения этих свойств с примерами их практического применения в пищевых матрицах.

Для формирования определенной системы методик исследования свойств БСППБС и выявления конкретных параметров осуществления процедур, нами было проведено теоретическое обоснование, включающее анализ, синтез, обобщение, сравнение информации, представленной в отобранных в ходе литературного обзора источниках. В ходе анализа литературных источников рассматривались исследуемые объекты (БСППБС), показатели качества и методики их определения. Из материалов была выделена, систематизирована и сгруппирована повторяющаяся или однотипная информация в отношении: этапов выполнения методик; параметров осуществления экспериментов; концентрации белковой компоненты в образцах; использованных расчётных формул.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Общие свойства и характеристики БСППБС

При использовании продуктов переработки бобового сырья при проектировании новой пищевой продукции необходимо учитывать их специфические функционально-технологические, антиоксидантные, антимикробные свойства, показатели пищевой и биологической ценности [17,18]. Отдельно выделяются в ряде работ способности отвечать БСППБС требованиям к ингредиентам при создании безглютеновой и безлактозной продукции. Основными макрокомпонентами семян бобовых является белок и клетчатка [19], что определяет возможность их дальнейшего производственного использования. Модификация входящих в состав белковых и углеводных структур осуществляется на основе единичного или комплексного влияния таких факторов, как: давление, температура, воздействие ультразвука, ферментов, кислот, щелочей или солей [9].

[1] Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорта растений. Государственная Комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений (ФГБУ «Госсорткомиссия») https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/

Благодаря своей технологической многофункциональности (эмульгирующим, гелеобразующим и пеноформирующим свойствам, а также жиро и влагоудерживающей способности) наряду с сухими БСППБС с разной концентрацией белка, среди производных переработки бобовых особую популярность получает сублимированная (сухая) аквафаба. [5–7]. Для получения аквафабы используют различные методы, основанные на изменении важнейших параметров процесса: соотношения воды и бобовых, температуры, pH и давления при котором осуществляется процесс варки. При получении эмульсий и пен на основе аквафабы особенно важно количество добавляемых к смеси гидроколлоидных камедей, гидроксипропилметилцеллюлозы и сахара [6]. Анализ научных источников показывает, нет единого мнения относительно соотношения бобовых и воды, режимов приготовления, а состав и ФТС аквафабы сильно различаются. Однако, при изучении свойств сублимированной аквафабы имеется значительное сходство методик с используемыми для анализа концентратов и изолятов из бобового сырья.

На основе анализа литературных материалов нами были выделены наиболее значимые направления исследования качественных характеристик БСППБС, которые формируют обоснование потенциала и их дальнейшего перспективного использования:

- ❑ исследование состава белкового, углеводного и жирно-кислотного состава, содержания воды и золы;
- ❑ определение содержания витаминов, биологически активных и минеральных веществ;
- ❑ оценка содержания антипитательных веществ;
- ❑ определение общего количества и аминокислотного состава белка;
- ❑ изучение фракционного состава белка, распределение основных белковых фракций: альбумина, глобулина, проламина и глютелина; анализ белкового профиля на основе молекулярно-массового распределения,
- ❑ определение содержания свободных аминокислот;
- ❑ исследование температуры денатурации основных белковых компонентов [20,21].

Поскольку БСППБС выполняют роль сырьевого ингредиента или технологической добавки при производстве пищевых продуктов, для них вышеприведенный перечень качественных характеристик будет иметь неразрывную связь с номенклатурой потребительских свойств и показателей качества товаров. Идентификационные и органолептические характеристики, показатели физического состояния БСППБС объединяются в их товароведную оценку и осуществляются на основании регламентов, показатели химического состава БСППБС, определяют их пищевую ценность и возможность использования в качестве функциональных пищевых ингредиентов.

3.2. Связь белковой структуры и свойств БСППБС

При исследовании белоксодержащих пищевых продуктов наиболее распространены методики анализа, позволяющим не только определить общее содержание, но и аминокислотный состав и усвояемость белка. На основе получаемых данных становится возможным не только ранжировать белковые продукты, но и оценивать их физиологическую полноценность, а также обосновывать необходимые параметры и виды обработки, влияющие на модификацию белков и, как следствие, усвояемость аминокислот. Кроме того, белки бобовых представлены набором фракций с разной молекулярной массой, различающихся по физико-химическим и функциональным свойствам. Данные о соотношении отдельных белковых фракций позволяют прогнозировать технологические и сенсорные характеристики продуктов и ингредиентов (вкус, цвет, запах и пр.), получаемых в процессе переработки бобовых (например, растворимости, стабильности пены или эмульсии).

Несмотря на то, что основной метод исследования структуры белка — рентгеноструктурный анализ его кристаллов, известен достаточно давно, данные пространственной организации белков большинства используемых в питании белков до сих пор не изучены. На основе калориметрии и иных методов измерения термодинамических свойств возможно определять такие параметры, как: теплоемкость для нативной и денатурированной форм белка, энтальпию и температуру денатурации белка, интегральную гидрофобность и конформационную стабильность белков [22–24]. В зависимости от последовательности аминокислотных остатков в полипептидной цепи формируется определенная стабильная трехмерная структура белка, определяющая его структурные и функциональные свойства. Именно структура белков и соотношение их молекулярных масс, играют важную роль при получении и проведении сравнительных исследований таких параметров, как термодинамические и функционально-технологические характеристики белковых продуктов. Анализ и систематизация методов исследования и измерения термодинамических свойств белковых продуктов (методы дифференциальной сканирующей калориметрии, КД — спектроскопии, ионопарной высокоэффективной жидкостной хроматографии, компьютерный метод «молекулярной динамики» и др.), не являлся целью данного обзора. Эти методы несомненно определяют перспективы технологического использования БСППБС, поскольку применяются в т.ч для моделирования и прогнозирования их термостабильности, но они образуют свою группу методов, использующих особое инструментальное обеспечение, и направлены скорее на обоснование внесения точечных или кластерных замен в аминокислотную последовательность для повышения или снижения температурного оптимума исследуемого белка или пептида, чем на обоснование целевого применения продукта [22,25].

3.3. Особенности определения функционально-технологических свойств

Следующая группа определяемых параметров, встречающаяся в большинстве исследований данной тематики — показатели ФТС. Важно отметить, что в большинстве англоязычных работ понятия функциональных и функционально — технологических свойств не разделяются и, по сути, являются синонимами. В отечественных исследованиях под функциональными свойствами чаще понимают способность пищевых веществ оказывать физиологическое воздействие на организм человека. В нашей работе под функционально-технологическими свойствами БСППБС понимаются свойства, определяющие их использование в пищевом производстве и обеспечивающие определенные структурные, реологические, технологические и потребительские свойства получаемых на их основе продуктов [12,20]. ФТС базируются на основе механизмов, определяющих их действие, включая «свойства, связанные с гидратацией (растворимость, водо- и жироудерживающая способность), молекулярной структурой белка, степенью денатурации и реологическими характеристиками (гелеобразование и вязкость), а также поверхностными характеристиками (пенообразование, эмульгирующие свойства) [26].

Данные системного анализа особенностей определения ФТС белоксодержащих продуктов переработки бобовых культур, используемые в исследованиях показатели и методических подходов к их определению представлены в Таблице 1.

Ещё одной из активно изучаемых тем, имеющих высокую популярностью среди производителей, является применение растительных белков в экструдированных продуктах [59]. С точки зрения потребителей, спрос на продукты и ингредиенты растительного происхождения обусловлен их использованием для формирования структуры конечного продукта (имитация волокон или пористой массы) и возможностью создания альтернатив неживотного происхождения во многих группах пищевых продуктов, в т. ч. для замены мяса, яиц и молочных продуктов [60]. Для выбора и адаптации состава сырья к требованиям производства получаемого в результате экструзии пищевого продукта, необходима информация о конкретных реологических характеристиках и их изменении от температурно-влажностных параметров и давления. В исследованиях демонстрируются существенные различия в реологических свойствах конечного продукта, даже если наименование и происхождение семян бобовых, и общее содержание белка в них идентичны. В отношении гидролизатов, концентратов и изолятов, полученных на основе семян бобовых, необходимо обеспечить измерение и анализ свойств, характерных для вязкоупругих продуктов: прочность, эластичность, упругость, вязкость, ползучесть, пластичность, гелеобразующая способность, тиксотропия, максимальное напряжение сдвига. Комбинация групп методов для конкретного сырья дает обширную и ценную информацию о реологическом поведении исследуемых образцов. Однако, изучение реологических характеристик осуществляется уже не столько на уровне отдельных БСППБС, сколько на уровне пищевых матриц с добавлением этого ингредиента. В связи с этим методики определения отдельных показателей качества опираются на стандартизированные подходы соответствующей продовольственной группы (например, фарши, соусы, тесто и пр.).

При определении качества у получаемых на основе БСППБС суспензий определяют такие специфические показатели, как: степень набухания частиц, содержание растворённого белка, адгезионные и когезионные свойства частиц, их средние размеры и распределение по размерам, буферная емкость суспензий. При использовании БСППБС в пищевых матрицах в качестве структурообразователей, необходима комплексная оценка таких ФТС, как: растворимость в водных средах, возможность образовывать суспензии и гели, стабилизировать эмульсии и пены, проявлять адгезионные свойства и др.

Таблица 1. **Систематизация методик определения ФТС белоксодержащих продуктов переработки бобового сырья (БППБС)**

Table 1. **Systematization of methods for determination of the functional-technological properties (FTP) of protein-containing products of processing legume raw materials (PCPPLRM)**

Показатели измерения / Measurement Indicators	Характеристика методик оценки ФТС, используемых в исследованиях / The essence of FTP assessment methods used in research	Унифицированная методика определения / Unified methodology for determination
Растворимость (Р) — свойство, используемое для измерения степени растворения одного соединения в другом или «соотношение белка, присутствующего в жидкой фазе, к белку, присутствующему как в жидкой, так и в твердой фазах в условиях термодинамического равновесия» [27]		
«Коэффициент (индекс) растворимого азота (КРА) — определяют количество азота (в % от общего содержания). Коэффициент (индекс) диспергируемого белка (КДБ) количество белка (в % от общего содержания, перешедшего в раствор при контролируемых условиях растворения КРА и КДБ формируют профили растворимости белка» [30,31].	Для определения Р к навеске заданной массы приливают определенный объем воды в колбу (мл), которую встряхивают в течении заданного периода времени (мин) на механическом встряхивателе /мешалке при указанных параметрах температуры (°С). Полученную суспензию центрифугируют при контроле параметров (время (мин), число оборотов (об/мин)) и сливают в мерный объем. Осадок еще дважды экстрагируют водой. В полученном супернатанте определяют общее количество белка одним из традиционных способов [28,29]. Используемые методики предусматривают измерение растворимости в воде гравиметрически при естественном pH (без корректировки) или изменённом pH. Порошковые дисперсии подвергаются гидрообработке с заданными параметрами температуры и времени, с последующим охлаждением [25]. После этого измеряют pH и центрифугируют дисперсии с контролем скорости и времени, по окончании чего, супернатанты отбрасывают и ещё трижды промывают осадки, затем центрифугируют и длительно сушат в термостате. И в этом случае рассчитывают по массе высушенного осадка и её отношению к исходному порошку в пересчете на сухую массу.	На аналитических весах берут навеску 2,4 г, приливают воду, чтобы получить 6% раствор. Взвесь аккуратно перемешивают до однородности и затем периодически помешивают в течение 15 мин. При определении растворимости при комнатной температуре не проводят дополнительного нагревания. При определении растворимости в горячей воде процесс проводят на водяной бане при температуре 85 °С и далее охлаждают до комнатной температуры. Для отделения осадка проводят центрифугирование (в течении 15 минут; при 5500 об/мин). Осадок промывается трижды водой с повторным центрифугированием. Супернатанты собираются, доводятся до 100 мл водой, проводится измерение pH. Супернатант и осадок сушатся при температуре 105 °С до постоянной массы. Растворимость рассчитывается как отношение массы растворенных веществ к исходной массе абсолютно сухой навески.
Водоудерживающая способность (ВУС) –это способность удерживать в своем составе воду при контакте с ней. Связывание воды происходит посредством комбинации ион-дипольных, диполь-дипольных, диполь-индуцированных дипольных и гидрофобных взаимодействий		
Величина ВУС определяет максимальное количество добавленной воды в пересчете на 1 г белка /белоксодержащего продукта, при котором не наблюдалось отделения водной фазы в процессе испытания (может быть либо центрифугирование, либо контакт с впитывающим влагу основанием).	Основным методом, используемым для оценки ВУС является центрифугирование. Связанная, удерживаемая или иммобилизованная вода захватывается белковым матриксом, а затем вытесняется силой центрифугирования или сжатия. Навеску образца помещают в мерную пробирку, добавляют заданный объем воды (мл) и перемешивают в гомогенизаторе в течение заданного времени (мин) и скорости (об/мин). После выдержки (Т, мин.) пробирки центрифугируют ((время (мин), число оборотов (об/мин) [12,32–37]. Для определения весовым методом пробирку взвешивают с белоксодержащим продуктом и водой. После удаления несвязанной воды центрифугированием взвешивают остаток в пробирке. Для определения ВУС объемным методом (%) измеряют общий объем смеси в пробирке и объем оставшейся воды.	В пробирки берут по 1 г образца и добавляют 10 г воды, аккуратно помешивают в течение 30 мин., взвесь центрифугируют (15 минут; 5500 об/мин). Супернатант аккуратно сливают, садок взвешивают. Для расчета водоудерживающей способности используют формулу: $$ВУС = 100\,\% \times (m_n - m_0)/m_n,$$ где: m_0 — масса навески сухого вещества в начале; m_n — масса навески осадка после отделения супернатанта, г.
Жироудерживающая способность (ЖУС) –это способность белков продуктов переработки бобовых удерживать масло при контакте с ним. Жир/масло удерживаются за счет физического захвата жира из-за гидрофобности белка, посредством связывания алифатических липидных цепей с неполярными боковыми цепями аминокислот. В целом белки более высокой гидрофобности имеют тенденцию сильнее удерживать масла.		
Величина ЖУС определяет максимальное количество масла, которое может быть поглощено на 1 г белка /белоксодержащего продукта, при котором не наблюдалось отделения водной фазы в процессе испытания (может быть либо центрифугирование, либо контакт с впитывающим влагу основанием).	Основным методом оценки ЖУС является центрифугирование. Навеску высокобелкового продукта помещают в мерную пробирку, добавляют заданный объем рафинированного подсолнечного масла (мл) установленной плотности (г/см^3) и перемешивают в гомогенизаторе (время (мин), число оборотов (об/мин)). После экспозиции (мин.) пробирки центрифугируют (время (мин), число оборотов (об/мин)). Для определения ЖУС весовым методом (г/г) пробирку взвешивают с белоксодержащим продуктом и маслом и затем удаляют неадсорбированное масло центрифугированием, взвешивая оставшееся в пробирке содержимое. При определении ЖУС объемным методом (%) соотносят общий объем смеси в пробирке и объем оставшегося неадсорбированного масла (мл).	Для ЖУС методика аналогична ВУС, но вместо воды используется растительное масло (1 г навески и 10 мл масла растительного). Далее центрифугируют (15 минут; 5500 об/мин). Надосадочную жидкость тщательно сливают, а оставшийся осадок взвешивается. Расчет ЖУС: $$100\,\% \times (m_n - m_0)/m_n,$$ где: m_0 — масса навески сухого вещества в начале; m_n — масса навески осадка после отделения супернатанта, г.
Такие ФТС белоксодержащих продуктов переработки бобовых культур, как ВУС, ЖУС и влагосвязывающая способность зачастую оценивают не в чистом виде, а на основании проведения анализа пищевых матриц в которую их помещают. Для фаршей, фаршевых систем, мясных полуфабрикатов, колбасных изделий, колбасок и паштетов с введёнными в состав белковыми растительными ингредиентами используют следующие методы: определение «влагосвязывающей способности проводят методом прессования, влагоудерживающей способности — с помощью молочного жиромера, жироудерживающей способности — методом определения массовой доли жира в разрабатываемом продукте до и после термообработки» [38–43].		
Эмульгирующая способность (ЭС) — это свойство соединения образовывать эмульсии, состоящие из двух жидкостей с различной растворимостью [44]. ЭС- характеризует состояние агрегативной устойчивости масла в воде, определяемого за счет способности содержащегося белка и ПАВ формировать на поверхности дисперсных частиц прочный адсорбционного слой, выполняющего функцию структурно-механического барьера, препятствующего коалесценции капель масла.		

Показатели измерения / Measurement Indicators	Характеристика методик оценки ФТС, используемых в исследованиях / The essence of FTP assessment methods used in research	Унифицированная методика определения / Unified methodology for determination
Эмульгирующие свойства белка оценивают и характеризуют различными величинами, такими как «индекс эмульгирующей активности (EAI) индекс эмульгирующей стабильности (ESI) эмульгирующая/ эмульсионная способность, характеристическая эмульсионная активность, предел эмульгирования». Эмульсионная ёмкость белка характеризует «максимальное количество эмульгированного масла к количеству белка/белоксодержащего продукта в системе» [45].	Для определения ЭС используют различные методы, включая турбидиметрию, измерение размера капель и проводимость. Для определения ЭС навеска исследуемого препарата, перемешанная с водой и маслом в равных объемах в центрифужной пробирке, подвергается гомогенизированию/встряхиванию при контроле скорости, времени и pH. Затем содержимое пробирки центрифугируют при заданных параметрах скорости и времени. ЭС характеризуется процентным соотношением объемов, отделившихся от эмульсии водной и масляной фаз [12,46,47]. Метод определения стабильности полученной эмульсии предполагает её нагрев с последующим охлаждением водой при контроле температуры времени. По доле объема эмульгированного слоя, полученного в ходе центрифугирования, судят о стабильности эмульсии. Этот метод определения ЭС может быть реализован с условием нагревания, замораживания, продолжительного хранения эмульсии с последующим центрифугированием в стандартных условиях. Отношение объёма эмульсии к общему объёму системы после целевого воздействия позволяет оценивать стабильность эмульсии. Эмульсионная ёмкость предполагает методику, опирающуюся на измерение электропроводности дисперсной системы, в которой эмульсию готовят в режиме непрерывного добавления масла в раствор белка/белоксодержащего продукта при перемешивании вплоть до точки инверсии фаз эмульсии, отвечающей переходу от эмульсии «масло в воде» к эмульсии «вода в масле. Метод оценки эффективности белоксодержащего продукта, как стабилизатора эмульсии предполагает цепочку испытаний с изменением объёмной доли масла, температуры и времени воздействия. По объему отделяемых центрифугированием слоёв масла в водной фазе и фазе эмульсий делают выводы об эффективности. Агрегативная стабильность оценивается на основании отношения объёма (высоты) слоя масла, отделившегося после испытания эмульсии, к общему объёму. Показатель кинетической стабильности определяется отношением объёма (высоты) слоя водной фазы к объему (высоте) слоя эмульсии.	Для проведения исследования подготавливается раствор, который состоит из 3 г образца, 175 мл масла и 175 мл воды. Раствор взбивается при комнатной температуре в пробирке с помощью гомогенизатора (1 мин, 22000 об/мин). Из получившейся эмульсии быстро отбираются пробы по 20 мл. Для определения эмульгирующей активности (ЭА) при комнатной температуре пробы центрифугируют (5 мин, 5500 об/мин). Для определения эмульгирующей стабильности (ЭСт) при высокой температуре, пробы нагреваются на водной бане в течение 30 минут при 80 °C без перемешивания, остужаются 15 минут в проточной воде до комнатной температуры и центрифугируются (5 мин., 5500 об/сек). После центрифугирования образец акуратно перемешивается стеклянной палочкой для выравнивания границы разделения. Эмульсионная активность определяется как отношение объема эмульсии к полному объему. Далее рассчитывается ЭА (EAI) и Эст (ESI) по следующим формулам: $ЭА = 100\,\% \times V_1 / V_2,$ $ЭСт = 100\,\% \times V_t / V_2,$ где: $V1$ — объем эмульсии (верхнего слоя); $V2$ –полный объем; V_t — объем эмульсии после термической обработки.
Пенообразующая способность/свойство (ПС) — это способность продукта формировать стабильную пену описания. ПС — это количество межфазной поверхности, образованной белком [48]. Пена — это «масса, в «которой дисперсионной средой является жидкость, а дисперсной фазой — газ, причём количество дисперсной фазы велико, и пузырьки газа отделены друг от друга тонкими плёнками жидкости» [31]. Стабильная пена на белковой основе имеет когезивные межфазные пленки за счет водородных связей, а также электростатических и гидрофобных реакций [27].		
ПС характеризуют показатели, оценивающие характеристики образуемой пенной системы: • стабильность пены (FS) способность белка стабилизировать пену против стрессов [49], • пеноемкость (FC) — способность раствора (вспениваемость, пенообразовательная ёмкость) — количество пены (объем) или высота столба (в мм), получаемая на 1 г белка/белоксодержащего продукта, также выражают как процентное отношение изменения объема к первоначальному; • кратнабильность (устойчивость) пены — время, при котором пена не теряет своего вида (сохраняется общий объём, в т. ч. при разных температурных условиях (от замораживания до нагревания при высоких температурах)); • степень насыщения продукта воздухом характеризуется показателем удельного объёма воздушной фазы.	ПС в исследованиях обозначают множеством терминов (пенообразующая и эмульгирующая способность, взбиваемость, аэрируемость и т. п.) и оценивают различными методами. Чаще всего для оценки ПС измеряют высоту столба пены. Для этого в колбы помещают навеску исследуемого образца и добавляют воду. Полученный раствор взбивают и далее переливали его и измеряют в мерном цилиндре высоту столба пены [49]. Пены готовят путем диспергирования навески продукта в указанном объеме дистиллированной воды. Образцы вспенивают при комнатной температуре в градуированной центрифужной пробирке объемом с использованием гомогенизатора, оснащенного зондом, с контролем параметров скорости и времени.	Образец готовятся путем диспергирования 3,5 г образцов в 350 мл дистиллированной воды помощью гомогенизатора (1 мин, 22000 об/мин) при комнатной температуре. Так как граница вода/пена достаточно размытая, невозможно определить точное ее расположение. Поэтому измеряется полный объем раствора с пеной. Далее пена отстаивается 1 час, измеряется полный объем раствора с оставшейся пеной. Пенообразующая способность определяется по формуле: $ПС = 100\,\% \times (V_1 - V_0) / V_0$ Стабильность пены по формуле: $СП = 100\,\% \times (V_2 - V_0) / (V_1 - V_0);$ где: V_0 — исходный объем воды; V_1 — объем воды и пены после гомогенизации; V_2 — объем пены и воды после отстаивания.
Гелеобразующая/желеобразующая способность /свойство (ГС(ЖС)) — представляет собой способность продукта создавать дисперсную систему, состоящую как минимум из двух компонентов, в которой диспергирующий агент может образовывать когезионную сетку. Гелеобразование белоксодержащих продуктов — это процесс, при котором «молекулы белка, погруженные в водный растворитель, образуют трехмерную сеть молекулярных структур» [51]. Следует отметить, что в части исследований изучается гелеобразующая способность (Gelling ability), а в части встречается термин — желеобразующаяю способность (Jelly-forming ability) и в этих случаях рассматриваются варианты изучения характеристик получаемого твердого геля		
Метод оценки ГС основан на определении наименьшей концентрации гелеобразования — такой концентрации белка, при которой раствор белка образует гель, который не отделяется из пробирки после ее переворачивания [52].	Критическая концентрация гелеобразования определяется методом термотропного гелеобразования[1] [53]. Методика определения критической концентрации гелеобразования, заключается в приготовлении серии растворов различных концентраций, с оценкой прочности образовавшегося геля, путем определения концентрации гелеоразователя, препятствующей погружению в него (гель) металлического шарика определенной масс [54].	Находится в разработке

[1] МУК 2.3.2.970-00. Медико-биологическая оценка пищевой продукции, полученной из генетически модифицированных источников (2000). Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Электронный ресурс: https://docs.cntd.ru/document/1200006955?ysclid=m5owpm25e5325120714 Дата доступа: 05.12.2024

Таблица 1. Окончание / Table 1. End

Показатели измерения / Measurement Indicators	Характеристика методик оценки ФТС, используемых в исследованиях / The essence of FTP assessment methods used in research	Унифицированная методика определения / Unified methodology for determination
Критическая концентрация гелеобразования (ККГ) — один из основных критериев оценки белокодержащего продукта, обеспечивающих возможность образование устойчивого геля при минимальной концентрации гелеобразователя. ККГ определяет уровень введения в продукт белковых препаратов, обеспечивающий требуемый комплекс структурно-механических характеристик готового продукта.	Концентрация гелеобразования не позволяет оценить свойства самих образующихся гелей, например твердость или хрупкость. Поэтому используются дополнительные методы измерения количественной оценки текстурных свойств гелей: испытание на сжатие фиксируют соотношения напряжения и деформации, когда образец сжимается/разжимается с фиксированной скоростью [55], анализ профиля текстуры позволяет измерить твердость, клейкость, упругость, когезионность, липкость и эластичность гелей [56], исследование термической обратимости полученного геля [58]. Поэтому достаточно часто при оценке ГС, оценивают реологические свойства, получаемого геля. Определение динамических реологических показателей — модуля упругой деформации (сохранения (G')) и модуля сопротивления деформации (потерь (G»)) производят на реологрфах [58]. Реологические анализы и поведение гелеобразования изучают с помощью реометра. Вязкость измеряют с помощью вискозиметра: прямой индикации или Марша. Для желе, как частного варианта твердого геля, определяют концентрацию желеобразования и температуру желатинизации. Температуру желатинизации определяют путем натревания в пробирке с завинчивающейся крышкой навески продукта и воды в заданном соотношении до образования твердого геля — желе. Наименьшей концентрацией желеобразования принимают концентрацию, при которой из перевернутой пробирки образец не выскальзывает. Желе подвергают дальнейшим исследованиям с помощью тестов на прокалывание, складывание, скорость распада желе, реологические анализы.	

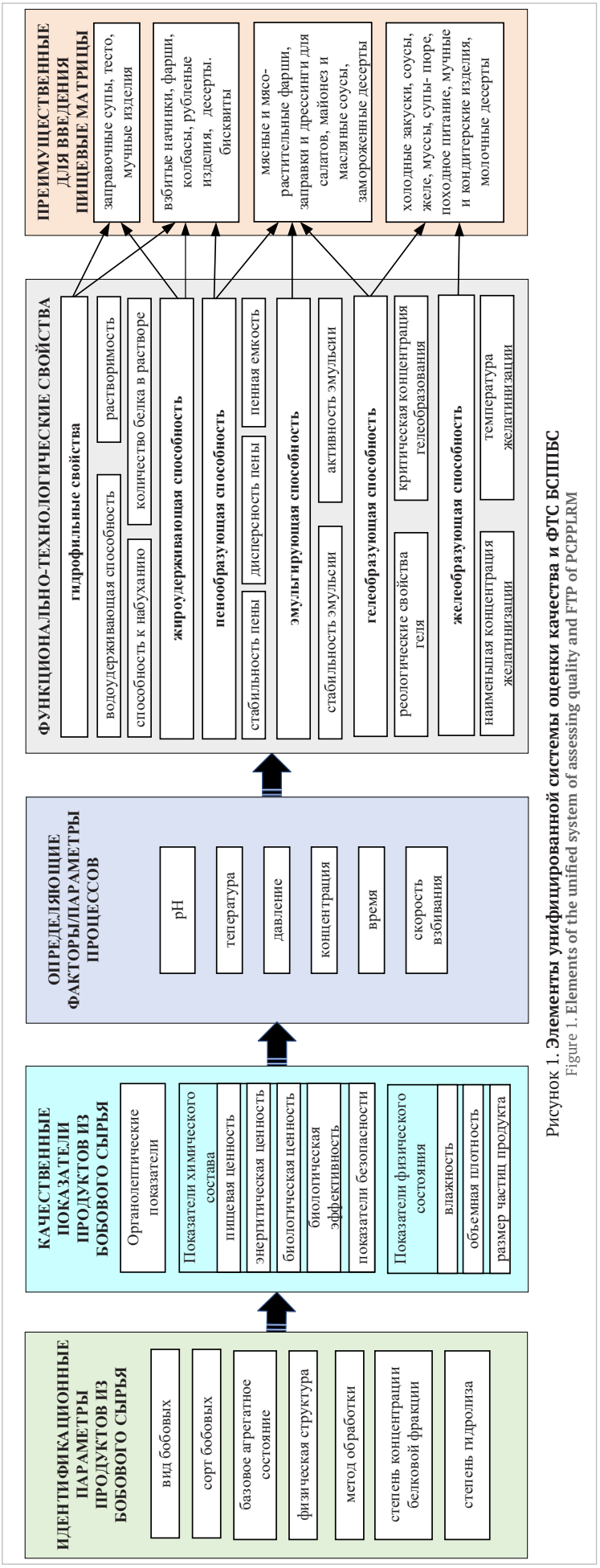


Рисунок 1. **Элементы унифицированной системы оценки качества и ФТС БСППБС**
Figure 1. **Elements of the unified system of assessing quality and FTP of PCPPLRM**

Обобщение аналитических практик позволяет систематизировать методы оценки показателей ФТС, используемые в разрозненных исследованиях, с разными значениями гидромодуля, применяемых скоростей центрифугирования или взбивания, температурных и временных диапазонов, используемых при проведении исследований отдельных свойств (например, растворимость, стабильность пены или эмульсии), pH среды (в исследованиях ГС). Кроме того, все указанные ФТС связаны с распределением молекулярных масс белков в образцах БСППБС, но эта информация пока не может быть подвергнута системному анализу на основе математической обработки, поскольку унифицированные методы оценки этих показателей отсутствуют.

3.4. Унификация оценки качества и ФТС БСППБС

Вторая задача исследования предусматривала теоретически обосновать набор показателей и контролируемых параметров осуществления их измерения для создания унифицированной системы оценки качества и ФТС БСППБС. Помимо выделения самих показателей особое внимание было уделено особенностям реализации методик определения ФТС, поскольку, например, значения pH или температуры при осуществлении оценки могут не только существенно изменить получаемые значения, но и исказить в целом выявляемые для дальнейшего технологического использования того или иного вида продукта БСППБС.

Предлагаемая нами унифицированная система оценки качественных показателей и ФТС БСППБС в перспективе будет обобщена в комплекс методических указаний оговаривающих порядок исполнения идентификационных процедур, реализацию существующих методов оценки химического состава, физических и органолептических показателей и разработанных собственных методов оценки ФТС (Таблица 1), опирающихся на нормирование значений определяющих факторов (ввиду отсутствия общепринятого или нормируемого варианта оценки). Графически логическая рамка связи элементов такой унифицированной системы представлена на Рисунке 1. Идентификационные и качественные показатели БСППБС, выделенные на основе проанализированных источников (первые 2 блока рис. 1) не имели существенных разногласий в вопросе методик определения, поскольку опираются на устоявшиеся стандартизированные подходы.

Логическая рамка отображает связь между входными идентификационными параметрами продуктов переработки бобовых, их показателями качества и безопасности и показателями проявления целевых ФТС. В отношении качественных характеристик БСППБС: идентификационных параметров, показателей химического состава, физического состояния и органолептических, можно отметить, что они определяются в соответствии с медико-биологическими требованиями, санитарными нормами и требованиями технических регламентов к качеству продовольственного сырья и пищевых продуктов на основе установленных в этой нормативной базе методов анализа. Показатели ФТС БСППБС (блок 4 Рисунок 1) будут определяться на основании разработанной собственной группы методик оценки ФТС, являющейся результатом ранее проведенной систематизации (таб.1). Результаты проходящей апробации, разработанной авторами группы методик на различных БСППБС, будут представлены в последующих публикациях.

Унифицированная система оценки качественных показателей и ФТС БСППБС позволит на основе статистической обработки групп полученных значений выявить взаимосвязи между отдельными показателями, а также построить на основе их корреляции специфические «градуировочные графики», обобщающие найденные функциональные зависимости между определяемыми величинами. Логическая рамка позволяет прогнозировать, например, наличие связей при взаимодействии целевого изучаемого продукта с водной и жировой фракциями при управляемом воздействии параметров технологического процесса. Выявленные в ходе проводимых исследований подобного рода связи, в дальнейшем при накоплении достаточного количества эмпирических данных, позволят на основе построения математических моделей определять диапазоны параметров и режимов осуществления технологических операций при наличии конкурирующих задач:, например, подобрать оптимальную температуру гелеобразования для конкретного БППБС, позволяющую не только достигнуть желаемых реологических свойств, но и обеспечить сохранность витаминов.

Наличие базы данных сопоставимых качественных показателей и свойств БСППБС (полученных на основе унифицированной системы оценки), а также силы выявленных связей между этими данными, в свою очередь, позволят определить потенциал использования конкретного БСППБС в изучаемых пищевых матрицах. Для разрабатываемых пищевых продуктов на основе БСППБС значения показателей их ФТС будут определяющими при достижении задач обеспечения функциональности, соответствия назначению, структурных, текстурных, вкусовых и иных свойств.

4. Заключение

При изучении объектов, в отношении которых возможно распространить унифицированные подходы к оценке качества и ФТС БСППБС можно выделить:

- муку из бобовых, гидролизат муки,
- обезжиренную муку, гидролизат обезжиренной муки,
- белковые концентраты (разной степени содержания белка и концентраты, полученные в результате разных методов фракционирования),
- изоляты белка бобовых культур,
- гидролизаты концентратов и изолятов,
- экструдаты,
- сублимированная аквафаба.

Также сформулированные методики оценки качества и ФТС применимы для ряда продуктов более глубокой переработки, направленной на получение определенных фракций белка с заданной молекулярной массой и определенными ФТС.

В отношении БСППБС нами выделены группа идентификационных параметров и группа качественных показателей, объединяющая органолептические и физико- химические показатели. В отношении ФТС, требующих унификации и определения точных параметров условий реализации методик оценки выделены:

- гидрофильные свойства, включая растворимость, способность к набуханию, переходу в раствор белков и водоудерживающую способность;
- эмульгирующие, пенообразующие, геле/желеобразующие свойства;
- жироудерживающая способность.

При дальнейшей реализации группы методик унифицированной системы оценки ФТС БСППБС будут использоваться конкретные значения определяющих факторов, полученные на основе систематизации литературных источников: температура, давление, pH, время и скорость взбивания и центрифугирования. ФТС отдельных БСППБС также могут быть изучены для разных диапазонов таких определяющих факторов, как температура, pH и гидромодуль с учётом необходимости соблюдения условий при отборе лучших перспектив для введения в конкретную пищевую матрицу.

Оценка опыта включения бобовых в новые продукты, показывает, что органолептические свойства и ФТС БСППБС являются основой универсальности их применения в питании, а систематизация и унификация данных о показателях ФТС БСППБС и продуктов, получаемых на их основе, позволит этой информации значительно облегчить процессы проектирования новых видов продукции на основе растительного белка, расширить разрабатываемый ассортимент, повысить уровень значимых для потребителя качественных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Goncharova, N. A., Merzlyakova, N. V. (2022). Food shortages and hunger as a global problem. *Food Science and Technology*, 42, Article e70621. https://doi.org/10.1590/fst.70621
2. Safdar, L. B., Foulkes, M. J., Kleiner, F. H., Searle, I. R., Bhosale, R. A., Fisk, I. D. et al. (2023). Challenges facing sustainable protein production: Opportunities for cereals. *Plant Commun*, 4(6), Article 100716. https://doi.org/10.1016/j.xplc.2023.100716
3. Kiani, A. K., Dhuli, K., Donato, K., Aquilanti, B., Velluti, V., Matera, G. et al. (2022). Main nutritional deficiencies. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, 63(2 Suppl 3), E93-E101. https://doi.org/10.15167/2421-4248/jpmh2022.63.2S3.2752
4. Singh, N. (2022). Proteins isolates and hydrolysates: Structure-function relation, production, bioactivities and applications for traditional and modern high nutritional value-added food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 5567–6254. https://doi.org/10.1111/ijfs.15565
5. Науменко, Н. В., Фаткуллин, Р. И., Калинина, И. В., Попова, Н. В., Радкевич, А. В. (2023). Возможности получения сырьевых ингредиентов растительного происхождения повышенной биодоступности. *Индустрия питания*, 8(4), 58–67. [Naumenko, N. V., Fatkullin, R. I., Kalinina, I. V., Popova, N. V., Radkevich, A. V. (2023). Production possibility of raw ingredients of plant origin with increased bioavailability. *Food Industry*, 8(4), 58–67. (In Russian)] https://doi.org/10.29141/2500-1922-2023-8-4-6

6. Yazici, G. N., Taspinar, T., Binokay, H., Dagsuyu, C., Kokangul, A., Ozer, M. S. (2023). Investigating the potential of using aquafaba in eggless gluten-free cake production by multicriteria decision-making approach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(6), 5759–5776. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02077-2
7. Kiliçli, M., Özmen, D., Bayram, M., Toker, O. S. (2023). Usage of green pea aquafaba modified with ultrasound in production of whipped cream. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, Article 100724. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100724
8. Azman, A. T., Mohd Isa, N. S., Mohd Zin, Z., Abdullah, M. A. A., Aidat, O., Zainol, M. K. (2023). Protein hydrolysate from underutilized legumes: Unleashing the potential for future functional foods. *Preventive Nutrition and Food Science,* 28(3), 209–223. https://doi.org/10.3746/pnf.2023.28.3.209
9. Рождественская, Л.Н., Чугунова, О.В. (2023). Технические решения для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 11(4), 6–18. [Rozhdestvenskaya, L.N., Chugunova, O.V. (2023). Technical solutions for the efficient use of food resources in food system technology. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 11(4), 6–18. (In Russian)] https://doi.org/10.14529/food230401
10. Клименко, А. А., Барсукова, Н. В. (28–30 ноября 2022). *Исследование пенообразующих свойств аквафабы*. Материалы I Международного конгресса «Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения и здоровьесберегающих технологий». Кемерово: КГУ, 2022. [Klimenko, A. A., Barsukova, N. V. (November 28–30, 2022). Study of the foaming properties of aquafaba. The Latest Achievements of Medicine, Healthcare, and Health-Saving Technologies: Proceedings of the 1st International Congress. Kemerovo: KSU, 2022. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/-I-IC-52
11. Вебер, А. Л., Леонова, С. А., Давлетов, Ф. А. (2019). Фитохимический потенциал и ингибиторная активность новых сортов зернобобовых культур. *Техника и технология пищевых производств*, 2, 281–288. [Veber, A. L., Leonova, S. A., Davletov, F. A. (2019). Phytochemical potential and inhibitory properties of new varieties of leguminous plants. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2, 281–288. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-281-288
12. Красноштанова, А. А., Шульц, Л. В. (2022). Получение и оценка функциональных свойств белковых изолятов и гидролизатов из растительного сырья. *Химия растительного сырья*, 4, 299–309. [Krasnoshtanova, A. A., Schultz, L. V. (2022). Preparation and evaluation of functional properties of protein isolates and hydrolysates from plant raw materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja,* 4, 299–309. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20220410952
13. Adhikari, S., Schop, M., de Boer, I. J. M., Huppertz, T. (2022). Protein quality in perspective: A review of protein quality metrics and their applications. *Nutrients*, 14(5), Article 947. https://doi.org/10.3390/nu14050947
14. Neji, C., Semwal, J., Kamani, M. H., Máthé, E., Sipos, P. (2022). Legume protein extracts: The relevance of physical processing in the context of structural, techno-functional and nutritional aspects of food development. *Processes*, 10(12), Article 2586. https://doi.org/10.3390/pr10122586
15. Shanthakumar, P., Klepacka, J., Bains, A., Chawla, P., Dhull, S. B., Najda, A. (2022). The current situation of pea protein and its application in the food industry. *Molecules*, 27(16), Article 5354. https://doi.org/10.3390/molecules27165354
16. Wood, R. (1999). How to validate analytical methods. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 18(9–10), 624–632. https://doi.org/10.1016/S0165-9936(99)00150-8
17. Boye, J., Zare, F., Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414–431. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003
18. Narpinder, S. (2022). Proteins isolates and hydrolysates: Structure-function relation, production, bioactivities and applications for traditional and modern high nutritional value-added food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 5567–5570. https://doi.org/10.1111/ijfs.15565
19. Schmidt, H. de O., Oliveira, V. R. de. (2023). Overview of the Incorporation of legumes into new food options: An approach on versatility, nutritional, technological, and sensory quality. *Foods*, 12(13), Article 2586. https://doi.org/10.3390/foods12132586
20. Klupsaite, D., Gražina, J. (2015). Legume: Composition, protein extraction and functional properties. A review. *Chemical Technology*, 66(1), 5-12. https://doi.org/10.5755/j01.ct.66.1.12355
21. Adhikari, S., Schop, M., de Boer, I. J. M., Huppertz, T. (2022). Protein quality in perspective: A review of protein quality metrics and their applications. *Nutrients*, 14(5), Article 947. https://doi.org/10.3390/nu14050947
22. Гришин, Д. В., Покровская, М. В., Подобед, О. В., Гладилина, Ю. А., Покровский, В. С., Александрова, С. С. и др. (2017). Прогнозирование термостабильности белков по их первичной структуре: современное состояние и факторы развития. *Биомедицинская химия*, 63(2), 124–131. [Grishin, D. V., Pokrovskaya, M. V., Podobed, O. V., Gladilina, Ju. A., Pokrovsky, V. S., Aleksandrova, S. S. et al. (2017). Prediction of protein thermostability from their primary structure: The current state and development factors. *Biomeditsinskaya Khimiya*, 63(2), 124–131. (In Russian)] https://doi.org/10.18097/PBMC20176302124
23. Grinberg, V. Y., Danilenko, A. N., Burova, T. V., Tolstoguzov, V. B. (1989). Conformation stability 11 S Globulins from seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 49(2), 253–248. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740490212
24. Danilenko, A.N., Dianova, V.T., Braudo, E.E., Henning, T., Mothes, R. Schwenke, K.D. (1998). A novel approach to the evaluation of hydrophobicity of food proteins. *Nahrung*, 42(03–04), 179–182. https://doi.org/10.1002/(SICI)1521–3803(199808)42:03/04<179: AID-FOOD179>3.0.CO;2-B
25. Balabanova, L., Golotin, V., Podvolotskaya, A., Rasskazov, V. (2015). Genetically modified proteins: Functional improvement and chimeragenesis. *Bioengineered*, 6(5), 262–274. https://doi.org/10.1080/21655979.2015.1075674
26. Kiosseoglou, V., Paraskevopoulou, A. (2011). Functional and physicochemical properties of pulse proteins. Chapter in a book: Pulse Foods. Academic Press, 2011. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382018-1.00003-4
27. Lam, A. C. Y., Can Karaca, A., Tyler, R. T., Nickerson, M. T. (2018). Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality. *Food Reviews International,* 34(2), 126–147. https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1242135
28. Колпакова, В. В., Нечаев, А. П. (1995). Растворимость и водосвязывающая способность белковой муки из пшеничных отрубей. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 1–2(224–225), 31–33. [Kolpakova, V. V., Nechaev, A. P. (1995). Solubility and water binding capacity of protein flour from wheat bran. *Izvestiya Vuzov. Food Technology,* 1–2(224–225), 31–33. (In Russian)]
29. Колпакова, В. В., Бызов, В. А. (2024). Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор. *Пищевые системы,* 7(3), 324–335. [Kolpakova, V. V., Byzov, V. A. (2024). Functional characteristics and molecular structural modification of plant proteins. Review. *Food Systems*, 7(3), 324–335. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335
30. Zare, F., Orsat, V., Boye, J. I. (2015). Functional, physical and sensory properties of pulse ingredients incorporated into orange and apple juice beverages. *Journal of Food Research*, 4(5), 143–156. https://doi.org/10.5539/jfr.v4n5p143
31. Soto-Madrid, D., Pérez, N., Gutiérrez-Cutiño, M., Matiacevich, S., Zúñiga, R. (2022). Structural and physicochemical characterization of extracted proteins fractions from chickpea (*Cicer arietinum* L.) as a potential food ingredient to replace ovalbumin in foams and emulsions. *Polymers*, 15, Article 110. https://doi.org/10.3390/polym15010110
32. Chang, L., Lan, Y., Bandillo, N.B., Ohm, J.-B., Chen, B., Rao, J. (2022). Plant proteins from green pea and chickpea: Extraction, fractionation, structural characterization and functional properties. *Food Hydrocolloids*. 123, Article 107165. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107165
33. Гурова, Н.В., Попело, И.А., Сучков, В.В., Ковалев, А.И., Марташов, Д.П. (2001). Методы определения функциональных свойств соевых белковых препаратов. *Мясная индустрия*, 9, 30–32. [Gurova, N. V., Popelo, I. A., Suchkov, V. V., Kovalev, A. I., Martashov, D. P. (2001). Methods for determining the functional properties of soy protein preparations. *Meat Industry*, 9, 30–32. (In Russian)]
34. Евдокимова, О. В., Гриминова, Е. Б., Толкунова, Н. Н., Прянишников, В. В. (2006). Функционально-технологические свойства белковых препаратов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(191–293), 73–74. [Evdokimova, O.V., Griminova, E.B., Tolkunova, N.N., Pryanishnikov, V.V. (2006). Functional-technological properties of protein preparations. *Izvestiya Vuzov. Food Technology,* 2–3(191–293), 73–74. (In Russian)]
35. Корнен, Н. Н., Шахрай, Т. А., Лукьяненко, М. В., Схаляхов, А. А. (2015). Исследование технологических свойств растительных лецитинов. *Новые технологии*, 3, 19–24. [Kornen, N. N., Shakhray, T. A., Lukyanenko, M. V., Skhalyakhov, A. A. (2015). Research of the technological properties of vegetable lecithins. *New Technologies*, 3, 19–24. (In Russian)]
36. Колпакова, В. В., Мартынова, И. В., Невский, А. А., Чумикина, Л. В. (2006). Функциональные свойства растительных белковых композитов и физико-химические характеристики их белков и липидов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4(293), 36–40. [Kolpakova, V. V., Martynova, I. V., Nevsky, A. A., Chumikina, L.V. (2006). Functional properties of plant protein composites and physico-chemical characteristics of their proteins and lipids. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(293), 36–40. (In Russian)]
37. Скурихин, И.М., Тутельян, В.А. (1998). Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. М.: Медицина, 1998. [Skurikhin, I.M., Tutelyan, V.A. (1998). Guidance on methods of analysis of quality and safety of food products. Moscow: Medicine, 1998. (In Russian)]
38. Махотина, И. А., Евдокимова, О. В., Щипанова, А. А., Рудась, П. Г., Фукс, С. Г. (2008). Функционально-технологические свойства муки из зерна бобовых. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(303–304), 42–44. [Makhotina, I.A., Evdokimova, O.V., Shchipanova, A.A., Rudas, P.G., Fuks, S.G. (2008). Functional-technological properties of flour from legume grain. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(303–304), 42–44. (In Russian)]
39. Вайтанис, М. А., Ходырева, З. Р., Быкова, В. А., Жуманова, Г. Т. (2021). Исследование свойств фаршевых систем из мяса курицы и говяжьего языка с растительным сырьем. *Ползуновский вестник*, 4, 27–34. [Vaitanis, M. A., Khodyreva, Z. R., Bykova, V. A., Zhumanova, G. T. (2021). Investigation of the properties of minced systems of chicken meat and beef tongue with vegetable raw materials. *Polzunovskiy Vestnik*, 4, 27–34. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072–8921.2021.04.004
40. Величко, Н. А., Пьянзина, А. А. (2020). Разработка рецептуры и технологии мясного рубленого полуфабриката с растительным компонентом. *Вестник КрасГАУ*, 3(156), 164–170. [Velichko, N. A., Pyanzina, A. A. (2020). The development of the recipe and the technology of chopped meat semi-finished product with vegetable component. *The Bulletin of KrasGAU,* 3(156), 164–170. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819–4036–2020–3–164–170
41. Антипова, Л. В., Мищенко, А. А. (2016). Разработка мясных паштетов повышенной пищевой и биологической ценности с применением пророщенного зерна чечевицы. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 4, 115–120. [Antipova, L. V., Mishchenko, A. A. (2016). Development of meat pates with increased nutritional and biological value using sprouted lentil grain. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4, 115–120. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-115-120
42. Манжесов, В. И., Чурикова, С. Ю., Курчаева, Е. Е. (2011). Перспективы использования бобов фасоли для получения белковых концентратов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 8, 64–65. [Manzhesov, V. I., Churikova, S. Yu., Kurchaeva, Ye. Ye. (2011). Perspective use of the beans for the production of protein concentrates. *Storage and Processing of Farm Products*, 8, 64–65. (In Russian)]
43. Миневич, И. Э., Цыганова, Т. Б., Черных, В. Я. (2020). Характеристика порошков белкового концентрата и полисахаридного экстракта, полученных из льняного сырья методом распылительной сушки. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 46–57. [Minevich, I. E., Tsyganova, T. B., Chernykh, V. Ya. (2020). Characteristics of powders produced from flaxed raw materials using the spray drying method. *Storage and Processing of Farm Products*. 3, 46–57. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2020.334

44. Heredia-Leza, G. L., Martínez, L. M., Chuck-Hernandez, C. (2022). Impact of hydrolysis, acetylation or succinylation on functional properties of plant-based proteins: Patents, regulations, and future trends. *Processes*, 10(2), Article 283. https://doi.org/10.3390/pr10020283
45. Yang, M., Yang, J., Zhang, Y., Zhang, W. (2016). Influence of succinylation on physicochemical property of yak casein micelles. *Food Chemistry,* 190, 836–842. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.030
46. Бердутина, А. В., Громов, А. С. (2009). Методика определения эмульсионных свойств белковых препаратов. *Пищевая промышленность*, 9, 35–37. [Berdutina, A.V., Gromov, A.S. (2009). Method of definition of emulsive properties of albuminous preparations. *Food Industry*, 9, 35–37. (In Russian)]
47. Колпакова, В. В., Волкова, А. Е., Нечаев, А. П. (1995). Эмульгирующие и пенообразующие свойства белковой муки из пшеничных отрубей. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1–2(225–225), 34–37. [Emulsifying and foaming properties of protein flour from wheat bran. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 1–2(224–225), 34–37. (In Russian)]
48. Ge, J., Sun, C., Corke, H., Gul, K., Gan, R., Fang, Y. (2020). The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (Pisum sativum L.) protein: Current status, challenges, and perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 19(4), 1835–1876. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12573
49. Odelli, D., Sarigiannidou, K., Soliani, A., Marie, R., Mohammadifar, M. A., Jessen, F. (2022). Interaction between fish skin gelatin and pea protein at air-water interface after ultrasound treatment. *Foods*, 11(5), Article 659. https://doi.org/10.3390/foods11050659
50. Артемова, Е. Н. (2001). Формирование пенных структур пищевых продуктов, содержащих белки и пектины. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4(263), 20–23. [Artemova, E. N. (2001). Formation of foam structures of food products containing proteins and pectins. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(263), 20–23.] (In Russian)
51. Tomé, A. S., Pires, C., Batista, I., Sousa, I., Raymundo, A. (2015). Protein gels and emulsions from mixtures of Cape hake and pea proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 95(2), 289–298. https://doi.org/10.1002/jsfa.6717
52. Sathe, S. K., Deshpande, S. S., Salunkhe, D. K. (2006). Functional properties of lupin seed (Lupinus mutabilis) proteins and protein concentrates. *Journal of Food Science,* 47(2), 491–497. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb10110.x
53. Рогов, И. А., Антипова, Л. В., Дунченко, Н. И. (2007). Химия пищи. М.: КолосС, 2007. [Rogov, I. A., Antipova, L. V., Dunchenko, N. I. (2007). Food Chemistry. Moscow: KolosS, 2007. (In Russian)]
54. Светлаков, Д. Б. (2004). Методики определения функционально-технологических свойств препаратов каррагинана. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2–3(279–280), 111–112. [Svetlakov, D. B. (2004). Methods for determination of functional-technological properties of carrageenan preparations. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(279–280), 111–112.] (In Russian)
55. Shand, P. J., Ya, H., Pietrasik, Z., Wanasundara, P. K. J. P. D. (2007). Physicochemical and textural properties of heat-induced pea protein isolate gels. *Food Chemistry*, 102(4), 1119–1130. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.060
56. Makri, E. A., Papalamprou, E. M., Doxastakis, G. I. (2006). Textural properties of legume protein isolate and polysaccharide gels. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 86(12), 1855–1862. https://doi.org/10.1002/jsfa.2531
57. Shevkani, K., Singh, N., Kaur, A., Rana, J. C. (2015). Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study. *Food Hydrocolloids,* 43, 679–689. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.024
58. Паулов, Ю. В., Леваньков, С. В. (2008). Особенности формирования белковых гелей при термообработке мяса краба-стригуна опилио. *Известия ТИНРО*, 155, 318–326. [Paulov, Yu. V., Levan`kov, S. V. (2008). Protein gels formation under heat treatment of meat from the snow crab Ch. opilio. *Izvestia TINRO*, 155, 318–326. (In Russian)]
59. Wittek, P., Walther, G., Karbstein, H. P., Emin, M. A. (2021). Comparison of the rheological properties of plant proteins from various sources for extrusion applications. *Foods*, 10(8), Article 1700. https://doi.org/10.3390/foods10081700
60. Bychkova, E., Rozhdestvenskaya, L., Podgorbunskikh, E., Kudachyova, P. (2023). The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials. *Food Bioscience*, 56, Article 103286. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103286

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Рождественская Лада Николаевна — кандидат экономических наук, заведующая кафедрой технологии и организации пищевых производств, Новосибирский государственный технический университет 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20 ведущий научный сотрудник, отдел гигиенических исследований с лабораторией физических факторов, Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 630108, Новосибирск, ул. Пархоменко, 7 Тел.: +7–913–907–36–62 E-mail: lada2006job@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7250-0288	**Lada N Rozhdestvenskaya**, Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Technology and Organization of Food Production, Novosibirsk State Technical University 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia Leading Researcher, Department of Hygienic Research with a Laboratory of Physical Factors, Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being 7, Parkhomenko str., Novosibirsk, 630108, Russia Tel.: +7–913–907–36–62 E-mail: lada2006job@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7250-0288
Ломовский Игорь Олегович — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, лаборатория механохимии, Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18 Тел.: +7–923–249–61–31 E-mail: lomovsky@solid.nsc.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8269-033X	**Igor O. Lomovkiy**, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Mechanochemistry, Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 18, Kutateladze str., Novosibirsk, 630090, Russia Tel.: +7–923–249–61–31 E-mail: lomovsky@solid.nsc.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8269-033X
Чугунова Ольга Викторовна — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга, Уральский государственный экономический университет 620144, Екатеринбург, ул.8 Марта, 62 Тел.: +7–912–243–92–17 E-mail: chugun.ova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7039-4047	**Olga V. Chugunova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Food Technology, Institute of Management, Entrepreneurship and Engineering, Ural State University of Economics 62, 8 Marta str., 620144, Yekaterinburg, Russia Tel.: +7–912–243–92–17 E-mail: chugun.ova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7039-4047

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-244-251

Поступила 25.12.2024
Поступила после рецензирования 23.05.2025
Принята в печать 26.05. 2025
© Каримова Н. Ю., Алексеенко Е. В., Шаненко Е. Ф., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

РАЗРАБОТКА ПОРОШКООБРАЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ДЛЯ БЕЗАЛКОГОЛЬНОГО НАПИТКА НА ОСНОВЕ СУБЛИМИРОВАННОГО СОКА ЧЕРНИКИ

Каримова Н. Ю.*, Алексеенко Е. В., Шаненко Е. Ф.

Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
черника, порошковый напиток, химический состав, хранение, органолептические показатели, физико-химические показатели, микробиологические показатели

АННОТАЦИЯ

Перспективным направлением развития рынка безалкогольных напитков является производство сухих быстро восстанавливаемых смесей, полученных на основе использования порошковых концентрированных форм продуктов переработки плодов и ягод. Такие продукты имеют длительный срок годности, легко транспортируются, хранятся и содержат разнообразный комплекс полезных для здоровья природных компонентов. Целью настоящих исследований явилась разработка рецептуры сухого полуфабриката безалкогольного напитка из лиофилизированного сока ягод черники, полученного путем ферментативной обработки мезги, и определение его свойств. В ходе исследования применялись как традиционные химические методы анализа (титриметрия, гравиметрия), так и современные физико-химические методики (ВЭЖХ, атомно-абсорбционный спектральный анализ, потенциометрия, спектрофотометрия). В результате проведенных исследований разработаны рецептура и технологические решения по получению сухой смеси безалкогольного напитка на основе сублимированного сока черники. Дана характеристика по органолептическим, физико-химическим, микробиологическим показателям и химическому составу. Установлено, что потребление одной порции напитка обеспечивает удовлетворение суточной физиологической потребности в витаминах B5 и C на 78 % и 11,7 % соответственно, микроэлемента меди –на 30 %, минерального антиоксиданта селена — на 12,3–15,6 %, адекватного уровня употребления флавон-3-олов (эпикатехина) — на 22,5 %. Содержание антоцианов в разовой порции напитка не превышает верхний допустимый уровень потребления. Предложены упаковочные решения для сухой смеси напитка — пакетики типа «саше» в ориентации на разовую порцию, обеспечивающие при нормальных условиях хранения (температура (22 ± 5) °C; влажность (40–50)%; атмосферное давление (730–750) мм. рт. ст.) в течение 9 месяцев стабильность органолептических, физико-химических и микробиологических показателей. Показана высокая степень сохранности органических кислот, биоактивных полифенольных соединений, в том числе антоцианов. Наибольшие потери установлены для лабильного витамина C: к концу периода хранения — 32 %. Результаты проведенных исследований убедительно продемонстрировали, что сублимированный сок черники является перспективной технологичной основой для получения сухих полуфабрикатов безалкогольных напитков с богатым набором природных компонентов и ярко выраженным вкусом, и ароматом свежих ягод.

Received 25.12.2024
Accepted in revised 23.05.2025
Accepted for publication 26.05.2025
© Karimova N. Yu., Alekseenko E. V., Shanenko, E.F., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

DEVELOPMENT OF THE POWDERED CONCENTRATE FOR SOFT DRINK BASED ON FREEZE-DRIED BLUEBERRY JUICE

Natalya Yu. Karimova*, Elena V. Alekseenko, Elena F. Shanenko

Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

KEY WORDS:
blueberry, powdered drink, chemical composition, storage, organoleptic indicators, physicochemical indicators, microbiological indicators

ABSTRACT

A promising direction for the development of the soft drinks market is the production of dry quickly reconstituted mixtures derived from the use of powdered concentrated forms of fruit and berry processing products. Such products have a long shelf life, are easily transported, stored and contain a diverse complex of healthy natural components. The aim of the present research was to develop a formulation of dry semi-finished soft drink from lyophilized blueberry juice obtained by enzymatic processing of the pulp, and to determine its properties. During the research, both traditional chemical methods of analysis (titrimetry, gravimetry) and modern physicochemical techniques (HPLC, atomic absorption spectral analysis, potentiometry, spectrophotometry) were used. As a result of the conducted research, the formulation and technological solutions for obtaining a dry mixture of soft drink based on freeze-dried blueberry juice were developed. Characterization by organoleptic, physico-chemical, microbiological indicators and chemical composition is presented. It has been established that consumption of one portion of the drink provides satisfaction of daily physiological requirement in vitamins B5 and C by 78 % and 11.7 % respectively, microelement copper by 30 %, mineral antioxidant selenium by 12.3–15.6 %, adequate level of flavon-3-ols (epicatechin) by 22.5 %. The content of anthocyanins in a single serving of the beverage does not exceed the upper acceptable intake level. Packaging solutions have been proposed for the dry drink mix — packets of the “sachet” type intended for a single serving that ensure stability of organoleptic, physicochemical and microbiological parameters for nine months under normal storage conditions (temperature (22 ± 5) ^{0}C; humidity (40–50)%; atmospheric pressure (730–750) mm Hg). A high degree of preservation of organic acids, bioactive polyphenolic compounds, including anthocyanins, was shown. The greatest losses were found for labile vitamin C: 32 % by the end of the storage period. The results of the research convincingly demonstrated that freeze-dried blueberry juice is a promising technological basis for obtaining dry semi-finished soft drinks with a rich set of natural components and a pronounced taste and aroma of fresh berries.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Каримова, Н. Ю., Алексеенко, Е. В., Шаненко, Е. Ф.** (2025). Разработка порошкообразного концентрата для безалкогольного напитка на основе сублимированного сока черники. *Пищевые системы*, 8(2), 244–251. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-244-251

FOR CITATION: **Karimova, N. Yu., Alekseenko, E. V., Shanenko, E. F.** (2025). Development of the powdered concentrate for soft drink based on freeze-dried blueberry juice. *Food Systems*, 8(2), 244–251. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-244-251

1. Введение

Современные тенденции в индустрии безалкогольных напитков ориентированы на разработку продуктов нового поколения с обогащенным или улучшенным составом, с минимальным количеством добавленного сахара (или без него), содержащих натуральные ингредиенты, способствующие благотворному функционированию организма человека и профилактике развития алиментарно зависимых заболеваний. Весомая роль в этом контексте принадлежит плодово-ягодному сырью и продуктам его переработки (соки, экстракты, порошки и др.) благодаря наличию богатого и разнообразного комплекса полезных для здоровья человека биологически активных и минорных компонентов, а также природных красителей, ароматизаторов, антиоксидантов, что дает возможность конструировать многообразный (ассортиментный) вкусоароматический профиль напитка без применения пищевых добавок, регулировать пищевую ценность, биологическую активность, функциональные свойства и сроки годности напитка. Современные технологии получения плодово-ягодных ингредиентов, методы обработки и консервирования плодово-ягодного сырья, такие как сушка, концентрирование и шоковая заморозка, дают возможность эффективно извлекать и сохранять биологически активные соединения природных ингредиентов. Эти технологии находят применение в создании напитков с целевым физиологическим воздействием. Определенные достижения продемонстрированы на примере применения достаточно большого разнообразия плодов и ягод (шиповник, облепиха, рябина обыкновенная, актинидия коломикта, черная смородина, бузина, брусника, клюква, калина, красная смородина, баэль и др.) в различных технологичных формах (нативные, сушеные, порошки, экстракты, соки, сиропы и др.) Показано, что разработанные композиции обладают адаптогенными свойствами, проявляя антисептическое и тонизирующее действия [1]; обладают выраженными антиоксидантными свойствами [2,3], характеризуются повышенной пищевой ценностью [4,5,6], при этом могут быть использованы современные технологии концентрирования, которые позволяют сохранять не только весь спектр природных достоинств плодов и ягод, но и получать напитки мало отличающиеся от натуральных [7]. Для усиления полезных свойств напитков и формирования потребительских характеристик плодово-ягодные ингредиенты могут применяться в сочетании с пряно-ароматическим сырьем [8] и ингредиентами, имеющими большой нутрицевтический потенциал [9,10,11]. Авторы отмечают оригинальные сенсорные характеристики и функциональную направленность готовых напитков, что позволяет их использовать для улучшения качества и структуры питания различных категорий населения.

Перспективным направлением развития рынка безалкогольных напитков является производство сухих быстровосстанавливаемых порошковых смесей. Стремительное увеличение ритма жизни привело к необходимости разработок в сфере производства полуфабрикатов, которые можно быстро и легко приготовить перед употреблением. Не менее важна и технологическая составляющая: такие продукты имеют длительный срок годности, легко транспортируются и хранятся. Научные исследования, проводимые в этом направлении, показали перспективность и целесообразность получения порошковых полуфабрикатов. Причем, вектор на «натуральность» является доминирующим при создании подобных продуктов и предполагает широкое использование порошковых концентрированных форм продуктов переработки плодов и ягод. Разработаны рецептуры и технологии получения сухих напитков из плодов черноплодной рябины, ягод облепихи, малины [12], черной смородины, жимолости, черники, клюквы, бруснки, экстракта плодов бигне [13,14]. Тем не менее, на рынке безалкогольной продукции спектр сухих полуфабрикатов напитков все еще достаточно ограничен, и их доля в общем сегменте безалкогольных напитков весьма незначительна. Поэтому разработки в этом направлении, безусловно, актуальны и представляют научный и практический интерес.

Ягоды черники обладают уникальным биогенным потенциалом: лечебный и профилактический эффект ягод доказан многочисленными исследованиями и проявляется за счет наличия многогранного спектра биологически активных веществ антиоксидантного ряда, витаминного и минерального комплекса [15], предотвращающих развитие многих патологических состояний в организме человека таких как язвенный колит лёгкой и средней степени тяжести [16], сердечно-сосудистые заболевания [17,18], рак, болезнь Альцгеймера [17]. Поэтому использование ягод и продуктов их переработки для создания полезных безалкогольных напитков представляется перспективным и вполне обоснованным.

Целью настоящих исследований явилась разработка рецептуры сухого полуфабриката безалкогольного напитка из лиофилизированного сока ягод черники, полученного путем ферментативной обработки мезги, и определение его свойств.

2. Объекты и методы

Объектами исследования служили сухие смеси для приготовления напитка. В работе использовали сублимированный сок черники, полученный из ферментативно обработанных ягод черники, по технологии, изложенной в [19], экстракт плодов Монк Фрукт (сертификат MFL211216), мальтодекстрин DE18–20, вода питьевая СанПиН 2.1.4.1074-01[1] и ГН 2.1.5.1315-03[2].

Для создания рецептуры напитка варьировали концентрацией сухих ингредиентов, которые растворяли в воде и затем проводили органолептическую оценку полученных образцов. Описание образцов, участвующих в экспериментах, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. **Характеристика экспериментальных образцов сухих смесей напитков по составу**

Table 1. **Characteristics of the experimental samples of dry drink mixes by composition**

Образцы	Дозировки (концентрации) ингредиентов (%)		
	Сублимированный сок черники	Монк Фрукт	Мальто-декстрин
Образец 1	1,5	—	—
Образец 2	2,6	—	—
Образец 3	3,5	—	—
Образец 4	2,6	0,1	—
Образец 5	2,6	0,25	—
Образец 6	2,6	0.4	—
Образец 7	2,6	0,5	—
Образец 8	2,6	0,25	2,4
Образец 9	2,6	0,25	3,5
Образец 10	2,6	0,25	4,5

Анализ биохимических характеристик сухого напитка производили с применением химических и физико-химических методов.

Содержание влаги определяли с помощью гравиметрического метода, который включает высушивание образца до достижения постоянной массы при температуре 105 °C в сушильном шкафу марки LOIP LF-120/300-VS1, произведенном ЗАО ЛОиП (Россия). Для измерения массовой доли золы использовали гравиметрический метод с применением муфельной печи модели СНОЛ 3/11, предоставленной ТОО «Технотерм» (Россия).

Общее содержание белка измеряли с использованием метода Кьельдаля на азотном анализаторе UDK 159 VELP Scientifica SRL (Италия), который основан на определении общего содержания азота с последующим пересчетом на белок. Учитывая небольшое количество липидов в изучаемых образцах, для пересчета азота на белок использовали коэффициент, равный 5,7.

Калорийность определяли по методическим указаниям[3], применяя лабораторные исследования показателей влаги, золы, белка и жира.

Показатель pH определяли по ГОСТ 26188-2016[4] на иономере pX-150МИ (ООО «Измерительная техника», Россия)

Спектрофотометрическим методом на спектрофотометре UNICO 2800, производитель США “United Products & Instruments, Inc” по ГОСТ 32709-2014[5] определяли массовую долю антоцианов; в соответствии с Р 4.1.1672-03[6] — общее количество полифенолов по методу Фолина-Чокальтеу.

[1] СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. —103 с.

[2] ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. — 154 с.

[3] МУ 4237-86 «Методические указания по гигиеническому контролю за питанием в организованных коллективах». М.: Министерство здравоохранения, 1986. — 21 с.

[4] ГОСТ 26188-2016 «Продукты переработки фруктов и овощей, консервы мясные и мясорастительные. Метод определения pH». М.: Стандартинформ, 2016. — 7 с.

[5] ГОСТ 32709-2014 «Межгосударственный стандарт продукция соковая. Методы определения антоцианинов». М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.

[6] Р 4.1.1672-03 «Руководство по методам контроля качества и безопасности биологически активных добавок к пище». Утверждено и введено в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, Первым заместителем Министра здравоохранения Российской Федерации Г. Г. Онищенко 30 июня 2003 г. https://docs.cntd. ru/document/1200034795. Дата доступа 03.12.2024.

По ГОСТ ISO 750-2013[7] с применением автоматического потенциометрического титратора АТП-02 ООО «НПО Аквилон» (Россия) находили значение титруемой кислотности.

Анализ профиля антоцианов и полифенолов, количественное содержание полифенолов, витамина С, витамина РР (никотинамида), витамина В5 (пантотеновой кислоты) проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на аналитической колонке Zorbax ODS с техническими характеристиками: длина — 250 мм, внутренний диаметр — 4,6 мм, размер частиц — 5 мкм.

Идентификацию антоцианов осуществляли с помощью спектрофотометрического детектора при длине волны 518 нм на хроматографе Agilent 1260 Infinity II LC (США). Использовали следующие условия хроматографического анализа: температура колонки 40 °С, объём вводимой пробы 5 мкл, элюент 1 (раствор с содержанием муравьиной кислоты 10 %), элюент 2 (раствор содержащий 10 % муравьиной кислоты, 50 % ацетонитрила и 40 % дистиллированной воды). Применяли градиентный режим элюирования: 0 мин — 88 % Э1 и 12 % Э2; 26 мин — 70 % Э1 и 30 % Э2; 35 мин — 0 % Э1 и 100 % Э2; 43 мин — 88 % Э1 и 12 % Э2.

Идентификацию галловой кислоты, эпикатехина, коричной кислоты осуществляли с помощью спектрофотометрического детектора при длине волны 280 нм; ресвератрола — 303 нм; кофейной, хлорогеновой и феруловой кислоты — 330 нм; рутина и кверцетина — 360 нм Использовали следующие условия хроматографического анализа: температура колонки 20 °С, объём вводимой пробы 5 мкл, элюент 1 (дистиллированная вода), элюент 2 (абсолютный метанол), элюент 3 (смесь по объёму дистиллированной воды/ледяная уксусная кислота 96:4), скорость подачи элюента при 0 мин — 0,5 мл/мин; от 15 до 70 мин — 0,8 мл/мин. Применяли градиентный режим элюирования: 0 мин — 15 % Э2 и 85 % Э3; 15 мин — 75 % Э1 и 25 % Э2; 20 мин — 15 % Э1 и 85 % Э2; 40 мин — 40 % Э1 и 60 % Э2; 45 мин — 5 % Э1 и 95 % Э2; 55 мин — 5 % Э1 и 95 % Э2; 60 мин — 85 % Э1 и 15 % Э2; 70 мин — 85 % Э1 и 15 % Э2.

При определении витамина С использовали спектрофотометрический детектор и следующие условия хроматографического анализа: температура колонки 25 °С, объём вводимой пробы 10 мкл, элюент раствор дигидрофосфата натрия 0,1 моль/л, pH = 2,5, скорость подачи элюента 0,65 мл/мин, длина волны 243 нм.

Идентификацию никотинамида (РР) осуществляли с помощью спектрофотометрического детектора при длине волны 261 нм. Использовали следующие условия хроматографического анализа: температура колонки 25 °С, объём вводимой пробы 20 мкл, элюент раствор дигидрофосфата калия 0,05 моль/л pH=3,0, скорость подачи элюента при 1 мл/мин.

Для определения пантотеновой кислоты (В5) применяли следующие условия хроматографического анализа: спектрофотометрический детектор, температура колонки (20 ± 5) °С, объём вводимой пробы 20 мкл, элюент раствор в соотношении метанол: водный раствор фосфата натрия (1:9) с pH = 2,5, скорость подачи элюента 0,5 мл/мин, длина волны 220 нм.

Анализ содержания минеральных веществ проводили с помощью атомно-абсорбционной спектрометрии, применяя спектрометр А-2 от компании ООО «НПО Аквилон» с графитовой и пламенной нагревательной печами. Подготовка образцов осуществлялась в сосудах системы микроволнового разложения Speedwave MWS-2 (Германия). Программа разложения проводилась следующим образом: нагрев до давления 150 кПа со скоростью 20 кПа/мин, далее — нагрев до 800 кПа со скоростью 80 кПа/мин, выдержка в течение 1 минуты при 800 кПа, последующий нагрев до 1500 кПа со скоростью 80 кПа/мин, выдержка 10 минут при этом давлении и последующее охлаждение.

Микробиологические показатели определяли в соответствии с ГОСТ 10444.15-94[8], ГОСТ 31747-2012[9]. ГОСТ 10444.12-2013[10] и МУК 4.2.2884-11[11].

Органолептический анализ опытных образцов проводили при комнатной температуре профильно-дескрипторным методом по визуальным и вкусовым дескрипторам (Таблица 2). В дегустации приняли участие 15 респондентов в возрасте 19–60 лет (сотрудники Инжинирингового центра Передовые пищевые технологии и безопасность продуктов питания» ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»).

Таблица 2. **Дескрипторы для органолептической оценки напитка на основе сублимированного сока черники**

Table 2. **Descriptors for organoleptic assessment of the drink based on the freeze-dried blueberry juice**

№ п/п	Визуальные дескрипторы	Вкусовые дескрипторы
1	Насыщенность цвета	Аромат
2	Прозрачность	Черничный вкус
3	Фиолетовый	Кислый
4	—	Сладкий
5	—	Терпкий, вяжущий вкус
6	—	Мягкий (лёгкий) вкус
7	—	Общая предпочтительность

Для оценки степени выраженности характеристик, указанных в дескрипторах, была выбрана непрерывная шкала с пятибалльной системой, где 1 — признак отсутствует, а 5 — признак проявляется ярко по ГОСТ ИСО 6658-2016[12] и ГОСТ ИСО 4121-2016[13].

Все измерения проводились в трех параллельных; данные представлены в виде среднего значения с учетом стандартного отклонения.

3. Результаты и обсуждение

Принимая во внимание органолептические, прежде всего вкусовые, характеристики сублимированного сока черники и значительное содержание органических кислот, представлялось целесообразным провести исследования модельных растворов, состоящих из сублимированного сока черники и питьевой воды — Образцы 1, 2 и 3.

Результаты органолептической оценки, представленные на Рисунке 1, выявили предпочтения к Образцу 2, который имел цвет и аромат, присущий ягодам черники, во вкусе ощущалась незначительная терпкость и доминирование кислых тонов.

Для смягчения выраженного кислого вкуса при разработке рецептуры использовали экстракт Монк Фрукт (научное название *Siraitia grosvenorii* (Swingle) — некрупных зеленых плодов вьющегося растения семейства тыквенных, называемого Фрукт Монаха, Луо Хань Гуо или Архат. Монк Фрукт и его экстракты имеют долгую историю применения в Японии и считаются безопасными. В Китае плоды Луо Хань Гуо применяют в традиционной китайской медицине благодаря его терапевтическим свойствам, особенно при лечении таких состояний, как застой в легких, простуда и боль в горле [20]. В последние годы Монк Фрукт привлекает внимание как натуральный подсластитель и заменитель сахара. Сладкие компоненты этого растения называют могрозидами, которые являются тритерпеновыми гликозидами, среди которых могрозид V является наиболее распространенным. Показан широкий спектр биологической активности могрозидов, в том числе антиоксидантной, антимикробной, противораковой [21], что обусловливает неподдельный интерес к монаху как к потенциально перспективному для использования при получении функциональных и специализированных продуктов.

Учитывая успешный опыт применения экстракта Монк Фрукт при разработке продуктов питания [22] и его сладость, Монк Фрукт вносили в модельный раствор сублимированного сока (2,6 %) в количествах 0,10–0,50 % (Таблица 1). Результаты органолептической оценки представлены на Рисунке 2.

Отмечено, что по описываемым дескрипторам Образец 5 выглядел более привлекательным. Применение Монк Фрукт не повлияло на аромат, незначительно приглушило выраженный черничный вкус, но позволило компенсировать излишнюю кислотность, сбалансировав кисло-сладкий вкус; в послевкусии присутствовали ненавязчивые терпкость и вяжущие ощущения. Полученные результаты органолептической оценки согласуются с ранее представленными в литературе данными по применению продуктов переработки Монк Фрукт в рецептуре готовых к употреблению напитков, содержащих концентраты натуральных фруктовых соков [22]. Авторы отмечали улучшенный вкусовой оттенок напитков без заметного изменения

[7] ГОСТ ISO 750-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности» М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

[8] ГОСТ 10444.15–94 «Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов». М.: Стандартинформ, 2010. — 6 с.

[9] ГОСТ 31747–2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)». М.: Стандартинформ, 2013. — 15 с.

[10] ГОСТ 10444.12–2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчёта количества дрожжей и плесневых грибов». М.: Стандартинформ, 2014. — 10 с.

[11] МУК 4.2.2884–11 «Методы микробиологического контроля объектов окружающей среды и пищевых продуктов с использованием петрифильмов». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. — 24 с.

[12] ГОСТ ИСО 6658-2016 «Органолептический анализ. Методология. Общее руководство». М.: Стандартинформ, 2016. — 21 с.

[13] ГОСТ ИСО 4121-2016 «Органолептический анализ. Руководящие указания по применению шкал количественных характеристик». М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

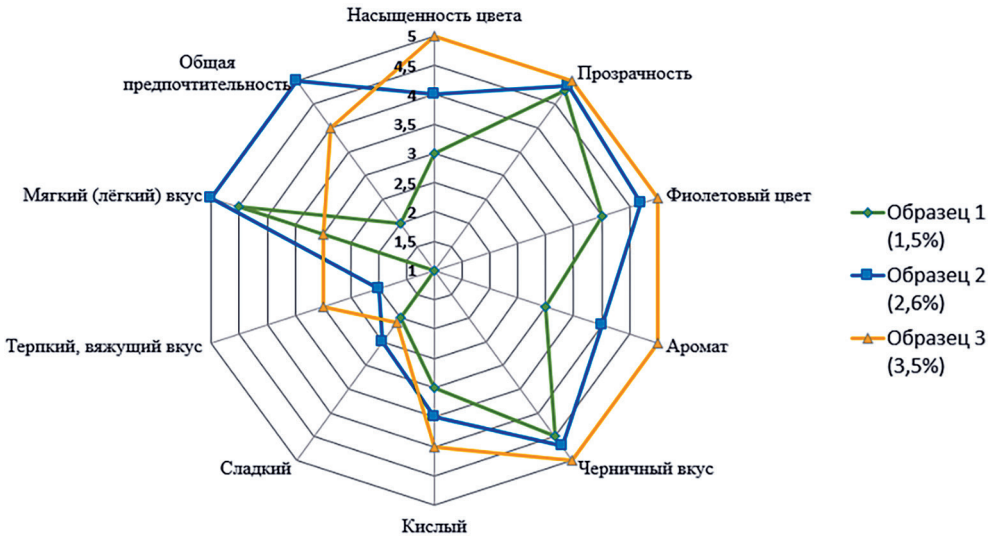


Рисунок 1. **Профилограмма модельных растворов сублимата черничного сока**
Figure 1. **Profilogram of the model solutions of the sublimate of blueberry juice**

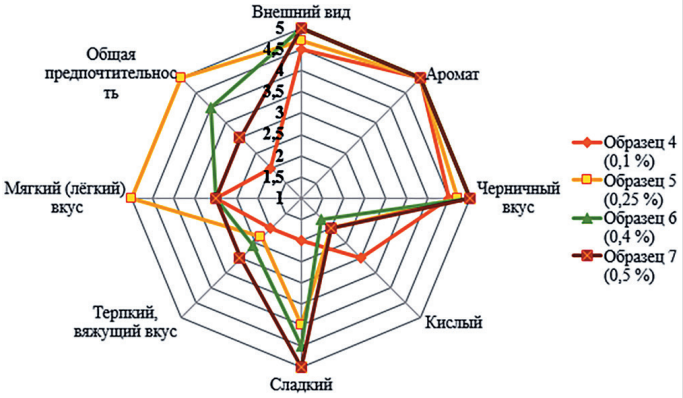


Рисунок 2. **Профилограмма образцов напитка с разным содержанием экстракта Монк Фрукт**
Figure 2. **Profilogram of the drink samples with different contents of the Monk Fruit extract**

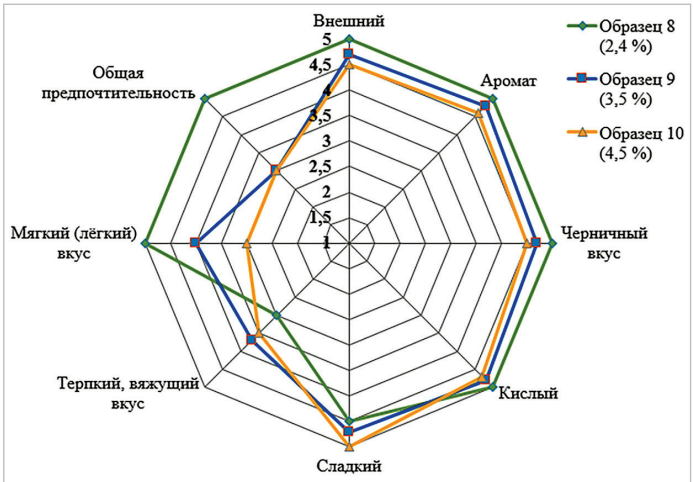


Рисунок 3. **Профилограмма образцов напитка, содержащих сублимированный сок черники (2,6 %), Монк Фрукт (0,25 %) и различное количество мальтодекстрина**
Figure 3. **Profilogram of the drink samples containing freeze-dried blueberry juice (2.6 %), Monk Fruit (0.25 %) and different amounts of maltodextrin**

вкуса, при этом привкус напитков был максимально приближен к естественному в сравнении с напитками, которые не содержали концентрат сока Ло-Хань-Го (Монк Фрукт).

Для придания плотности напитку использовали мальтодекстрин, успешное применение которого проиллюстрировано в ряде статей [23,24,25]. Авторы отмечают, что мальтодекстрин оказывает существенное влияние на качественные показатели напитка [26]. Содержание мальтодекстрина в опытных образцах составило 2,4, 3,5 и 4,5 % соответственно (Таблица 1).

Мальтодекстрин вносили в водный раствор сублимата сока черники (2,6 %) с экстрактом Монк Фрукт в концентрации 0,25 %. Данные органолептических исследований представлены на Рисунке 3.

Отмечено, что отклонения и различия по большинству дескрипторов между образцами небольшие, за исключением дескрипторов «общая предпочтительность» и «мягкий (лёгкий) вкус». По данным дескрипторам Образец 8 существенно превосходил остальные образцы. Во вкусе напитка доминировала ягодная составляющая. Вкус достаточно плотный, богатый, сбалансированный кисло-сладкий, в послевкусии ощущалась легкая кислинка и незначительная терпкость. Аромат — узнаваемый, характерный для ягод черники.

Таким образом, с учетом данных органолептического анализа предложена рецептура сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники (Таблица 3).

Принимая во внимание различные вкусовые предпочтения потребителей, предложенная рецептура ориентирована на разовую порцию, предназначенную для растворения в воде объемом 170 мл. При этом имеется возможность (при необходимости) увеличить объем до 200 мл, скорректировав вкусовые характеристики индивидуально, придав большую легкость напитку.

Органолептические и физико-химические показатели сухой смеси напитка представлены в Таблице 4.

Таблица 3. **Рецептура сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники (разовая порция)**
Table 3. **Recipe of the dry drink mix based on the freeze-dried blueberry juice (single serving)**

№ п/п	Наименование ингредиента	Содержание	
		%	г
1	Сублимированный сок черники	50,0	4,5
2	Мальтодекстрин	45,0	4,1
3	Экстракт Монк Фрукт	5,0	0,4
	ИТОГО	100,0	9,0

Таблица 4. **Органолептические и физико-химические показатели сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники**
Table 4. **Organoloptic and physico-chemical indicators of the dry drink mix based on freeze-dried blueberry juice**

№ п/п	Наименование показателя	Характеристика
1	Внешний вид	Однородный сыпучий порошок, допускаются гранулы, небольшие комочки
2	Цвет	Бордовый с фиолетовым оттенком
3	Запах	Свойственный ягодам черники
4	Массовая доля влаги, %	4,5 ± 0,3
5	Водородный показатель, pH	3,0 ± 0,2

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Дана характеристика сухой смеси напитка по химическому составу, которая представлена в Таблице 5.

Таблица 5. **Химический состав сухой смеси напитка и степень удовлетворения суточной физиологической потребности (адекватного уровня потребления) в веществах, содержащихся в напитке на основе сублимированного сока черники, при употреблении разовой порции в соответствии с МР 2.3.1.0253-21[14]**

Table 5. **Chemical composition of the dry drink mix and a degree of satisfaction of the daily physiological requirement (adequate level of consumption) in substances contained in the drink based on freeze-dried blueberry juice when consuming a single serving (according to MR2.3.1.0253-21[14])**

№ п/п	Показатель	Содержание в 100 г продукта	Норма физиологической потребности/адекватный уровень потребления взрослого человека в сутки	Степень удовлетворения физиологической суточной потребности/адекватного уровня потребления, %
	Белки, г	0,72 ± 0,23	65–114	0,05–0,1
	Углеводы, г	76,6 ± 5,8	238,0–551,0	1,2–2,8
	Влага, г	4,5 ± 0,3	—	—
	Зола, г	1,83 ± 0,1	—	—
	Органические кислоты, в пересчёте на лимонную кислоту, г	6,75 ± 0,3	—	—
	Полифенольные вещества, мг	1980 ± 210	—	—
	Антоцианы, мг	1070,4 ± 101,0	50,0	192
	Эпикатехин (флаван-3-олы), мг	489,9 ± 30	200,0	22,0
	Калорийность, ккал	374,7 ± 38	—	—

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Как видно из представленных данных, состав сухой смеси напитка представлен важнейшими в пищевом и биологическом отношении веществ, среди которых особое место занимают представители природных соединений, обладателями которых являются ягоды черники: органические кислоты, витамины, минералы и биоактивные полифенолы, включая антоцианы и флаван-3олы. В количественном эквиваленте наибольшую долю занимают углеводы (76,6 ± 5,8 г на 100 г), в том числе природные сахара, а также органические кислоты (6,75 ± 0,3 г на 100 г), сочетание которых обусловливает гармоничный вкус напитка. Присутствие в составе напитка мощных антиоксидантов — полифенольных соединений, в том числе представителей флавоноидов — антоцианов и эпикатехина, придают ему особые полезные свойства для организма человека. Сухая смесь напитка характеризуется высоким их содержанием: употребление разовой порции напитка позволяет покрыть адекватный уровень потребления флавон-3-олов (эпикатехина) на 22,5 %, антоцианов — на 192 %, при этом не превысить верхний допустимый уровень потребления[15]. Установлено, что в составе антоцианов напитка присутствуют все представители антоциановых соединений, выявленных в ягодах черники [27] (Таблица 6).

Лидирующие позиции (мг/100 г) принадлежат антоцианам на основе цианидина (Цианидин-3-глюкозид (205,5 ± 18,9), Цианидин-3-арабинозид (138,0 ± 12,3), дельфинидина (Дельфинидин-3-глюкозид (191,8 ± 18,9), Цианидин-3-галактозид+Дельфинидин-3- арабинозид (102,6 ± 8,2) и пеонидина (Пеонидин-3-арабинозид (164,6 ± 17,0). Следует отметить, что на долю антоцианов, построенных на основе антоцианидинов, проявляющих (по литературным данным [28]) наиболее выраженную антирадикальную активность — дельфинидина и цианидина, приходится порядка 63 % (таблица 5). Кроме того, именно антоциановым пигментам принадлежит ключевая роль в формировании цветовой гаммы напитка.

Таблица 6. **Содержание антоциановых соединений в сухой смеси напитка**

Table 6. **Content of anthocyanin compounds in the dry drink mix**

№ п/п	Наименование антоциана	Содержание, мг/100 г
1	Дельфинидин-3-галактозид	38,6 ± 3,5
2	Дельфинидин-3-глюкозид	191,8 ± 18,9
3	Цианидин-3-галактозид + Дельфинидин 3-арабинозид	102,6 ± 8,2
4	Цианидин-3-арабинозид	138,0 ± 12,3
5	Цианидин-3-глюкозид	205,5 ± 18,9
6	Петунидин-3-глюкозид	23,5 ± 2,1
7	Петунидин-3-арабинозид	35,2 ± 3,3
8	Пеонидин-3-глюкозид + Мальвидин 3-галактозид	91,0 ± 8,8
9	Пеонидин-3-арабинозид	164,6 ± 17,0
10	Мальвидин-3-глюкозид	47,2 ± 3,9
11	Мальвидин-3-арабинозид	34,2 ± 2,8

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Дана характеристика сухой смеси напитка по витаминному составу, который представлен в Таблице 7.

Таблица 7. **Витаминный состав сухой смеси напитка и степень удовлетворения суточной физиологической потребности в витаминах при приёме одной порции в соответствии с МР 2.3.1.0253-21[14]**

Table 7. **Vitamin composition of the dry drink mix and a degree of satisfaction of the daily physiological requirement in vitamins when consuming a single serving (according to MR2.3.1.0253-21[14])**

№ п/п	Показатель	Содержание в 100 г продукта	Норма физиологической потребности	Степень удовлетворения физиологической суточной потребности, %
1	Витамин С, мг	130,4 ± 6,1	100,0	11,7
2	Никотинамид, РР, мг	0,62 ± 0,12	20,0	0,3
3	Витамин В5, мг	43,6 ± 3,8	5,0	78

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки n = 3, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Из витаминов значимые количества выявлены для витаминов С и В5. Употребление разовой порции напитка удовлетворяет суточную физиологическую потребность в витамине В5 на 78 %, витамине С — на 11,7 %

Минеральный состав порошкового напитка включает как макроэлементы (калий, натрий, магний, кальций, фосфор), так и микроэлементы (железо, цинк, медь, марганец) (Таблица 8).

Несмотря на то, что большинство выявленных минеральных веществ обнаружены в крайне незначительных количествах (в пересчете на разовую порцию) их присутствие в составе напитка усиливает его полезные свойства. Исключение составляет микроэлемент медь: употребление разовой порции напитка покрывает физиологическую потребность в нем на 30 %. Из идентифицированных минеральных веществ особо следует отметить наличие селена — микроэлемента- антиоксиданта. Разовая порция напитка содержит 12,3–15,6 % от суточного физиологического уровня его потребления.

Одной из важных характеристик продукта является способность сохранять свои свойства в процессе хранения. Проведены исследования по характеристике сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники по органолептическим, физико-химическим и микробиологическим показателям в процессе хранения в течение 9 месяцев с интервалом проведения испытания 3 месяца. Сухую смесь герметично упаковывали в фольгированные пакетики типа саше и закладывали на хранение при нормальных условиях: температура (22 ± 5) °С; влажность (40–50)%; атмосферное давление (730–750) мм рт.ст.

[14] МР 2.3.1.0253-21 Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. — 72 с.

[15] Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к продукции (товарам), подлежащей санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. — 707 с.

Таблица 8. **Минеральный состав сухой смеси напитка и степень удовлетворения суточной физиологической потребности в минералах при употреблении разовой порции в соответствии с МР 2.3.1.0253-21[14]**

Table 8. **Mineral composition of the dry drink mix and a degree of satisfaction of the daily physiological requirement in minerals when consuming a single serving (according to MR2.3.1.0253-21[14])**

№ п/п	Показатель	Содержание в 100 г продукта	Норма физиологической потребности в сутки	Степень удовлетворения физиологической суточной потребности, %
	Натрий, мг	14,8 ± 1,7	1300,0	0,1
	Кальций, мг	32,0 ± 3,0	1000,0	0,3
	Магний, мг	23,6 ± 2,4	420,0	0,5
	Калий, мг	202,8 ± 12,5	3500,0	0,5
	Фосфор, мг	33,6 ± 3,1	700,0	0,4
	Железо, мг	1,9 ± 0,2	10,0–18,0	1,1–2,0
	Марганец, мг	0,68 ± 0,08	2,0	3,0
	Цинк, мг	0,33 ± 0,05	12,0	0,3
	Медь, мг	3,4 ± 0,4	1,0	30
	Селен, мкг	96,0 ± 9,6	55,0–70,0	12,3–15,6

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Установлено, что на протяжении всего периода хранения органолептические и физико-химические показатели продукта оставались на уровне, соответствующем первоначальной закладке (Таблица 9).

Отмечено, что микробиологические показатели находились в норме и не превышали установленные пределы на протяжении всего срока хранения (Таблица 10). В сухом полуфабрикате напитка не найдено бактерий группы кишечных палочек (БГКП), а показатель КМАФАнМ, содержание дрожжей и плесени находятся в допустимых пределах. К подобным заключениям приходят авторы других исследований [29,30]. По всей видимости, низкий показатель активности воды и герметичная упаковка обеспечивают требуемые показатели безопасности сухой смеси напитка.

Использование герметичной упаковки, защищающей продовольственный товар от воздействия света и кислорода, а также способствующей поддержанию низкой влажности, замедляет, но не устраняет протекание неблагоприятных химических процессов, что в свою очередь неизбежно приведет к утрате биологически активных компонентов. Учитывая это, проводили исследования по изменению содержания некоторых природных компонентов в сухой смеси напитка при его хранении, результаты представлены в Таблице 11.

Как следует из представленных данных, анализируемые компоненты достаточно стабильны в процессе хранения, за исключением витамина С: его потери пропорциональны длительности хранения и к концу девятого месяца хранения составили 32 %. Известно, что витамин С является наиболее уязвимым с позиции сохранности витамином, поэтому степень его разрушения является своего рода индикатором, по которому судят об эффективности разработанных технологических решений получения продукта и его хранения. Вопросы сохранности витамина С в продуктах переработки плодово-ягодного сырья (порошков, концентратов соков, ягодных сиропах) при хранении освещены в работах [31,32]. При этом, авторы отмечают высокую вариабельность полученных результатов (7 % — 63 %.), которая, по всей видимости, объясняется условиями и продолжительностью хранения, предложенными упаковочными решениями, а также уникальной комбинацией и эффектами взаимодействия пищевых и биологически активных веществ на межмолекулярном уровне. К сожалению, сведений по сохранности витамина С в сухих смесях напитков, полученных с применением порошковых плодово-ягодных ингредиентов, при их хранении в литературе не приводится.

Таблица 9. **Динамика изменения органолептических и физико-химических показателей сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники при хранении**

Table 9. **Dynamics of changes in organoleptic and physico-chemical indicators of the dry drink mix based on freeze-dried blueberry juice**

Наименование показателя	Характеристика на момент закладки	Период хранения		
		3 мес	6 мес	9 мес
Внешний вид	Однородный сыпучий порошок, допускаются гранулы, небольшие комочки	соответствует	соответствует	соответствует
Цвет	Бордовый с фиолетовым оттенком	соответствует	соответствует	соответствует
Запах	Свойственный ягодам черники	соответствует	соответствует	соответствует
Массовая доля влаги, %	4,5 ± 0,2	4,5 ± 0,2	4,6 ± 0,2	4,6 ± 0,2
pH	3,0 ± 0,3	3,0 ± 0,3	3,0 ± 0,3	3,1 ± 0,3

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Таблица 10. **Микробиологические показатели сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники при его хранении в соответствии с ТР ТС 021/2011[16]**

Table 10. **Microbiological indicators of the dry drink mix based on freeze-dried blueberry juice during its storage (according to TR CU021/2011[16])**

Наименование показателя	Характеристика	Контрольная проба	Период хранения		
			3 мес	6 мес	9 мес
Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, КОЕ/100 см^3	Не более 5×10^4	2×10^1	8×10^1	2×10^2	7×10^2
Бактерии группы кишечных палочек (БГКП), г/см^3	Не допускаются	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Дрожжи и плесени (сумма), КОЕ/г	не более 10	Менее 10	Менее 10	Менее 10	Менее 10

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

Таблица 11. **Динамика изменения содержания некоторых природных компонентов в сухой смеси напитка на основе сублимированного сока черники при хранении**

Table 11. **Dynamics of changes in the content of several natural components in the dry drink mix based on freeze-dried blueberry juice during storage**

Наименование показателя	Значения на момент закладки на хранение	Период хранения		
		3 мес	6 мес	9 мес
Полифенольные соединения в пересчёте на галловую кислоту, мг/100 г	1980 ± 210	1950 ± 150	1960 ± 144	1939 ± 144
Органические кислоты, в пересчёте на лимонную кислоту, г/100 г	6,75 ± 0,2	6,72 ± 0,2	6,68 ± 0,2	6,70 ± 0,2
Витамин С, мг/100г	130,4 ± 24,5	116,3 ± 14,7	105,6 ± 11,6	88,7 ± 9,6
Антоцианы, мг/100 г	1070,4 ± 128,2	1065,2 ± 127,5	1042,3 ± 124,8	1054,3 ± 126,2

Примечание: показатели представляют собой средние данные ± стандартное отклонение от средней величины для выборки $n = 3$, с использованием коэффициента доверия Стьюдента 0,95.

[16] ТР ТС 2021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (с изменениями на 22 апреля 2024 года). Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880.

Полифенольные соединения, в том числе, антоциановые пигменты, демонстрируют высокую сохранность в процессе хранения: их содержания оставались на уровне, соответствующем первоначальной закладке (Таблица 11). По всей видимости, значительное количество органических кислот и, как следствие, низкий показатель pH способствуют стабилизации антоциановых соединений. Тем не менее, анализ литературных источников показывает, что сохранность полифенольных соединений и антоцианов определяется видом упаковочного материала, условиями хранения, а также фенольным составом и характеристиками сырья [32,33].

4. Заключение

В результате проведенных исследований разработаны рецептура и технологические решения по получению сухой смеси — порошкообразного концентрата для безалкогольного напитка на основе сублимированного сока черники, который обеспечивает достойные органолептические показатели готового напитка, а уникальная комбинация (в качественном и количественном отношении) природных биологически активных веществ ягод обусловливает высокую пищевую ценность и функциональные свойства. Установлено, что потребление одной порции напитка обеспечивает удовлетворение суточной физиологической потребности в витаминах B5 и C на 78% и 11,7% соответственно, микроэлемента меди — на 30%. минерального антиоксиданта селена — на 12,3–15,6%, адекватного уровня употребления флавон-3-олов (эпикатехина) — на 22,5%, Содержание антоцианов в разовой порции напитка не превышает верхний допустимый уровень потребления. Предложены упаковочные решения для сухой смеси напитка — пакетики типа «саше» в ориентации на разовую порцию, обеспечивающие при нормальных условиях (температура (22±5)°C; влажность (40–50)%; атмосферное давление (730–750) мм рт. ст.) в течение 9 месяцев хранения стабильность органолептических, физико-химических и микробиологических показателей. Показана высокая степень сохранности органических кислот, биоактивных полифенольных соединений, включая антоцианы, благодаря не только присущим им индивидуальным свойствам, но и уникальному сочетанию природных компонентов ягод, особенно полифенольному комплексу. Наиболее значительные потери были отмечены для неустойчивого витамина C: к концу периода хранения — 32%. Результаты проведенных исследований убедительно продемонстрировали, что сублимированный сок черники является перспективной технологичной основой для получения сухих полуфабрикатов безалкогольных напитков с богатым набором природных компонентов и ярко выраженным вкусом, и ароматом свежих ягод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

1. Zavorokhina, N. V., Mysakov, D. S., Bochkova, A. C. (2022). Development of adaptogenic beverages from Arctic raw materials for the Far North residents. *Food Industry,* 7(3), 41–49. https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-3-5
2. Черевач, Е. И., Теньковская, Л. А., Палагина, М. В. (2015). Разработка композиций растительных экстрактов антиоксидантного действия, используемых в технологии функциональных напитков. *Современные проблемы науки и образования*, 2–2, статья 193. [Cherevach, E. I., Tenkovskaya, L. A., Palagina, M. V. (2015). Development of antioxidant plant extracts, that used in the functional beverages technology. *Modern Problems of Science and Education,* 2–2, Article 193. (In Russian)]
3. Купаева, Н. В., Ильина, М. А., Светличная, М. В., Зубарев, Ю. Н. (2022). Исследование антиоксидантного потенциала овсяных напитков, обогащенных растительными компонентами. *Пищевые системы*, 5(2), 157–163. [Kupaeva, N. V., Ilina, M. A., Svetlichnaya, M.V., Zubarev, Yu. N. (2022). Study of the antioxidant potential of oat drinks enriched with plant components. *Food Systems*, 5(2), 157–163. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-157-163
4. Егорова, Е. Ю., Захарова, А. С., Кузьмина, С. С. (2021). Использование пантогематогена и сухих растительных экстрактов в производстве напитков и сахарных кондитерских изделий. *Ползуновский вестник,* 1, 51–58. [Egorova, E. Yu., Zakharova, A. S., Kuzmina, S. S. (2021). Use of pantohematogen and dry plant extracts in the production of beverage and sugar confectionery products. *Polzunovskiy Vestnik,* 1, 51–58. (In Russian)]
5. Алексеенко, Е.В. (2021). Ягодные ингредиенты для продуктов здорового питания: актуальность, перспективы, технологические решения. Глава из книги: Пищевые ингредиенты в продуктах питания: от науки к технологиям. М.: МГУПП, 2021. [Alekseenko, E.V. (2021). Berry ingredients for products of healthy nutrition: Topicality, prospects, technological solutions. Chapter in a book: Food ingredients in food products: From science to technologies. Moscow: MGUPP, 2021. (In Russian)]
6. Rahman, Md. T., Ove, T. A., Halim, Md. A., Khatun, A., Yeasmin, Mst. R., Md. Kamal, M. et al. (2024). Formulation and characterization of bael pulp powder from locally grown bael fruit (*Aegle marmelos L.*) in Dinajpur, Bangladesh. *Food and Humanity*, 2, Article 100213. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.100213
7. Елисеева, Л. И., Михайлова, Н. С., Толстяков, С. С. (2022). Исследование качества напитков из боярышника. *Наукосфера,* 3(2), 165–170. [Eliseeva, L. I., Mikhailova, N. S., Tolstyakov, S. S. (2022). Research on the quality of hawthorn drinks. *Naukosfera*, 3(2), 165–170. (In Russian)] https://doi.org/10.5281/zenodo.6395696
8. Дунченко, Н. И., Купцова, С. В., Волошина, Е. С., Кермен, В. М. (2024). Разработка технологии молочного напитка с растительными наполнителями. *Вестник КрасГАУ,* 2, 207–214. [Dunchenko, N. I., Kuptsova, S. V., Voloshina, E. S., Kermen, V. M. (2024). Milk drink with vegetable fillings technology development. *Bulliten KrasSAU*, 2, 207–214. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-2-207-214
9. Колотий, Т. Б., Коваленко, З. С. (2021). Напитки на основе молочной сыворотки с использованием сиропов из фруктов и дикорастущих растений. *Новые технологии,* 17(2), 33–39. [Kolotiy, T. B., Kovalenko, Z. S. (2021). Drinks based on milk whey rsing furit syurp from wild plants. *New Teohnologies*, 17(2), 33–39. (In Russian)] https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-2-33-39
10. Школьникова, М. Н., Лазарев, В. А., Шестакова, Т. А. (2021). Напиток из творожной сыворотки с соком чёрной смородины. *Молочная промышленность,* 8, 54–55. [Shkolnikova, M. N., Lazarev, V. A., Shestakova, T. A. (2021). Curd whey drink with black currant juice. *Dairy Industry*, 8, 54–55. (In Russian)]
11. Огнева, О. А., Безверхая, Н. С. (2021). Разработка рецептур комбинированных продуктов с функциональными свойствами. *Новые технологии,* 17(1), 64–69. [Ogneva, O. A., Bezverkhaya, N. S. (2021). Development of recipes for combined products with functional properties. *New Technologies,* 17(1), 64–69. (In Russian)] https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-1-64-69
12. Щерба, И. В., Бакуменко, О. Е., Бакуменко, П. В. (2023). Разработка концентратов сухих напитков на основе растительных криопорошков. *Хранение и переработка сельхозсырья,* 2, 163–175. [Sherba, I. V., Bacumenko, O. E., Bacumenko, P. V. (2023). Development of concentrates of dry drinks based on vegetable cryopowders. *Storage and Processing of Farm Products*, 2, 163–175. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2023.343
13. Suriati, L., Mangku, G. P. I., Datrini, L. K., Hidalgo, H. A., Red, J., Wunda, S. et al. (2023). The effect of maltodextrin and drying temperature on the characteristics of Aloe-bignay instant drink. *Applied Food Research*, 3(2), Article 100359. https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100359
14. Budnimath, S. H., Bhuvaneshwari, G., Ganiger, V. M., Jagadeesh, S. L, Goudar, G., Patil, S. N. et al. (2023). Physical, reconstitution and phenolic properties of instant drink mix prepared with Moringa oleifera leaf, raw banana and whey protein concentrate. *Measurement: Food*, 11, Article 100108. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2023.100108
15. Habanova, M., Saraiva, J. A., Haban, M., Schwarzova, M., Chlebo, P., Predna, L. et al. (2016). Intake of bilberries (Vaccinium myrtillus L.) reduced risk factors for cardiovascular disease by inducing favorable changes in lipoprotein profiles. *Nutrition Research*, 36(12), 1415–1422. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2016.11.010
16. Pires, T. C. S. P., Caleja, C., Santos-Buelga, C., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R. (2020). Vaccinium myrtillus L. fruits as a novel source of phenolic compounds with health benefits and industrial applications — a review. *Current Pharmaceutical Design*, 26(16), 1917–1928. https://doi.org/10.2174/1381612826666200317132507
17. Biedermann, L., Mwinyi, J., Scharl, M., Frei, P., Zeitz, J., Kullak-Ublick, G. A. et al. (2013). Bilberry ingestion improves disease activity in mild to moderate ulcerative colitis — An open pilot study. *Journal of Crohn's and Colitis*, 7(4), 271–279. https://doi.org/10.1016/j.crohns.2012.07.010
18. Miller, K., Feucht, W., Schmid, M. (2019). Bioactive compounds of strawberry and blueberry and their potential health effects based on human intervention studies: A brief overview. *Nutrients*, 11(7), Article 1510. https://doi.org/10.3390/nu11071510
19. Алексеенко, Е. А., Каримова, Н. Ю., Семенов, Г. В., Краснова, И. С., Бакуменко, О. Е. (2024). Производство и биохимическая характеристика сублимированного сока черники из ферментированных ягод. *Пищевые системы,* 7(1),114–124. [Alekseenko, E. V., Karimova, N. Yu., Semenov, G. V., Krasnova, I. S., Bakumenko, O. E. (2024). Production and biochemical characterization of freeze-dried blueberry juice from enzymatically processed berries. *Food Systems*, 7(1), 114–124. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-114-124
20. Pandey, A. K., Chauhan, O. P. (2020). Monk fruit (Siraitia grosvenorii) — health aspects and food applications. *Pantnagar Journal of Research*, 17(3), 191–198.
21. Chen, N., Cao, W., Yuan, Y., Wang, Y., Zhang, X., Chen, Y. et al. (2024). Recent advancements in mogrosides: A review on biological activities, synthetic biology, and applications in the food industry. *Food Chemistry*, 449, Article 139277. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139277
22. Guo, Q., Shi, M., Sarengaowa, Xiao, Zh., Xiao, Y., Feng, K. (2024) Recent advances in the distribution, chemical composition, health benefits, and application of the fruit of siraitia grosvenorii. *Foods*, 13(14), Article 2278. https://doi.org/10.3390/foods13142278
23. Araujo-Díaz, S. B., Leyva-Porras, C., Aguirre-Bañuelos, P., Álvarez-Salas, C., Saavedra-Leos, Z. (2017). Evaluation of the physical properties and conservation of the antioxidants content, employing inulin and maltodextrin in the spray drying of blueberry juice. *Carbohydrate Polimers,* 167, 317–325. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.065
24. Mar, J. M., Silva, L. S., Rabelo, M. S., Muniz, M. P., Nunomura, S. M., Correa, R. F. et al. (2020). Encapsulation of Amazonian Blueberry juices: Evaluation of bioactive compounds and stability. *LWT,* 124, Article 109152. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109152
25. Baldelli, A., Pico, J., Woo, M. W., Castellarin, S., Pratap-Singh, A. (2024). Spray dried powder of common fruit juices: Enhancement of main propertie. *Powder Technology*, 441, Article 119560. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.11956
26. Suriati, L., Mangku, I. G. P., Datrini, L. K., Hidalgo, H. A., Red, J., Wunda, S. Et al. (2023). The effect of maltodextrin and drying temperature on the characteristics of Aloe-bignay instant drink. *Applied Food Research*, 3(2), Article 100359. https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100359

27. Каримова, Н. Ю., Алексеенко, Е. В., Цветкова, А. А., Бакуменко, О. Е. (2023). Сравнительная биохимическая характеристика ягод лесной и садовой черники как обоснование для применения в качестве источника функциональных пищевых ингредиентов. *Химия растительного сырья,* 4, 199–208. [Karimova, N. Yu., Alekseenko, E. V., Tsvetkova, A. A., Bakumenko, O. E. (2023). Comparative biochemical characteristics of forest and garden bilberries as a rationale for use as a source of functional food ingredients. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 4, 199–208. (In Russian)] https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412171
28. Юдина, Р. С., Гордеева, Е. И., Шоева, О. Ю., Тихонова, М. А., Хлесткина, Е. К. (2021). Антоцианы как компоненты функционального питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции,* 25(2), 178–189. [Yudina, R. S., Gordeeva, E. I., Shoeva, O. Yu., Tikhonova, M. A., Khlestkina, E. K. (2021). Anthocyanins as functional food components. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 25(2), 178–189. (In Russian)] https://doi.org/10.18699/VJ21.022
29. Веселова, О. В., Власова, К. В. (2023). Разработка технологии напитков на основе натуральных фруктовых порошков. *Вестник Московского государственного университета технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет). Серия прикладных научных дисциплин,* 1, 10–22. [Veselova, O. V., Vlasova, K. V. (2023). Development of beverage technology based on natural fruit powders. *Herald of the K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University). Series of applied scientific disciplines,* 1, 10–22. (In Russian)] https://doi.org/10.26157/2949-4079.2023.35.64.001
30. Корнен, Н. Н., Калманович, С. А., Шахрай, Т. А., Викторова, Е. П. (2019). Исследование влияния сроков хранения на показатели безопасности и состав биологически активных веществ добавки «порошок тыквенный». *Новые технологии,* 1(47), 100–108. [Kornen, N. N., Kalmanovich, S. A., Shakhray, T. A., Viktorova, E. P. (2019). Study of the effect of storage terms on safety indicators and composition of «Pump powder» biologically active additive. *Novye Tehnologii*, 1(47), 100–108. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/2072-0920-2019-10110
31. Коновалов, С. А., Гаврилова, Н. Б., Полянский, К. К., Щетинин, М. П., Чернопольская, Н. Л. (2024). Современная биотехнология производства молочного десерта с функциональными ингредиентами. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 86(1), 70–83. [Konovalov, S. A., Gavrilova, N. B., Polyansky, K. K., Shchetinin, M. P., Chernopolskaya, N. L. (2024). Modern biotechnology to produce dairy dessertwith functional ingredients. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 86(1), 70–83. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2024-1-70-83
32. Быстрова, Е.А. (2018). Высокоэффективные способы предобработки брусники в технологиях порошковых полуфабрикатов. *Пищевая промышленность*, 4, 58–12. [Bystrova, E.A. (2018). Highly effective methods of pretreatment red whortleberry in technologies of powder semi-finished products. *Food Industry*, 4, 5–12. (In Russian)]
33. Dak, M., Sagar, V.R., Jha, S.K. (2014). Shelf-life and kinetics of quality change of dried pomegranate arils in flexible packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 2(1), 1–6. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2014.04.005

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Каримова Наталья Юрьевна –начальник опытного производства ООО «Олеоника», аспирант, Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел.: +7–499–750–01–11 E-mail: n.karimova1979@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3848-1482 * автор для контактов	**Natalya Yu. Karimova**, Head of Pilot Production, Oleonika LLC, Postgraduate Student, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia Tel.: +7–499–750–01–11 E-mail: n.karimova1979@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3848-1482 * corresponding author
Алексеенко Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор, кафедра биотехнологии и технологии продуктов биоорганического синтеза, Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел.: +7–499–750–01–11 E-mail: AlekseenkoEV@mgupp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6208-0999	**Elena V. Alekseenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia Tel.: +7–499–750–01–11 E-mail: AlekseenkoEV@mgupp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6208-0999
Шаненко Елена Феликсовна — доцент, кафедра технологии бродильных производств и виноделия, Российский биотехнологический университет 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел.: +7–499–750–01–11 E-mail: SHanenkoEF@mgupp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0875-9292	**Elena F. Shanenko**, Docent, Department of Fermentation Technology and Winemaking, Russian Biotechnological University 11, Volokolamskoe highway, Moscow, 125080, Russia Tel.: +7–499–750–01–11 E-mail: SHanenkoEF@mgupp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0875-9292
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-252-259

Received 28.02.2025
Accepted in revised 11.06.2025
Accepted for publication 16.06.2025
© Abedelmaksoud T. G., Hassan M. A., Assous M. T. M., Khalaf-Allah A. E. R. M., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

PROFILING OF VOLATILE COMPOUNDS IN FOUR EGYPTIAN DATE CULTIVARS

Tarek Gamal Abedelmaksoud[1]*, Mennatalh A. Hassan[1,2], Mostafa T. M. Assous[2], Abd El-Rahman M. Khalaf-Allah[1]

[1] Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt
[2] The Central Laboratory of Date Palm Research and Development, Agricultural Research Center, Giza, Egypt

KEY WORDS:
Volatile compounds, date cultivars, SPME, GC–MS analysis

ABSTRACT

Volatile compound plays an important role in consumers' satisfaction and influences further consumption of the date fruit. Thus, the study analyzed the volatile compounds of three date fruit cultivars: Barhy, Samani, Zaghloul at khalal stage of ripeness (complete color) and Siwi at tamr stage of ripeness using solid-phase microextraction (SPME) in conjunction with gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS). A total of 69 compounds were identified, including aldehydes, alcohols, esters, terpenoids, ketones, hydrocarbons, alkanes, and ethers. Barhy dates featured high levels of aldehydes, saturated hydrocarbons, volatiles, ethers, ketones, and esters. Zaghloul dates predominantly contained aldehydes, ethers, and ketones, while Samani dates were rich in ketones, aldehydes, esters, and ethers. Key compounds such as β-(Z)-2-butenal and β-methyl ionone were identified as significant contributors to the distinctive peculiar aromas of these date varieties. Notably, the Siwi variety exhibited a distinctive profile with prominent ethers, aldehydes, ketones, and esters. The Siwi variety contained the highest number of flavour compounds (48), followed by Zaghloul (25), Barhy (20), and Samani (19). This comprehensive analysis reveals a complex and varied aromatic compounds profile among the date cultivars, with each variety having its unique sensory characteristics. The results provide valuable insights into the volatile profiles of Egyptian date varieties, potentially guiding the production of date-derived products and thus enhancing their application in food processing industries.

Поступила 28.02.2025
Поступила после рецензирования 11.06.2025
Принята в печать 16.06.2025
© Абедельмаксуд Т. Г., Хассан М. А., Ассоус М. Т. М., Халаф-Аллах А.Е. Р. М., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ ЧЕТЫРЕХ ЕГИПЕТСКИХ СОРТОВ ФИНИКОВ

Абедельмаксуд Т. Г.[1]*, Хассан М. А.[1,2], Ассоус М. Т. М.[2], Халаф-Аллах А. Е. Р. М.[1]

[1] Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет
[2] Центральная лаборатория исследований и разработок финиковой пальмы, Центр сельскохозяйственных исследований, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
летучие соединения, сорта фиников, ТФМЭ, ГХ–МС анализ

АННОТАЦИЯ

Летучие соединения играют важную роль в удовлетворенности потребителей и влияют на дальнейшее потребление фиников. Таким образом, в данном исследовании были проанализированы летучие соединения трех сортов фиников: Barhy, Samani, Zaghloul на стадии халал (полный цвет) и Siwi на стадии тамр (полностью спелое подсушенное состояние) с использованием твердофазной микроэкстракции (ТФМЭ) в сочетании с газовой хроматографией-масс-спектрометрией (ГХ–МС). Всего было идентифицировано 69 соединений, включая альдегиды, спирты, сложные эфиры, терпеноиды, кетоны, углеводороды, алканы и эфиры. Финики сорта Barhy характеризовались высоким содержанием альдегидов, насыщенных углеводородов, летучих веществ, эфиров, кетонов и эфиров. Финики сорта Zaghloul в основном содержали альдегиды, простые эфиры и кетоны, в то время как финики сорта Samani были богаты кетонами, альдегидами, сложными эфирами и эфирами. Ключевые соединения, такие как β-(Z)-2-бутенал и β-метилионон, были идентифицированы как важные факторы, способствующие формированию характерных ароматов этих сортов фиников. В частности, сорт фиников Siwi продемонстрировал характерный профиль с выраженными эфирами, альдегидами, кетонами и сложными эфирами. Сорт фиников Siwi содержал наибольшее количество вкусовых соединений (48), за ним следовали сорта Zaghloul (25), Barhy (20) и Samani (19). Этот всесторонний анализ выявил сложный и разнообразный ароматический профиль среди сортов фиников, причем каждый сорт вносит свой вклад в уникальные органолептические характеристики. Результаты дают ценную информацию о профилях летучих соединений в сортах египетских фиников, определяя потенциальные пути производства продуктов, полученных из фиников, и оптимизируя их применение в перерабатывающей промышленности.

1. Introduction

The date palm (*Phoenix dactylifera* L.) is one of the most important fruit crops cultivated in arid and semi-arid regions, particularly in the Middle East and North Africa. Egypt ranks among the world's top producers, contributing approximately 1.7 million tons annually, making date palm cultivation a cornerstone of the country's agricultural sector and rural economy [1]. The fruit's resilience to high temperatures, low humidity, and limited water availability renders it highly suitable for desert agriculture, which is critical under current and projected climate change scenarios. Dates are nutritionally substantial, offering a rich matrix of macronutrients and micronutrients. They contain 40–80% sugars — mainly glucose, fructose, and sucrose — depending on cultivar, ripening stage, and environmental factors [2]. In addition to their high sugar content, dates provide significant amounts of dietary fiber, proteins, fats, vitamins, minerals (particularly potassium, magnesium, and calcium), and bioactive compounds including phenolic acids and carotenoids,

FOR CITATION: **Abedelmaksoud, T. G., Hassan, M.A., Assous, M. T. M., Khalaf-Allah, A. E. R. M.** (2025). Profiling of volatile compounds in four Egyptian date cultivars. *Food Systems,* 8(2), 252–259. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-252-259

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Абедельмаксуд, Т. Г., Хассан, М. А., Ассоус, М. Т. М., Халаф-Аллах, А. Е. Р. М.** (2025). Профилирование летучих веществ четырех египетских сортов фиников. *Пищевые системы*, 8(2), 252–259. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-252-259

which contribute to their antioxidant and health-maintaining properties [3]. These attributes make dates a functional food with potential roles in glycemic regulation, cardiovascular health, and anti-inflammatory activity. In Egypt, soft varieties such as Barhi, Samani, and Zaghloul prevail in production (52 %), followed by semi-dry cultivars like Siwi (20 %), with smaller contributions from dry (3 %) and seed (25 %) dates [2]. The fruit is harvested at different ripeness stages: khalal (full size, full color, but still firm), rutab (soft and ripe), and tamr (fully ripe and dried). These stages significantly influence the chemical composition, sensory characteristics, and postharvest dynamics of the fruit condition [3]. Aroma is one of the most critical sensory attributes affecting consumers' preference, marketability, and product value. The peculiar aroma of dates arises from a complex mixture of volatile organic compounds (VOCs), including alcohols, aldehydes, esters, ketones, acids, hydrocarbons, and terpenoids [4,5]. These volatiles are biosynthesized during ripening and are further influenced by postharvest handling and processing. Reducing sugars such as glucose and fructose serve as precursors in Maillard reaction and enzymatic reactions, contributing to the generation of aroma-active compounds during thermal treatments and natural maturation. Despite their importance, the volatile profiles of Egyptian date varieties remain underexplored. Most available studies have focused on the cultivars from Tunisia, Saudi Arabia, or Algeria [3,4], with limited application of advanced analytical techniques to Egyptian varieties. Conventional extraction techniques, such as steam distillation or solvent extraction, often compromise the volatile integrity due to thermal degradation or solvent interference [6]. In contrast, solid-phase microextraction (SPME) has emerged as a preferred, solvent-free method that offers high sensitivity and selectivity in the extraction of the VOCs. When combined with gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS), SPME allows comprehensive qualitative and quantitative profiling of complex volatile mixtures in fruits [7]. Recent studies that have used the combined SPME-GC–MS method have reported significant differences in the volatile composition of date fruits based on their cultivar and ripening stage. For instance, Bouguedoura et al. [8] identified 69 volatile compounds across three Tunisian date cultivars at different ripeness levels, observing dynamic shifts in volatile abundance: alcohols and aldehydes predominated at the besser (early) stage, while esters and ketones increased at the rutab and tamr stages. Similarly, Saafi et al. [3] reported that alcohols, aldehydes, and hydrocarbons constituted the major chemical classes in Tunisian varieties, while others, such as terpenoids, contributed to floral and fruity notes. Furthermore, few studies have explored VOC changes in date-derived processed food products. For example, Saafi et al. [3] analyzed the date bars enriched with cereals and legumes and identified 32 aroma compounds that included alcohols, aldehydes, terpenoids, and esters, suggesting that processing can significantly alter the volatile compounds composition. This underlines the importance of understanding how thermal and mechanical processing influences the aroma profile, particularly in the context of value-added products like syrups, bars, powders, and vinegars. Nowadays there remains a clear knowledge gap concerning the aroma chemistry and volatile compounds profiles of Egyptian date cultivars, especially at critical ripening stages. Understanding these profiles is essential not only for ensuring high product quality and consumers' satisfaction but also for cultivar authentication, breeding programs, and postharvest management. Therefore, the present study aims to comprehensively identify and compare the volatile compounds profiles of selected Egyptian date fruits — specifically soft varieties (Barhi, Samani, and Zaghloul) at the khalal stage and the semi-dry variety (Siwi) at the tamr stage-using SPME combined with GC–MS. This research will contribute to filling in the existing gap in the specialised literature regarding Egyptian dates' flavor chemistry and provide valuable insights for the development of premium date products and aroma-focused programs of selection and breeding.

2. Objects and methods

2.1. Date fruits

Egyptian date varieties Barhy, Samani, and Zaghloul at the khalal stage of ripeness (complete colour) were obtained from a private farm in Giza governorate, Egypt. Siwi dates at the tamr stage of ripeness were obtained from a private farm, Dakhla Oasis, New Valley Governorate, Egypt. Date fruits were obtained during the 2022 and 2023 seasons.

2.2. Date samples preparation

The date samples were cut and finely ground. A 50 g portion of the sample was then placed into a 100 ml glass vial, and sodium chloride (150 g/kg of the sample) was added to promote the release of volatiles in the headspace and inhibit enzymatic degradation [9]. The vial was subsequently incubated (Labnet Mini Incubator I5110Aocated in: Union Point, GA, United States) at 50 °C for 30 minutes to facilitate the extraction of volatile compounds [10].

2.3. Extraction of volatile components by solid-phase micro extraction (SPME)

Headspace sampling was performed using Solid Phase Microextraction (SPME) devices (Supelco, Bellefonte, PA, USA) equipped with a 100 µm polydimethylsiloxane (PDMS) coating. A single process, with new fibre — preconditioned according to the manufacturer's instructions — was implemented throughout all analyses to ensure consistency. The sampling process was carried out in a temperature-controlled environment maintained at 22 ± 1 °C to provide uniform experimental conditions. Following sample equilibration, the SPME fibre was exposed to the headspace for 50 minutes. Upon completion, the fibre was retracted into its needle and immediately introduced into the injection port of the GC–MS system. All SPME sampling and desorption conditions were maintained consistently across all samples. Blank runs were performed prior to the first extraction and were randomly repeated within each experimental series. Relative peak areas of identical compounds were quantitatively compared with different samples [10,11].

Analysis of volatile compounds

After extraction, the desorption of volatile compounds from the fiber was performed in the injection port of a gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS) system (Agilent 8890 GC System), combined with a mass spectrometer (Agilent 5977B GC/MSD). The system was equipped with an HP-5MS fused silica capillary column (30 m length, 0.25 mm internal diameter, and 0.25 µm film thickness). The injection temperature was set to 240 °C. Mass spectra were recorded in electron impact (EI) mode at 70 eV, scanning a mass-to-charge (m/z) range from 39 to 500 amu. The isolated peaks were identified by comparing them to reference data obtained from the National Institute of Standards and Technology (NIST) (USA) mass spectral library [12].

3. Results and discussion

3.1. Volatile compounds profile of Barhy date

The chromatogram for Barhi dates, presented in the Figure 1 and detailed in the Table 1, highlights 20 key volatile compounds that contribute to the distinctive aroma profile of this date variety. The data provides insights into retention times (RT), area percentages, and relative retention times (RRT), each reflecting the prominence and characteristics of the identified compounds. These volatile compounds collectively shape the complex sensory attributes of Barhi variety dates. (Z)-2-Butenal emerged as the dominant compound with an area summation of 46.46 %, detected at an RT of 2.772 minutes (RRT = 1.000). This aldehyde, known for its pungent and suffocating odor, is commonly used in the production of pharmaceuticals, perfumes, and plastics. Other aldehydes, such as nonanal (RT = 21.666 minutes, RRT = 7.814, area = 7.22 %) and decanal (RT = 26.639 minutes, RRT = 9.612, area = 6.13 %), impart fatty, citrus-like,

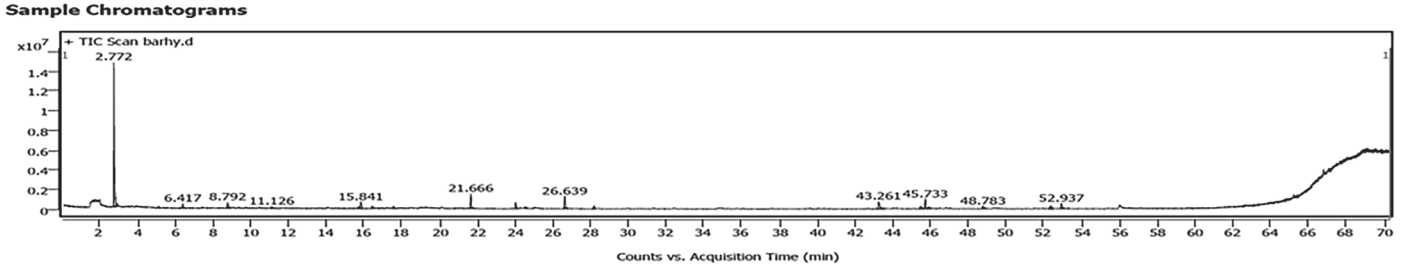


Figure 1. **Chromatogram of Barhy date sample obtained by Counts vs. Acquisition time (min)**

Рисунок 1. **Хроматограмма образца финика сорта Barhy, полученная методом подсчета частиц в зависимости от времени их обнаружения (мин)**

Table 1. **Volatile compounds in Barhy Date**
Таблица 1. **Летучие соединения в составе финика Barhy**

Peak No.	Component name	RT (min)	Area summation (%)	RRT
1	(Z)-2-b utenal	2.772	46.46	1.000
2	5,7-dodecadiyn-1,12-diol	5.135	0.61	1.852
3	Hexanal	6.417	1.62	2.315
4	(E)-2-hexenal	8.792	3.09	3.172
5	Heptanal	11.126	0.78	4.015
6	Oktamethylcyklotetrasiloxan	15.841	5.15	5.715
7	Octanal	16.448	1.48	5.933
8	β-Terpinyl acetate	17.581	0.91	6.342
9	Nonanal	21.666	7.22	7.814
10	p-Menthan-3-one	24.035	3.02	8.673
11	Isomenthone	24.567	0.75	8.859
12	Decanal	26.639	6.13	9.612
13	Pulegone	28.189	1.45	10.173
14	Diethyl phthalate	43.261	6.04	15.603
15	Patchouli alcohol	45.487	1.83	16.408
16	β-methylionone	45.733	5.26	16.492
17	-(1,3-dimethylbuta-1,3-dienyl)-1,6,6-trimethyl-3,8-dioxatricyclo[5.1.0.0(2,4)] octane	45.933	0.96	16.563
18	α-hexylcinnamaldehyde	48.783	1.95	17.603
19	Galaxolide	52.382	2.38	18.899
20	Phthalic acid, isobutyl octyl ester	52.937	2.90	19.092

Retention Time (RT); Relative Retention Time (RRT)

and waxy scents that enhance the aroma profile. Ketones also play a significant role, with β-methylionone (RT = 45.733 minutes, RRT = 16.492) contributing 5.26 % to the area. Its violet-like floral fragrance adds a sophisticated floral note to the sensory profile. Additionally, compounds such as octamethylcyclotetrasiloxane (RT = 15.841 minutes, RRT = 5.715, area = 5.15 %) subtly enhance the aroma with their volatility. Aldehydes like (E)-2-hexenal (RT = 8.792 minutes, RRT = 3.172, area = 3.09 %) provide fresh, green, and fruity notes that remind of freshly cut grass, while hexanal (RT = 6.417 minutes, RRT = 2.315, area = 1.62 %) adds a distinct grassy scent. Spicy and warm notes were identified in α-hexylcinnamaldehyde (RT = 48.783 minutes, RRT = 17.603, area = 1.95 %), contributing to the aromatic complexity. Esters such as diethyl phthalate (RT = 43.261 minutes, RRT = 15.603, area = 6.04 %) and phthalic acid, isobutyl octyl ester (RT = 52.937 minutes, RRT = 19.092, area = 2.90 %) were also detected, adding subtle aromatic elements. The floral, fruity, and waxy characteristics of these compounds balance the aroma profile. This volatile profile aligns with findings by Narain [13], who identified a variety of esters (23 %), alcohols (17 %), aldehydes (15 %), lactones (8 %), and ketones (3.5 %) in date palm fruit pulp. The inclusion of RRT values in the current study further strengthens the reliability of compound identification and ensures consistency in comparing chromatographic data across different studie.

3.2. Volatile compounds profile of Zaghloul date

The chromatogram for Zaghloul dates, as shown in the Figure 2 and detailed in the Table 2, reveals the key volatile compounds that contribute to the aroma profile of these dates. The analysis identifies 25 compounds, each playing a distinct role in shaping the scent of Zaghloul dates. Below is a breakdown of the primary compounds, including their retention times (RT) and associated aromatic characteristics, diethyl phthalate: detected at 43.255 minutes with an area sum of 14.28 %, this ether features slight aromatic odor. It is commonly found in personal care products such as perfumes and hair sprays, where it helps dissolve and stabilize other ingredients. Nonanal: appearing at 21.649 minutes with a presence of 12.77 %, nonanal is an aldehyde with a fatty, citrus-like, and somewhat floral aroma, providing a strong waxy, citrus scent to the dates. (Z)-2-butenal: detected at 2.594 minutes with an area percentage of 10.6 %, this aldehyde is commonly used as an intermediate in the production of pharmaceuticals, perfumes, and plastics. β-methyl ionone: appearing at 45.733 minutes with a 10.31 % presence, this ketone has a floral, violet-like fragrance with woody undertones, adding a sophisticated floral note to the date's aroma. 2-(2-hydroxypropoxy)-1-propanol: found at 18.834 minutes, this ether, accounting for 6.7 % of the area, may be used in formulations requiring both solvent and moisturizing properties.

Table 2. **Volatile Compounds Profile of Zaghloul Date**
Таблица 2. **Профиль летучих соединений в финиках сорта Zaghloul**

Peak No.	Component name	RT (min)	Area summation (%)	RRT
1	Methyl formate	2.526	1.39	1.000
2	(Z)-2-butenal	2.594	10.6	1.027
3	Benzyl isopentyl ether	4.952	0.57	1.960
4	Hexanal	6.257	1.66	2.477
5	(E)-2-hexenal	8.694	0.85	3.442
6	Heptanal	11.040	1.82	4.370
7	Octanal	16.396	2.10	6.492
8	β-terpinyl acetate	17.546	2.20	6.947
9	p-hydroxybenzaldehyde	18.342	1.47	7.263
10	2-(2-hydroxypropoxy)-1-propanol	18.834	6.70	7.456
11	1-propanol, 2,2'-oxybis-	19.114	5.58	7.568
12	Citronellol hydrate	20.092	1.38	7.956
13	Nonanal	21.649	12.77	8.570
14	Cycloheptatrienone	23.806	1.21	9.426
15	p-menthan-3-one	24.023	3.35	9.511
16	Decanal	26.633	4.32	10.546
17	Pulegone	28.195	0.95	11.164
18	Diethyl phthalate	43.255	14.28	17.119
19	β-acorenol	44.045	0.87	17.433
20	Patchouli alcohol	45.493	3.60	18.020
21	β-methylionone	45.733	10.31	18.108
22	2-(4a,8-dimethyl-6-oxo-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydro-2-naphthalenyl)propanal	45.939	1.69	18.191
23	α-hexylcinnamaldehyde	48.777	5.36	19.321
24	Isopropyl myristate	51.529	0.95	20.391
25	Galaxolide	52.393	4.03	20.747

Retention Time (RT); Relative Retention Time (RRT)

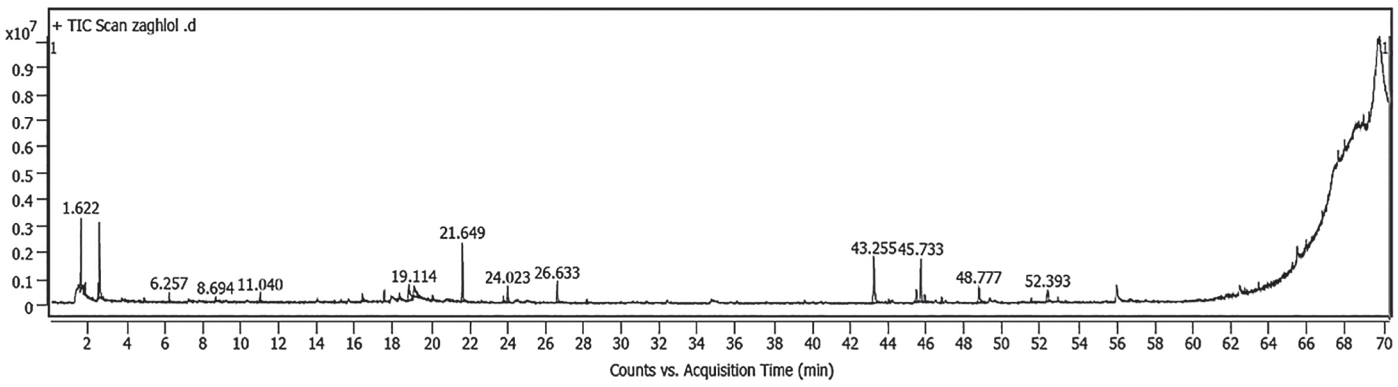


Figure 2. **Chromatogram of Zaghloul date sample obtained by Counts vs. Acquisition time (min)**
Рисунок 2. **Хроматограмма образца финика сорта Zaghloul, полученная методом подсчета частиц в зависимости от времени их обнаружения (мин)**

1-propanol, 2,2'-oxybis: detected at 19.114 minutes with a 5.58% area sum, this ether is used in industrial applications such as the production of plasticizers and hydraulic fluids. It also serves as a moisturizer in cosmetics, helping to retain moisture.

α-hexylcinnamaldehyde: detected at 48.777 minutes with a presence of 5.36%, this aldehyde has a sweet, floral, and slightly spicy aroma reminiscent of jasmine. It is used in the flavor industry to impart a mild, spicy, and floral taste. Decanal, detected at 26.633 minutes with a presence of 4.32%, this aldehyde also contributes a waxy, citrus scent, enhancing the overall aromatic complexity. Galaxolide: observed at 52.393 minutes with a 4.03% presence, Galaxolide is used in various cosmetic products for its long-lasting musky fragrance, often used in perfumes, body sprays, and deodorants. p-menthan-3-one: observed at 24.023 minutes withan area sum of 3.35%, this ketone has a minty odor similar to menthol, though less intense.

Heptanal: observed at 11.040 minutes, heptanal is an aldehyde with a fatty, slightly pungent, and fruity aroma, contributing 1.82% to the sensory profile. It is utilized in the flavor and fragrance industries to enhance the overall aroma of the dates. Hexanal: appearing at 6.257 minutes, hexanal is an aldehyde with a pungent, grassy odor. It is often used as a flavoring agent in the food industry due to its fresh aroma, contributing 1.66% to the aroma profile with a distinctive green, grassy note.

(E)-2-hexenal: detected at 8.694 minutes with an area sum of 0.85%, this aldehyde has a strong, fresh, and slightly fruity odor reminiscent of freshly cut grass. It is used in perfumes, colognes, and cosmetic products, adding a fresh, green note to the dates' scent. It is widely used in the flavor and fragrance industry, making it suitable for products like perfumes, soaps, and oral care items. This chromatogram provides a comprehensive overview of the volatile compounds that contribute to the distinctive aroma of Zaghloul dates. Each compound adds a unique element, creating a complex and multifaceted sensory experience associated with these dates.

3.3 Volatile compounds profile of Samani date

The chromatogram for Samani dates, as depicted in the Figure 3 and detailed in the Table 3, reveals the key volatile compounds that contribute to the aroma profile of these dates. It shows the results of the presence of 19 compounds responsible for the distinctive odour of the Samani. The analysis focuses on the retention times (RT) and specific aromatic characteristics of each compound. **(Z)-2-butenal detected** at 69.571 minutes with an area percentage of 38.64%, this aldehyde is commonly used as an intermediate in the production of pharmaceuticals, perfumes, and plastics. It covers the highest percentage in this date variety. It is also used as an excipient in pharmaceutical preparations, contributing to the formulation of various medications. Found at 56.141 minutes, **β-Methylionone** is a ketone belonging to the ionone family. There is 23.67%, it has a floral, violet-like fragrance with woody undertones, adding a sophisticated and aromatic note to the Samani dates. β-terpinyl acetate, observed at 65.239 minutes, is an ether with a slightly aromatic odor. It plays a crucial role in diluting and stabilizing other compounds in cosmetics, such as hair sprays, perfumes, it features a pleasant, fruity, sweet, and floral scent, often similar to lavender or lilac. This compound is used as a flavouring agent in food and beverages, imparting a fruity and floral taste which is 7.08%.1-propanol, 2,2'-oxybis-observed at 66.813, it is esters 5.58%. Flavoring agent, due to its fruity smell, it is occasionally used as a flavoring agent in some food products. Methyl formate, detected at 68.673 minutes with 4.97%, is responsible for the distinctive smell, this aldehyde also contributes a waxy, citrus scent, enhancing the overall aromatic complexity. Detected at 49.441 minutes, **α-hexylcinnamaldehyde** is an aldehyde with a sweet, floral, and slightly spicy aroma reminiscent of jasmine or other white flowers. In the taste sector, it is used to add a subtle, peppery, and floral flavor to food and beverages, enhancing the sensory experience of Samani variety dates with 4.74%. Phthalic acid, isobutyl octyl ester is observed at 52.926 minutes, this is an ester with a faint, distinctive odor. It is used in industrial applications to improve the flexibility and durability of coatings, adhesives, and sealants. This compound also contributes to the overall aroma profile of Samani variety dates. **p-menthan-3-one,** detected at 26.461 minutes, is a ketone with a pleasant minty odour. It is widely used in the flavor and fragrance industries for its refreshing scent, similar to menthol but less intense. With a presence of 0.78%, this compound is used in the production of cosmetics, soaps, and fragrances, and also serves as a flavouring additive in food products, beverages, and oral care products such as mouthwash and toothpaste. Additionally, it is found in essential oils and is utilized in aromatherapy for its calming and soothing properties. The chromatogram analysis of Samani variety dates illustrates a diverse range of volatile compounds, each uniquely contributing to the overall aromatic profile. From minty and floral notes to faint esters and ethers, these compounds collectively enhance the sensory appeal of Samani variety date.

Table 3. **Volatile compounds profile of Samani date**

Таблица 3. **Профиль летучих веществ в финиках сорта Samani**

Peak No.	Component name	RT (min)	Area summation (%)	RRT
1	p-Menthan-3-one	26.461	0.78	1.000
2	Decanal	26.633	0.62	1.006
3	α-hexylcinnamaldehyde	49.441	4.74	1.868
4	Isopropyl myristate	51.924	0.68	1.962
5	Galaxolide	52.777	1.63	1.995
6	Phthalic acid, isobutyl octyl ester	52.926	3.33	2.000
7	Diethyl phthalate	53.921	0.48	2.038
8	Patchouli alcohol	54.82	1.57	2.072
9	Nonanal	55.369	2.53	2.092
10	β-methylionone	56.141	23.67	2.122
11	Pulegone	57.126	1.05	2.159
12	Octanal	60.233	0.87	2.276
13	Hexanal	62.396	0.69	2.358
14	(E)-2-hexenal	64.101	0.62	2.422
15	Heptanal	64.702	0.49	2.445
16	β-terpinyl acetate	65.239	7.08	2.465
17	1-propanol, 2,2'-oxybis-	66.813	5.58	2.525
18	Methyl formate	68.673	4.97	2.595
19	(Z)-2-butenal	69.571	38.64	2.629

Retention Time (RT); Relative Retention Time (RRT)

3.4. Volatile compounds profile of Siwi date

The chromatogram of the Siwi date sample, presented in the Table 4 and illustrated in the Figure 4, reveals the key compounds responsible for the distinct aroma of Siwi dates and their respective retention times (RT) and area summation%. The graph depicts the prominence and timing of these volatile compounds acquisition, each uniquely contributing to the date's aromatic profile. Methyl formate appeared first on the chromatogram with a retention time of 3.167 minutes and a substantial area percentage of 9.84%. This compound, categorized among pleasant-smelling

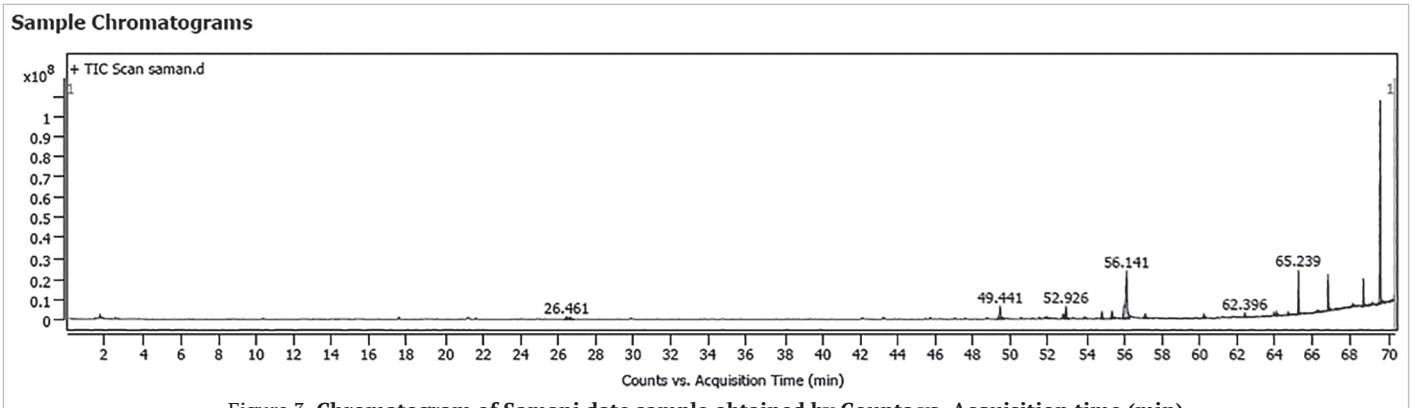


Figure 3. **Chromatogram of Samani date sample obtained by Counts vs. Acquisition time (min)**

Рисунок 3. **Хроматограмма образца финика сорта Samani, полученная методом подсчета частиц в зависимости от времени их обнаружения (мин)**

Table 4. **Volatile compounds profile of Siwi Date**

Таблица 4. **Профиль летучих веществ фиников сорта Siwi**

Peak No.	Component name	RT (min)	Area summation (%)	RRT
1	Benzene	2.675	4.24	1.000
2	Methyl formate	3.167	9.84	1.184
3	Benzyl carbazate	4.466	2.05	1.670
4	3-hexanone	4.895	0.64	1.831
5	2-hexanone	5.004	1.42	1.871
6	Hexanal	5.261	4.05	1.967
7	Hexamethylcyclotrisiloxane	6.36	2.88	2.378
8	p-xylene	7.533	0.91	2.816
9	2-Methyl-1-nonene	7.67	1.41	2.868
10	3-heptanone	8.277	3.86	3.095
11	5-methyl-2-hexanone	8.454	1.41	3.162
12	5-methyl-3-hexanol	8.683	1.26	3.247
13	Heptanal	8.86	0.66	3.313
14	Methyl N-hydroxybenzenecarboximidoate	9.747	16.76	3.643
15	1-ethyl-3-methylbenzene	11.418	1.07	4.270
16	Vanillin, tert-butyldimethylsilyl ether	11.601	1.93	4.336
17	1-Benzoylcyclohexanol	12.253	0.94	4.579
18	3-octenol	12.385	1.61	4.630
19	(+)-pinanediol	12.728	1.87	4.759
20	3-cyclohexene-1-propanal	12.86	2.43	4.808
21	Decane	13.232	0.68	4.946
22	p-cymene	14.353	0.63	5.367
23	Limonene	14.536	3.43	5.435
24	2-ethyl-1-hexanol	14.742	1.96	5.510
25	3-ethyl-3-heptanol	15.166	0.74	5.670
26	3-carene	16.013	0.46	5.986
27	Isophorone	16.081	1.75	6.011
28	Acetophenone	16.408	1.56	6.135
29	cis-4-tridecene	16.791	1.88	6.277
30	Di-n-decylsulfone	18.044	0.49	6.745
31	Nonanal	18.307	6.8	6.846
32	Phenylethyl alcohol	18.817	1.38	7.034
33	Ethyl [(trimethylsilyl)oxy] (4-[(trimethylsilyl)oxy]phenyl)acetate	19.206	0.66	7.182
34	Acetoxyacetic acid, nonyl ester	21.592	0.74	8.073
35	Decanal	23.125	3.93	8.650
36	β-cyclocitral	23.755	1.83	8.884
37	2-undecanone	27.171	0.73	10.161
38	Carvacrol	27.646	0.52	10.333
39	Geranyl acetone	33.98	0.95	12.707
40	trans-β-ionone	35.33	1.03	13.209
41	Diethyl phthalate	39.559	0.87	14.793
42	Hexadecane	39.651	0.92	14.828
43	Heptadecane	42.746	0.98	15.984
44	Farnesane	42.912	0.6	16.045
45	4-acetyl-2,2,3,7-tetramethyltricyclo(5.2.2.0(1,6))undec-3-ene	46.162	0.71	17.264
46	Phthalic acid, isobutyl octadecyl ester	47.032	0.52	17.585
47	Hexadecanoic acid, methyl ester	48.256	0.41	18.041
48	Hexadecanoic acid	48.88	1.61	18.275

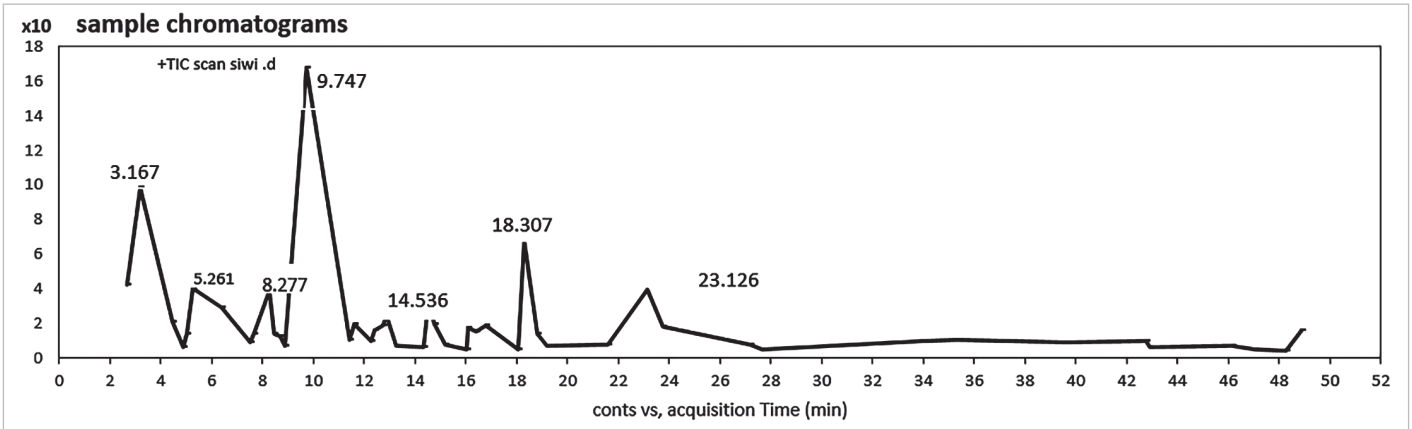


Figure 4. **Chromatogram of Siwi date sample obtained by Counts vs. Acquisition Time (min)**

Рисунок 4. **Хроматограмма образца финика сорта Siwi, полученная методом подсчета частиц в зависимости от времени их обнаружения (мин)**

esters, provides a light, ether-like aroma that is typically perceived as sweet and agreeable. The second significant compound, hexanal, was detected at 5.261 minutes with an area percentage of 4.05 %. As an aldehyde, hexanal contributes a robust herbal scent, often associated with the fresh, green aroma of floral material. Following hexanal, 3-heptanone was identified at 8.277 minutes, contributing 3.86 % to the total area. This ketone compound is known for its role in flavor and fragrance formulations, adding a subtle, fruity, and somewhat musty note to the aroma profile. Methyl N-hydroxybenzene carboximidoate appeared at 9.747 minutes with a significant area of 16.76 %. This ester compound is noted for its ester-like properties, which contribute to the overall aromatic complexity of Siwi dates. Nonanal, detected at 18.307 minutes, represented 6.8 % of the area. This aldehyde contributes a citrus-like scent with a strong waxy undertone, reminiscent of orange peel. Similarly, decanal, observed at 23.125 minutes with an area percentage of 3.93 %, added to the citrus and floral notes, enhancing the aromatic profile with its distinctive waxy and somewhat sweet aroma. Benzene was detected at 2.675 minutes, representing 4.24 of the area, but did not appear in the chromatogram of the Siwi variety date, it is an aromatic hydrocarbon. Comparison with previous studies by Jado et al. [14] and Reynes et al. [15] revealed that some similarities were observed with our history samples. Results are demonstrated when determining volatile compounds in the semi-dry date of Siwi cultivar using solid phase microextraction (SPME) and showed that the presence of 48 compounds by gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS). Each compound, from the ether-like aroma of methyl formate to the citrusy notes of nonanal and decanal, plays a critical role in defining the sensory characteristics of this date variety. It was [16] found that the ripening stages were a genetically regulated process in molecular and biochemical changes, that lead to change of physical characterize such as colour, softening and maturation of a characteristic aroma and flavour.

3.5. The comparison analysis of volatile compounds from four Egyptian date varieties

A total of 69 specific compounds were identified across these soft varieties (Barhi, Samani and Zaghloul) at khalal stage and semi-dry (Siwi) at tamr stage (Table 5). These volatile substances were classified into eight chemical classes: alcohols, esters, aldehydes, terpenoids, ketones, saturated hydrocarbons and unsaturated hydrocarbons, alkanes, and ethers. These compounds are often associated with date flavor profiles [17]. Identified alcohols: patchouli alcohol, found in all varieties, peaked in Zaghloul (3.6 %) and Samani (1.57 %). This compound imparts earthy and woody notes to the aroma [18]. Identified esters methyl formate is present in all varieties, and peaked in Siwi (9.84 %) and Samani (4.97 %) in

Table 5. **Volatile compounds in date varieties**

Таблица 5. **Содержание летучих веществ в сортах фиников**

Chemical classes	Volatile compound	Barhy	Zaghloul	Samani	Siwi
		Area summation (%)			
Alcohol	Patchouli alcohol	1.83	3.6	1.57	1.38
	Citronellol hydrate	0.00	1.38	0.00	0.00
	β- acorenol	0.00	0.87	0.00	0.00
	Benzyl carbazate	0.00	0.00	0.00	2.05
	5,7-dodecadiyn-1,12-diol	0.61	0.00	0.00	0.00
	5-methyl-3-hexanol	0.00	0.00	0.00	1.26
Esters	Isopropyl myristate	0.00	0.95	0.68	0.00
	Methyl formate	0.00	1.39	4.97	9.84
	Methyl N-hydroxybenzenecarboximidoate	0.00	0.00	0.00	16.76
	Ethyl [(trimethylsilyl)oxy](4-[(trimethylsilyl)oxy]phenyl)acetate	0.00	0.00	0.00	0.66
	Acetoxyacetic acid, nonyl ester	0.00	0.00	0.00	0.74
	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.00	0.00	0.00	0.41
	Phthalic acid, isobutyl octyl ester	2.9	00	3.33	0.52
Aldehyde	β-cyclocitral	0.00	0.00	0.00	1.83
	3-Cyclohexene-1-propanal	0.00	0.00	0.00	2.43
	(Z)-2-butenal	46.46	10.6	38.64	0.00
	Hexanal	1.62	1.66	0.69	4.05
	(E)-2-hexenal	3.09	0.85	0.62	0.00
	Heptanal	0.78	1.82	0.49	0.66
	Octanal	1.48	2.1	0.87	1.61
	Nonanal	7.22	12.77	2.53	6.8
	Decanal	6.13	4.32	0.62	3.93
	p-hydroxybenzaldehyde	0.00	1.47	0.00	0.00
	α-hexylcinnamaldehyde	1.95	5.36	4.74	0.00
	2-(4a,8-dimethyl-6-oxo-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydro-2-naphthalenyl)propanal	0.00	1.69	0.00	0.00
Terpenoids	3-carene	0.00	0.00	0.00	0.46
Ketones	Pulegone	1.45	0.95	1.05	0.00
	β-methyl ionone	5.26	10.31	23.67	0.00
	Cycloheptatrienone	0.00	1.21	0.00	0.00
	-(1,3-dimethylbuta-1,3-dienyl)-1,6,6-trimethyl-3,8 dioxatricyclo[5.1.0.0(2,4)]octane	0.96	0.00	0.00	0.00
	Isomenthone	0.75	0.00	0.00	0.00
	3-hexanone	0.00	0.00	0.00	0.64
	2-hexanone	0.00	0.00	0.00	1.42
	3-heptanone	0.00	0.00	0.00	3.86
	5-methyl-2-hexanone	0.00	0.00	0.00	1.41
	Isophorone	0.00	0.00	0.00	1.75
	Acetophenone	0.00	0.00	0.00	1.56
	2-undecanone	0.00	0.00	0.00	0.73
	Geranyl acetone	0.00	0.00	0.00	0.95
	trans-β-ionone	0.00	0.00	0.00	1.03
	p-menthan-3-one	3.02	3.35	0.78	0.00
Hydrocarbon	Hexadecane	0.00	0.00	0.00	0.92
	Benzene	0.00	0.00	0.00	4.24
	p-xylene	0.00	0.00	0.00	0.91
	p-cymene	0.00	0.00	0.00	0.63
	Limonene	0.00	0.00	0.00	3.43
	Okta methylcyklotetrasiloxan	5.15	0.00	0.00	0.00
	1-Ethyl-3-methylbenzene	0.00	0.00	0.00	1.07
	Farnesane	0.00	0.00	0.00	0.6
Hydroxyl	Hexamethylcyclotrisiloxane	0.00	0.00	0.00	2.88
	Vanillin, tert-butyldimethylsilyl ether	0.00	0.00	0.00	1.93
	1-Benzoylcyclohexanol	0.00	0.00	0.00	0.94
	(+)-pinanediol	0.00	0.00	0.00	1.87
	3-ethyl-3-heptanol	0.00	0.00	0.00	0.74
	Carvacrol	0.00	0.00	0.00	0.52
Alkene	4-acetyl-2,2,3,7-tetramethyltricyclo(5.2.2.0(1,6))undec-3-ene	0.00	0.00	0.00	0.71
Alkane	Decane	0.00	0.00	0.00	0.68
	cis-4-tridecene	0.00	0.00	0.00	1.88
	2-Methyl-1-nonene	0.00	0.00	0.00	1.41
Sraight-chain alkane	Heptadecane	0.00	0.00	0.00	0.98
Ether	1-propanol, 2,2'-oxybis-	0.00	5.58	5.58	0.00
	2-(2-Hydroxypropoxy)-1-propanol	0.00	6.7	0.00	0.00
	Diethyl phthalate	6.04	14.28	0.48	0.87
	β-terpinyl acetate	0.91	2.2	7.08	0.00
	Benzyl isopentyl ether	0.00	0.57	0.00	0.00
Saturated fatty acid	Hexadecanoic acid	0.00	0.00	0.00	1.61
Ethyl	2-ethyl-1-hexanol	0.00	0.00	0.00	1.96
Sulfone	Di-n-decyl sulfone	0.00	0.00	0.00	0.49
Other compounds	Galaxolide	2.38	4.03	1.63	0.00

Zaghloul 1.39. No results were shown in Barhi variety. The table shows that Barhi does not contain a single ester compound, which is phthalic acid, isobutyl octyl ester, representing 2.9%.

Identified aldehydes: (Z)-2-butenal, an aldehyde, was not detected in Siwi dates but had a notable presence in Barhy (46.46%) and Samani (38.64%) dates, with a moderate amount in Zaghloul (10.6%). Hexanal is another aldehyde observed in Siwi (4.05%), but is present in much smaller quantities in the other varieties. Hexanal contributes to the grassy and green aroma typical of many fruits [19]. Nonanal, a prominent aldehyde, showed the highest peak in Siwi (6.8%) and Barhy (7.22%) is associated with citrusy and floral aromas [20]. Zaghloul had a higher concentration (12.77%) than Samani (2.53%), thus suggesting a more pronounced citrus note in this variety.

Identified terpenoids group, it appears only in the Siwi variety through the 3-carene compound and represents a small amount, not exceeding 0.46%. Identified ketones: (E)-2-hexenal and heptanal, both aldehydes, were detected at lower levels across varieties, except for heptanal in Zaghloul variety (1.82%). Heptanal adds a fatty and waxy character to the aroma [21]. β-methyl ionone, a ketone, was notably higher in Samani (23.67%) compared to other varieties. This compound is known for its floral and woody notes and is often used in perfumery [22]. Pulegone, another ketone, was present in moderate amounts in Barhy (1.45%) and Samani (1.05%). It contributes minty and refreshing notes [22,23].

Identified hydrocarbons: benzene and limonene, both hydrocarbons, were detected in Siwi (4.24% and 3.43%, respectively). Limonene, in particular, is known for its citrus aroma and is commonly used in cleaning products and perfumes [24,25]. Vanillin, an aromatic compound, appeared in Siwi (1.93%) and it adds a sweet vanilla aroma, which is often valued in the flavour and fragrance industries [26].

Identified hydroxyl: hexamethylcyclotrisiloxane, vanillin, tert-butyldimethylsilyl ether 1 benzoylcyclohexanol Identified (+)-pinanediol, 3-ethyl-3-heptanol, carvacrol. It appears only in the Siwi variety, and its percentage does not exceed 3%. Identified diethyl phthalate, an ether, was prominent in Zaghloul (14.28%) and Barhy (6.04%), and it is known for its use as a plasticizer and its sweet, floral aroma [27,28]. Esters: methyl formate, found predominantly in Siwi (9.84%), it contributes a fruity aroma and is often used as a flavoring agent [29]. Identified phthalic acid, isobutyl octyl ester was notably present in Zaghloul (14.28%) but it is absent in other varieties. This ester typically has a sweet, fruity scent [30].

The data indicate distinct aroma profiles across the date varieties, while Siwi dates features higher concentrations of certain aldehydes and esters, contributing to their unique flavor profile. Barhy dates show a diverse range of compounds, including prominent aldehydes and ethers, while Samani dates are characterized by higher levels of ketones and alcohols. Zaghloul dates stand out with higher concentrations of certain esters and aldehydes, potentially offering a more complex aroma [30]. Identified profiling in 4 Egyptian date palm fruit varieties via SPME GC–MS showed that Siwi varieties exhibited the most distinct aroma among the studied date varieties. Understanding these volatile profiles is crucial for both flavor development and quality control in date production and processing, as they contribute significantly to the sensory attributes of the fruit.

4. Conclusion

A total of 69 compounds were identified, that included aldehydes, alcohols, esters, terpenoids, ketones, hydrocarbons, alkanes, and ethers in four Egyptian date fruit cultivars. The Siwi variety contained the highest number of flavor compounds (48), followed by Zaghloul (25), Barhy (20) and Samani (19). Notable compounds such as β-(Z)-2-butenal and β-methyl ionone were the significant contributors to the unique aroma of each date variety. The varied volatile profiles reveal complex aromatic characteristics that could facilitate the development of date-derived food products, improve quality control and optimize marketing strategies in the date industry.

REFERENCES

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). Climate-smart policies to enhance Egypt's agrifood system. FAO. Retrieved from https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/eec90055-7494-440e-ad53-1bc3663dc71b/content Accessed January 16, 2025.
2. Abedelmaksoud, T. G., Hassan, M. A., Assous, M., Khalaf-Allah, A. E. R. M. (2024). Overall quality characteristics of nectar produced by some date cultivars. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(11), 479–489. https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.260427.9140
3. Saafi, E.B., Amira, E.A., Chahdoura, H., Flamini, G., Lachheb, B., Ferchichi, A. et al. (2022). Nutritional properties, aromatic compounds and in vitro antioxidant activity of ten date palm fruit (Phoenix dactylifera L.) varieties grown in Tunisia. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences,* 58, Article e18871. https://doi.org/10.1590/s2175-97902020000318871
4. Amira, E.A., Saafi, E. B., Flamini, G., Issaoui, M., Ferchichi, A., Hammami, M. et al. (2012). Volatile and nonvolatile chemical composition of some date fruits (Phoenix dactylifera L.) harvested at different stages of maturity. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(3), 549–555. https://doi.org/10.1111/j.1365–2621.2011.02876.x
5. Ismail, W. M., Zayed, A., Ramadan, N. S., Sakna, S. T., Farag, M. A. (2025). GC–MS based nutritional and aroma profiling of date palm seeds collected from different Egyptian cultivars for valorization purposes. *Scientific Reports*, 15(1), Article 16531. https://doi.org/10.1038/s41598-025-00171-7
6. Kapadia, P., Newell, A. S., Cunningham, J., Roberts, M. R., Hardy, J. G. (2022). Extraction of high-value chemicals from plants for technical and medical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), Article 10334. https://doi.org/10.3390/ijms231810334
7. Agatonovic-Kustrin, S., Gegechkori, V., Kobakhidze, T., Morton, D. (2023). Solid-phase microextraction techniques and application in food and horticultural crops. *Molecules*, 28(19), Article 6880. https://doi.org/10.3390/molecules28196880
8. Bouguedoura, N., Bennaceur, M., Babahani, S., Benziouche, S. E. (2015). Date palm status and perspective in Algeria. Chapter in a book: Date Palm Genetic Resources and Utilization: Volume 1: Africa and the Americas, 125–168. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9694-1_4
9. Caleb, O. J., Opara, U. L., Mahajan, P. V., Manley, M., Mokwena, L., Tredoux, A.G.J. (2013). Effect of modified atmosphere packaging and storage temperature on volatile composition and postharvest life of minimally-processed pomegranate arils (cvs. 'Acco' and 'Herskawitz'). *Postharvest Biology and Technology*, 79, 54–61. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.01.006
10. Mezroua E, Y., Agli, A., Flamini, G., Boudalia, S., Oulamara, H. (2017). Aroma characterization of ripe date fruits (Phoemix dactylifera L.) from Algeria. *African Journal of Biotechnology*, 16(42), 2054–2061. https://doi.org/10.5897/AJB2017.16222
11. Pawliszyn, J. (2023). Evolution of the Fundamentals of Solid-phase Microextraction. Chapter in a book: Evolution of Solid Phase Microextraction Technology. Elsevier Science, 2023. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8369
12. Turan, M. S., McKay, K., Chang, D., Calik, C., Bassham, L., Kang, J. et al. (2021). Status report on the second round of the NIST lightweight cryptography standardization process. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2021. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8369
13. Narain, N. (2007). Volatile compounds in date palm fruit. *Acta Horticulturae*, 736, 261–266. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.736.24
14. Jado, A., Zotl, J. (1984). Quaternary Period in Saudi Arabia 2: Sedimentological, Hydrogeological, Hydrochemical, Geomorphological and Climatological Investigations in Western Saudi Arabia. Springer-Verlag, Vienna, 1984.
15. Reynes, M., Lebrun, M., Shaw, P. E. (1996). Identification of volatile date components and use of multivariate analysis to distinguish date varieties 1. *Journal of Food Quality*, 19(6), 505–514. https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1996.tb00445.x
16. Shahidi, F., Rubin, L.J., D'Souza, L.A., Teranishi, R., Ron G. Buttery, R.G. (1986). Meat flavor volatiles: A review of the composition, technique of analysis and sensory evaluation. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 24(2), 219–227. https://doi.org/10.1080/10408398609527435
17. Flowers, J. M., Hazzouri, K. M., Lemansour, A., Capote, T., Gros-Balthazard, M., Ferrand, S. et al. (2022). Patterns of volatile diversity yield insights into the genetics and biochemistry of the date palm fruit volatilome. *Frontiers in Plant Science,* 13, Article 853651. https://doi.org/10.5061/dryad.mw6m905z8
18. Hu, G., Peng, C., Xie, X., Zhang, S., Cao, X. (2017). Availability, pharmaceutics, security, pharmacokinetics, and pharmacological activities of patchouli alcohol. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017, Article 4850612. https://doi.org/10.1155/2017/4850612
19. Xiao, Z., Chen, H., Niu, Y., Zhu, J. (2021). Characterization of the aroma-active compounds in banana (Musa AAA Red green) and their contributions to the enhancement of sweetness perception. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(50), 15301–15313. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06434
20. Bickel Haase, T., Schweiggert-Weisz, U., Ortner, E., Zorn, H., Naumann, S. (2021). Aroma properties of cocoa fruit pulp from different origins. *Molecules*, 26(24), Article 7618. https://doi.org/10.3390/molecules26247618
21. Abbas, F., Zhou, Y., O'Neill Rothenberg, D., Alam, I., Ke, Y., Wang, H. C. (2023). Aroma components in horticultural crops: Chemical diversity and usage of metabolic engineering for industrial applications. *Plants,* 12(9), Article 1748. https://doi.org/10.3390/plants12091748
22. Vujanović, M. D., Đurović, S. D., Radojković, M. M. (2021). Chemical composition of essential oils of elderberry (Sambucus nigra L.) flowers and fruits. *Acta Periodica Technologica*, 52, 229–237. https://doi.org/10.2298/APT2152229V
23. Sotiropoulou, N. S., Xagoraris, M., Revelou, P. K., Kaparakou, E., Kanakis, C., Pappas, C. Tarantilis, P. (2021). The use of SPME-GC–MS IR and Raman techniques for botanical and geographical authentication and detection of adulteration of honey. *Foods,* 10(7), Article 1671. https://doi.org/10.3390/foods10071671
24. Anandakumar, P., Kamaraj, S., Vanitha, M. K. (2021). D-limonene: A multifunctional compound with potent therapeutic effects. *Journal of Food Biochemistry,* 45(1), Article e13566. https://doi.org/10.1111/jfbc.13566
25. Qiang, H., Wang, J., Liu, H., Zhu, Y. (2023). From vanillin to biobased aromatic polymers. *Polymer Chemistry*, 14(37), 4255–4274. https://doi.org/10.1039/D3PY00767G

26. Chai, Z., Bi, X., Jia, H. (2022). Use of typical wastes as biochars in removing diethyl phthalate (Det) from water. *Processes*, 10(7), Article 1369. https://doi.org/10.3390/pr10071369
27. Wallington, T. J., Hurley, M. D., Maurer, T., Barnes, I., Becker, K. H., Tyndall, G. S., Bilde, M. (2001). Atmospheric oxidation mechanism of methyl formate. *The Journal of Physical Chemistry A*, 105(21), 5146–5154. https://doi.org/10.1021/jp0041398
28. Baioumy, A.A., Abedelmaksoud, T.G. (2021). Quality properties and storage stability of beef burger as influenced by addition of orange peels (albedo). *Theory and Practice of Meat Processing*, 6(1), 33–38. https://doi.org/10.21323/2414-438X-2021-6-1-33-38
29. Huang, L., Zhu, X., Zhou, S., Cheng, Z., Shi, K., Zhang, C., Shao, H. (2021). Phthalic acid esters: Natural sources and biological activities. *Toxins*, 13(7), Article 495. https://doi.org/10.3390/toxins13070495
30. Khalil, M.N.A., Fekry, M.I., Farag, M.A. (2017). Metabolome based volatiles profiling in 13 date palm fruit varieties from Egypt via SPME GC–MS and chemometrics. *Food Chemistry,* 217, 171–181. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.089

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Tarek G. Abedelmaksoud, Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0110–144–12–80 E mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * corresponding author	**Абедельмаксуд Т. Г.** — адъюнкт-профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0110–144–12–80 E mail: tareekgamal_88@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7012-6667 * автор для контактов
Mennatalh A. Hassan, Researcher, The Central Laboratory of Date Palm Research and Development, Agricultural Research Center Giza, 12619, Egypt Tel.: +2–0106–130–80–83 E-mail: mennahakem27@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8863-956	**Хассан М. А.** — Научный сотрудник, Центральная лаборатория исследований и разработок финиковой пальмы, Центр сельскохозяйственных исследований 12619, Египет, Гиза Тел.: +2–0106–130–80–83 E-mail: mennahakem27@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8863-956
Mostafa T. M. Assous, Professor, The Central Laboratory of Date Palm Research and Development, Agricultural Research Center Giza, 12619, Egypt Tel.: +2–0100–314–80–85 E-mail: assous2010@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6266-8788	**Ассоус М. Т. М.** — профессор, Центральная лаборатория исследований и разработок финиковой пальмы, Центр сельскохозяйственных исследований 12619, Египет, Гиза Тел.: +2–0100–314–80–85 E-mail: assous2010@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6266-8788
Abd El-Rahman M. Khalaf-Allah, Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University Tel.: +2–0100–142–32–46 E-mail: Abdelrahman.khalafallah1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5502-1637	**Халаф-Аллах А. Е. Р. М.** — профессор, Кафедра науки о питании, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0100–142–32–46 E-mail: Abdelrahman.khalafallah1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5502-1637
Contribution	**Критерии авторства**
Authors are equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism	Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат
Conflict of interest	**Конфликт интересов**
The authors declare no conflict of interest.	Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-260-266

Поступила 10.02.2025
Поступила после рецензирования 09.06.2025
Принята в печать 11.06.2025
© Соколова Д. В., Соловьева А. Е., 2025
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

БИОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАЯ ИЗ ЛИСТЬЕВ АМАРАНТА (*AMARANTHUS CRUENTUS* L.) СОРТА «ФРАНТ»

Соколова Д. В.*, Соловьева А. Е.

Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
амарант, биохимический состав, антиоксидантная активность, аскорбиновая кислота, лютеин, углеводы

АННОТАЦИЯ

Чай и различные чайные сборы всегда являлись популярными продуктами, богатыми антиоксидантами. Амарант считается «суперпродуктом» благодаря содержанию высококачественного безглютенового белка, ненасыщенных жирных кислот, витаминов и минералов. Богатые амарантином листья краснокрашенных сортов *Amaranthus cruentus* L. являются прекрасным сырьем для производства чайных напитков. Целью настоящей работы явилось сравнительное изучение биохимического состава и антиоксидантной активности чая из листьев амаранта сорта «Франт», приготовленного с помощью ферментации. Впервые установлено содержание ценных биохимических веществ в чайном напитке из амаранта — аскорбиновой кислоты, хлорофиллов, каротиноидов и лютеина, являющихся сильными антиоксидантами, необходимыми для здоровья человека. Определено содержание хлорофиллов (540,14–567,65 мг/100 г), каротиноидов (116,62–127,64 мг/100 г), амарантина (44,61–54,18 мг/100 г). В процессе ферментации происходило достоверное увеличение аскорбиновой кислоты, лютеина и общей кислотности. Анализ содержания низкомолекулярных компонентов углеводного профиля показал достоверное снижение сахарозы, рафинозы и моносахарида альтрозы, а также увеличение глюкозы и рибозы. В составе кислот определено 28 соединений, среди которых преобладают неорганическая фосфорная кислота и органические кислоты: янтарная и глицериновая. Установлено, что в процессе ферментации, сопровождающемся повышением общей кислотности, снижается содержание углеводов, что способствует уменьшению сладости вкуса чая. Выявлены факторы, сопряженные с антиоксидантной активностью амарантового чая. Пользу чайного продукта из амаранта подтверждает высокое содержание кверцетина, феруловой и эллаговой кислот. Выявленные корреляции имеют теоретическую и практическую значимость для понимания процессов, происходящих при ферментации листьев амаранта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена по теме НИР FGEM-2022-0003 «Мировые ресурсы овощных и бахчевых культур коллекции ВИР: эффективные пути раскрытия эколого-генетических закономерностей формирования разнообразия и использования селекционного потенциала».

Received 10.02.2025
Accepted in revised 09.06.2025
Accepted for publication 11.06.2025
© Sokolova D. V., Solovyeva A. E., 2025
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF TEA FROM AMARANTH LEAVES (*AMARANTHUS CRUENTUS* L.) OF THE 'FRANT' VARIETY

Diana V. Sokolova*, Alla E. Solovyeva

N. I Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

KEY WORDS:
amaranth, biochemical composition, antioxidant activity, ascorbic acid, lutein, carbohydrates

ABSTRACT

Tea and various tea beverages have always been popular products rich in antioxidants. Amaranth is considered a "super product" due to the content of high-quality gluten-free protein, unsaturated fatty acids, vitamins and minerals. The leaves of the red-colored varieties of *Amaranthus cruentus* L., rich in amaranthine, are an excellent raw material for the production of tea beverages. The purpose of this study was comparative investigation of the biochemical composition and antioxidant activity of tea from amaranth leaves of the 'Frant' variety prepared both with and without fermentation. For the first time, the content of valuable biochemical substances in a tea drink made from amaranth has been established: ascorbic acid, chlorophylls, carotenoids and lutein, which are strong antioxidants and necessary for human health. The composition of tea has a high content of chlorophylls (540.14–567.65 mg/100g), carotenoids (116.62–127.64 mg/100g), and amaranthine (44.61–54.18 mg/100g). During fermentation, there was a significant increase in ascorbic acid, lutein and total acidity. Analysis of the content of low-molecular-weight components of the carbohydrate profile showed a significant decrease of sucrose, raffinose and monosaccharide altrose and an increase in glucose and ribose. The composition of the acids included 28 compounds with a predominance of inorganic phosphoric acid and organic acids: succinic and glyceric. It has been established that during the fermentation process accompanied by an increase in total acidity, the carbohydrate content decreases, which leads to a decrease in the sweet taste of tea. Factors associated with the antioxidant activity of amaranth tea were identified. The benefit of amaranth tea is confirmed by the significant presence of quercetin, ferulic and ellagic acids. The identified correlations are of theoretical and practical importance for understanding the processes occurring during the fermentation of amaranth leaves.

FUNDING: The study was carried out within the framework of the research work FGEM-2022-0003 "World resources of vegetable and melon crops of the VIR collection: effective ways to identify ecological and genetic patterns of diversity formation and use of breeding potential".

1. Введение

Среди научного сообщества возрастает интерес к лечебно-профилактическим средствам растительного происхождения, что объясняется широким спектром их биологической активности и безвредностью. Относительно новая для сельского хозяйства в РФ культура амаранта (*Amaranthus* L.) представляет особый интерес в связи с содержанием полноценного белка в семенах и листовой биомассе, а также благодаря уникальному аминокислотному соста-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Соколова, Д. В., Соловьева, А. Е.** (2025). Биохимическая характеристика чая из листьев амаранта (*Amaranthus cruentus* L.) сорта «Франт». *Пищевые системы*, 8(2), 260–266. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-260-266

FOR CITATION: **Sokolova, D. V., Solovyeva, A. E.** (2025). Biochemical characteristics of tea from amaranth leaves (*Amaranthus cruentus* L.) of the 'Frant' variety. *Food Systems*, 8(2), 260–266. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-260-266

ву [1,2]. Высокая пищевая ценность обусловлена сбалансированным содержанием белков, жиров и углеводов, микроэлементов и минералов, таких как бета-каротин, железо, кальций, витамин С, фолиевая кислота и др. [3,4]. По способу использования культивируемые виды амаранта подразделяют на пищевые (овощные и зерновые) и кормовые. Также известно применение культуры в медицине, в ландшафтном озеленении [5,6]. Упоминается новаторский метод создания строительных панелей из стеблей амаранта [7]. Менее известно изготовление чая из листьев амаранта. Богатые амарантином листья краснокрашенных сортов *Amaranthus cruentus* L. являются прекрасным сырьем для производства чайных напитков, обладающих терапевтическим и профилактическим эффектом.

Содержащийся в амаранте пигмент бордового цвета амарантин относится к группе беталаинов — водорастворимых, азотсодержащих тирозин-производных пигментов, характерных для растений только одного порядка Caryophyllales, который никогда не идентифицируется в одном растении с антоцианами [8]. Беталаины присутствуют главным образом в таких продуктах, как свекла, амарант, плоды опунции. Многочисленными медицинскими исследованиями подтверждено их положительное влияние на здоровье человека [9]. Авторами отмечены противовоспалительные, антиканцерогенные и антиоксидантные свойства [10,11]. Благодаря содержанию в листьях краснокрашенных сортов амаранта амарантина и богатому биохимическому составу, чай из листьев этой культуры оказывает благотворное влияние на здоровье населения.

Чай и различные чайные сборы всегда являлись популярными среди населения в РФ продуктами, богатыми антиоксидантами. Хотя целебные свойства чая из чайного куста (*Camellia sinensis* L.) известны с глубокой древности, исследование биохимических характеристик появляющегося нового продукта из листьев амаранта имеет теоретическую и практическую значимость. Традиционно производители чая фиксируют изменения в цвете и аромате чая с помощью субъективных и эмпирических методов. Оценка вкуса чая человеком в значительной степени зависит от личных предпочтений. Содержание качественных компонентов, определяемых биохимическим анализом, является более точным и показательным [12,13].

Известно, что производство ферментированного чая проходит за счет собственных ферментов сырья и микробной метаболической активности. Этот процесс считается ключевым методом, ответственным за различные биохимические изменения и приводящим к улучшению сенсорных свойств чая [14]. В последние годы появилось большое количество подтверждений того, что во время ферментации чая происходит ряд биотрансформаций, таких как деградация, окисление, полимеризация, конденсация и структурные модификации [15,16]. Ферментация является ключевым процессом при приготовлении черного чая и улуна из чайного куста (*Camellia sinensis* L.). В процессе ферментации присутствующие в листьях энзимы вступают в контакт с атмосферным кислородом. Умеренная ферментация способствует серии биохимических реакций, связанных с окислением полифенолазы, что может повлиять на содержание некоторых биохимических компонентов и сформировать уникальный вкус чая. Конечным результатом процесса является улучшение вкусовых, ароматических и цветовых характеристик. Чай из листьев амаранта *A. cruentus* L. с бордовой окраской листа — новый продукт, набирающий популярность в России (Рисунок 1). Однако его биохимические характеристики, в отличие от чайного куста, ранее не изучались.

В связи с этим целью настоящей работы являлось сравнительное изучение биохимического состава и антиоксидантной активности чая из листьев амаранта, приготовленного как с помощью ферментации, так и без. Данное исследование освещает вопрос содержания и различия между ферментированным и неферментированным чаем из амаранта по наиболее ценным биохимическим компонентам.

2. Материалы и методы

Растения амаранта сорта «Франт» [17] были выращены в 2023 году в открытом грунте в условиях Пушкинских и Павловских лабораторий Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР) (lat 59°7111275′ N, long 30°43032647′ E; г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, РФ). Приготовление ферментированного чая выполнено по методу, описанному в Патенте на изобретение № 2793627 «Способ производства ферментированного чая из краснокрашенных сортов амаранта» [18].

Биохимические исследования выполнены в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР по методике под редакцией А. И. Ермакова [19]. Содержание аскорбиновой кислоты определено прямым извлечением из растений (1% HCl) с последующим титрованием с помощью реактива Тильманса (2,6-дихлориндофинол). Сахара определяли методом Бертрана; общую кислотность — титрованием экстракта 0,1 н щелочью, с пересчетом на яблочную кислоту. Пигменты каротиноиды и хлорофиллы экстрагировали 100% ацетоном. Абсорбцию измеряли при различных длинах волн (нм): 645, 662 для хлорофиллов *a* и *b*, 440 для каротиноидов, 454 для каротинов, 454 для β-каротина, 447 для лютеина, 440 для виолоксантина и 443 для ксантофилла. Содержание беталаинов определяли спектрофотометрически на спектрофотометре Ultrospec II (LKB Vertriebs GmbH, Австрия). Сухие листья амаранта подвергали экстракции 2%-ным раствором муравьиной кислоты до обесцвечивания исходного материала, фильтровали через бумажный фильтр и собирали в мерную колбу, записывали полученный объем. Оптическую плотность полученных экстрактов измеряли при $\lambda = 535$ нм для бетацианинов (амарантин) и при $\lambda = 469$ нм для бетаксантинов (вульгаксантин) [20]. Содержание фенольных соединений устанавливали спектрофотометрически с использованием реактива Фолина-Чокалтеу на спиртовых экстрактах (70% этанол, 80 °C, 1 час) [21]. Стандартом служила галловая кислота. Результаты выражали в мг-экв галловой кислоты/г (мг-экв ГК/г). Содержание флавоноидов определяли по величине поглощения комплекса флавоноидов при 415 нм с хлористым алюминием на спиртовых экстрактах, результаты выражали в процентах. Для оценки антиоксидантной активности использовался метод колориметрии свободных радикалов, основанный на реакции DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил), растворенного в этаноле, с образцом антиоксиданта. Результат выражали в эквивалентах аскорбиновой кислоты (мкг-экв АК/100г) [22].

Рисунок 1. **Амарант *Amaranthus cruentus* L. сорта «Франт». Молодые растения (слева), взрослые цветущие растения (справа) (фото авторов)**

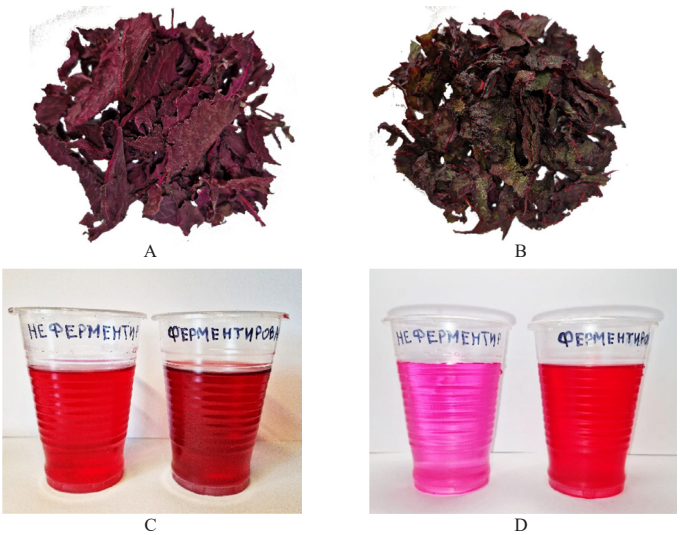
Figure 1. **Amaranth *Amaranthus cruentus* L. cultivar 'Frant'. Young plants (left), adult flowering plants (right) (photo by the authors)**

Метаболитный профиль идентифицировали с использованием газо-жидкостной хроматографии с масс-спектрометрией на хроматографе Agilent 6850 (США) согласно Лоскутову и др. [23]. Не менее 40 мг измельченного образца смешивали с метанолом в соотношении 1:10 (w: v), пробу настаивали не менее 30 суток при температуре 5–6 °C. Далее 100 мкл экстракта высушивали на установке CentriVap Concentrator (Labconco, США). В качестве внутреннего стандарта в пробу добавляли 50 мкл раствора трикозана в пиридине в концентрации 1 мкг/мкл и силилировали с помощью бис(триметилсилил) трифторацетамида 40 минут при температуре 100 °C. Разделение пробы объемом 1,2 мкл проводили с помощью капиллярной колонки HP-5MS (5 % фенил 95 % метилполисилоксан, 30,0 м, 250,00 мкм, 0,25 мкм) на газовом хроматографе с квадрупольным масс-селективным детектором Agilent 5975B VL MSD (Agilent Technologi, США). Соединения идентифицировали по их масс-спектру и индексу удерживания с применением программы Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System (AMDIS, National Institute of Standards and Technology, США). Масс-спектр считали определенным при совпадении с библиотечным вариантом при индексе соответствия не менее 80. Использовали библиотеки NIST2010 (National Institute of Standards and Technology, США), а также коллекции масс-спектров стандартных соединений Санкт-Петербургского университета и Ботанического Института РАН. Результаты обрабатывали с использованием программ UniChrom (ООО «Новые Аналитические Системы», Беларусь), AMDIS и библиотеки масс-спектров NIST 2010 научно-исследовательского парка Санкт-Петербургского университета и ботанического института Российской академии наук им. В. Л. Комарова [24,25]. Индексы удерживания определяли с использованием калибровки по стандартным предельным углеводородам. Количественная интерпретация метаболитного профиля выполнена по площадям пиков полного ионного тока методом внутреннего стандарта без учета коэффициентов чувствительности. Данные приведены в пересчете на сухое вещество.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программ MS Excel 2007, Statistica 10.0 и в программном обеспечении R (версия R-4.2.1), пакеты ‘metan’. Для всех параметров рассчитывались описательные статистики (среднее, стандартная ошибка среднего, коэффициент вариации). Оценку изменчивости структуры связей между признаками анализировали с помощью факторного анализа методом главных компонент. Значения коэффициента корреляции Пирсона при $r < 0,3$ считались слабыми, $0,3 > r > 0,5$ — умеренными, $0,5 > r > 0,7$ — заметными, $0,7 > r > 0,9$ — сильными, $r > 0,9$ — очень сильными.

3. Результаты и обсуждение

По субъективной оценке, были отмечены изменения в цвете и аромате ферментированного чая из амаранта (Рисунок 2 A, B, C). В варианте с ферментацией листа напиток характеризовался более насыщенным бордовым цветом и терпким приятным вкусом. Также отмечена высокая скорость заваривания (1–2 минуты) и возможность использовать холодную воду для получения летнего освежающего напитка, что является значительным преимуществом (Рисунок 2 D). Чай из высушенного неферментированного листа отличался «травяным» привкусом и менее насыщенным бордовым цветом, для заваривания необходимо 10–15 минут.



A B C D

Рисунок 2. **Высушенный лист амаранта (A), высушенный ферментированный лист амаранта (B), заваренный горячей водой в течение 5 минут чай из амаранта (C), залитый холодной водой в течение 2 минут чай из амаранта (D)**

Figure 2. **Dried amaranth leaf (A), dried fermented amaranth leaf (B), amaranth tea brewed in hot water for 5 minutes (C), amaranth tea brewed in cold water for 2 minutes (D)**

Количественный и качественный состав компонентов, определяемых биохимическими параметрами, — объективный показатель, отражающий различия или сходство между вариантами опыта. По большинству параметров биохимических показателей сушеного и ферментированного листа амаранта достоверных различий не выявлено (Таблица 1). В целом, отмечено высокое содержание хлорофиллов (540,14–567,65 мг/100 г), каротиноидов (116,62–127,64 мг/100 г), амарантина (44,61–54,18 мг/100 г). Существенные различия ($p < 0,05$) между вариантами опыта выявлены по содержанию сухого вещества, аскорбиновой кислоты, суммы сахаров, моносахаров, титруемой кислотности, α-каротина и лютеина. Количество витамина С после ферментации возросло на 46,7 %, сумма сахаров снизилась на 53,3 %, кислотность поднялась на 80,7 %, содержание лютеина увеличилось в 2 раза.

Таблица 1. **Сравнительная характеристика биохимических показателей сушеного листа амаранта с ферментированным**

Table 1. **Comparative characteristics of the biochemical parameters of dried amaranth leaf and fermented one**

Биохимические показатели	Сушеный лист		Ферментированный лист		*p* (0,05)
	Mean	SD	Mean	SD	
Сухое вещество, %	92,47	0,15	93,47	0,29	0,006*
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	71,25	0,01	104,50	12,10	0,009*
Моносахара, %	3,16	0,06	1,74	0,65	0,02*
Сахароза, %	1,08	0,58	0,23	0,21	0,07
Сумма сахаров, %	4,24	0,54	1,98	0,54	0,007*
Титруемая кислотность, %	2,13	0,22	3,85	0,75	0,02*
Хлорофилл[a], мг/100 г	405,64	194,95	423,71	34,20	0,88
Хлорофилл[b], мг/100 г	162,01	42,78	116,43	10,77	0,15
Хлорофиллы, мг/100 г	567,65	192,71	540,14	24,63	0,82
Каротиноиды, мг/100 г	127,64	31,88	116,62	9,20	0,59
α-каротин, мг/100 г	17,33	4,67	8,19	2,95	0,04*
β-каротин, мг/100 г	25,66	5,86	23,07	1,04	0,49
Лютеин, мг/100 г	12,12	1,72	24,37	0,07	0,002*
Виолоксантин, мг/100 г	43,14	10,33	31,82	2,73	0,14
Ксантофиллы, мг/100 г	31,61	9,07	32,84	1,91	0,83
Амарантин, мг/100 г	54,18	21,43	44,61	3,29	0,49
Вульгаксантин, мг/100 г	9,82	1,53	7,71	0,70	0,10
Фенольные соединения, мг-экв ГК/100 г	8,20	1,25	8,95	0,64	0,40
Флавоноиды, %	0,36	0,11	0,30	0,05	0,46
АОА[a], мкг-экв АК/100 г	410,99	87,05	401,00	29,63	0,86
DPPH[b], %	65,47	13,78	64,56	4,54	0,92

Примечание: *различия существенны ($p < 0,05$), [a] антиоксидантная активность; [b] антирадикальная активность.

* the differences are significant ($p < 0.05$), [a] antioxidant activity; [b] antiradical activity.

Аскорбиновая кислота (АК) является важным показателем, поскольку это соединение является активным антиоксидантом. В процессе 12-часовой ферментации происходило ее достоверное увеличение с 71,2 до 104,5 мг/100 г. Синтез АК изучен достаточно хорошо на примере вегетирующих растений и плодов после уборки [26,27]. Описаны возможные альтернативные пути биосинтеза [28]. Наиболее коротким является D-галактуроновый путь, при котором начальными субстратами служат продукты разрушения полисахаридов клеточной стенки [29]. В нашем исследовании, согласно методике приготовления ферментированного чая из амаранта, на первом этапе листья подвергаются заморозке, что приводит к разрыву клеточных стенок. Предполагаем, что высвободившаяся сахароза подвергается гидролизу во время ферментации. Продукты ее распада включаются в синтез АК и органических кислот, что приводит к их повышению в конечном продукте и к снижению содержания сахаров. Данные корреляционного анализа подтверждают наши

предположения: выявлена сильная отрицательная корреляция АК с сахарами (r = –0,82, p < 0,05) и положительная с сухим веществом (r = 0,95, p < 0,01) и лютеином (r = 0,91, p < 0,05) (Рисунок 3). Примечательно, что в черном и зеленом чае из чайного куста зафиксированы близкие значения АК [30].

Сумма сахаров после ферментирования листа амаранта снизилась на 53,3% и в среднем составила 1,98%. Нужно отметить, что у классического черного чая этот показатель варьирует от 0,5 до 1,5% [31], у зеленого чая может достигать 5,13% [32]. Среди низкомолекулярных компонентов углеводного профиля выявлено достоверное снижение содержания дисахаров (сахарозы и рафинозы) и моносахарида альтрозы, а также увеличение глюкозы и рибозы (Таблица 2). Различия между метаболитами углеводного профиля были подтверждены результатами анализа главных компонент (PCA), которые объясняли 56,2% и 26,2% от общей дисперсии соответственно (Рисунок 4). Таким образом, можно сделать вывод об уменьшении сладости вкуса чая из амаранта после ферментации. Аналогичные результаты были показаны в работе китайских исследователей, которые анализировали ферментированный чайный лист *Ginkgo biloba* L. и также отметили снижение уровня сахаров [33].

Среди органических кислот в чае из амаранта было идентифицировано 28 соединений, (Рисунок 5) преобладали неорганическая фосфорная (20–22%) и органические янтарная (11–17%) и глицериновая (10–23%) кислоты. Достоверные различия между вариантами опыта были установлены для феруловой, галловой, ванилиновой, глицериновой и янтарной кислот. После ферментации глицериновая кислота повысилась на 107,3%, феруловая — на 134,4%; янтарная, ванилиновая и галловая кислоты снизились на 42,7%, 45,8 и 34,2% соответственно. В работе отечественных исследователей при анализе метаболитов в вегетирующих листьях амаранта вида *Amaranthus tricolor* L. было обнаружено 22 органические кислоты [34]. Отличия

Таблица 2. **Углеводный профиль сушеного и ферментированного листа амаранта (мг/100 г)**

Table 2. **Carbohydrate profile of dried and fermented amaranth leaves (mg/100 g)**

Биохимические показатели	Сушеный лист		Ферментированный лист		p (0,05)	HCP_{05}
	Mean	SD	Mean	SD		
Моносахара						
Ribose	15,55[a]	1,85	36,09[b]	1,24	0,001	4,10
Arabinose	27,36	10,17	27,25	7,22	0,98	15,33
Lyxose	2,49	1,17	3,20	0,81	0,43	2,61
Rhamnose	24,15	2,26	29,35	2,95	0,07	6,79
Fructose	704,08	143,12	539,81	17,75	0,10	103,07
Sorbose	77,14	53,41	88,34	12,85	0,36	29,30
Galactose	142,01	43,45	287,39	133,75	0,24	284,65
Rutinose	36,91	13,23	23,07	7,41	0,09	15,8
Mannose	155,47	314,66	290,97	146,17	0,30	310,27
Altrose	275,56[a]	139,34	131,39[b]	8,51	0,001	34,11
Xylose	33,00	18,13	32,46	12,99	0,96	27,77
Glucose	403,30[a]	374,95	506,20[b]	41,18	0,04	87,42
Дисахара						
Sucrose	983,83[a]	199,90	78,49[b]	20,15	0,001	369,32
Maltose	1,67	0,44	1,46	0,56	0,65	1,31
Raffinose	51,14[a]	13,73	5,53[b]	1,23	0,004	25,32

Примечание: [ab] различные буквы в одной строке означают, что данные различаются существенно (p < 0,05).

[ab] ab different letters in one line mean that the data differ significantly (p < 0.05).

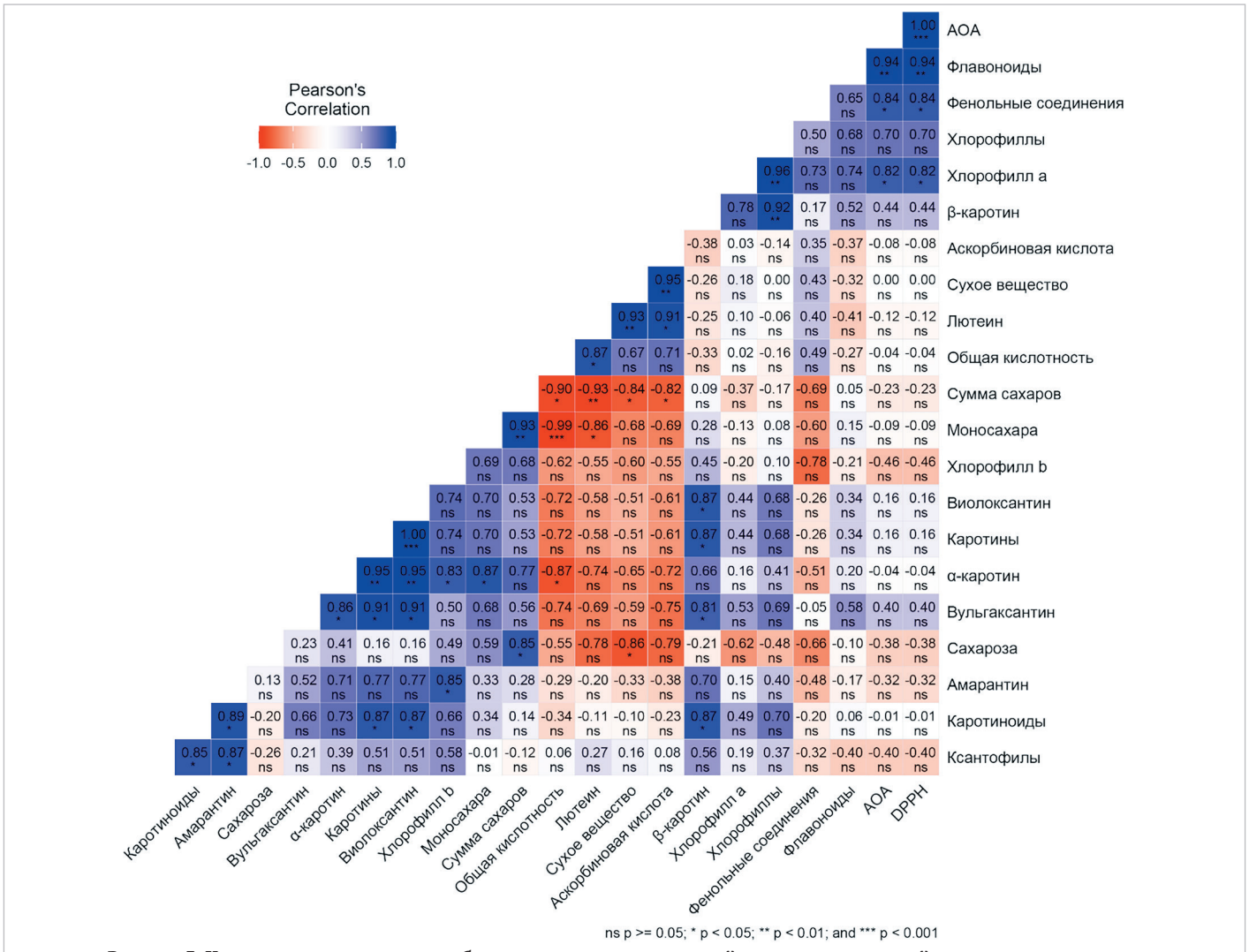


Рисунок 3. **Корреляционная матрица биохимических показателей и антиоксидантной активности сушеного и ферментированного листа амаранта**

Figure 3. **Correlation matrix of biochemical indicators and antioxidant activity of dried and fermented amaranth leaves**

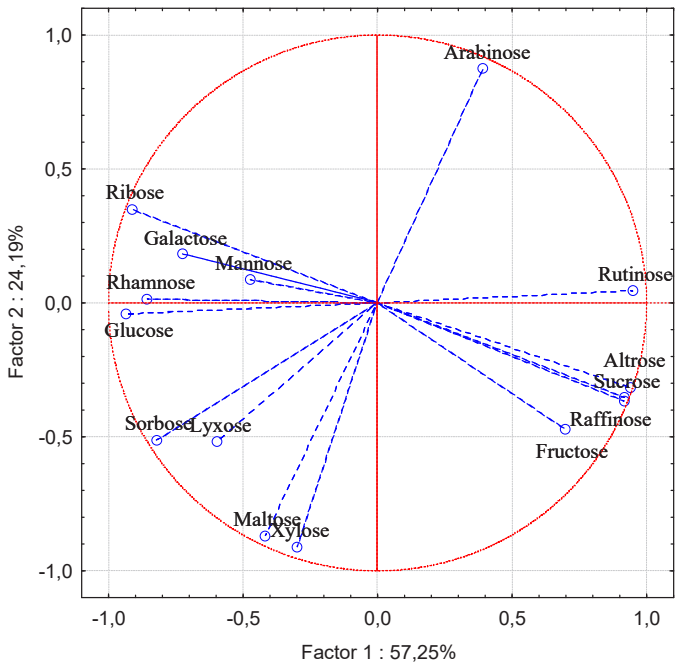


Рисунок 4. **Анализ главных компонент углеводного профиля чая из амаранта**

Figure 4. **Principal component analysis of the carbohydrate profile of amaranth tea**

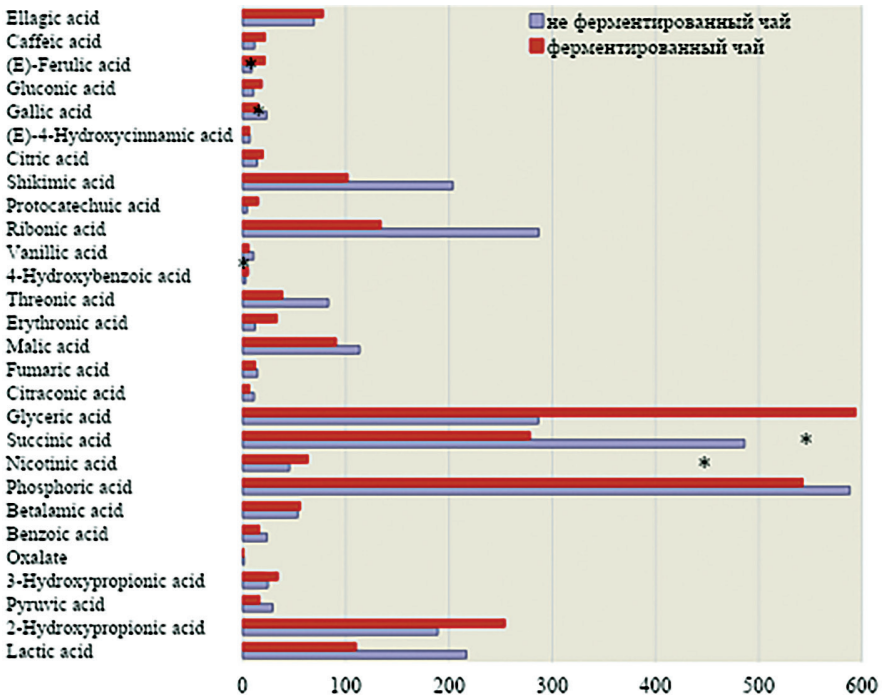
в составе некоторых компонентов, вероятно, обусловлены видовыми особенностями данной культуры.

Максимальный рост зафиксирован для фенольного соединения — феруловой кислоты, содержание которой в ферментированном чае увеличилось в 2,3 раза (до 21,61 мг/100 г). В исследованиях Гинс с соавторами [4] в свежевысушенных листьях овощного амаранта *Amaranthus tricolor* L. также была идентифицирована феруловая кислота на уровне 0,01 мкг/100 мл. Известно, что эта кислота является сильным антиоксидантом и обладает рядом терапевтических свойств: противовоспалительным, антидиабетическим, антиканцерогенным, гепатопротекторным, антиатеросклеротическим [35–38]. Таким образом, ферментированный чай из амаранта является источником ценной для здоровья человека феруловой кислоты.

Отличительной чертой чая из амаранта является высокое содержание лютеина (12,12–24,37 мг/100 г), что соответствует или превышает концентрацию этого вещества в шпинате, традиционно признанного одним из лидеров по содержанию лютеина [39]. Наибольшее количество данного вещества содержит листовая капуста — 39,55 мг/100 г. Лютеин ($C_{40}H_{56}O_2$) является кислородосодержащим пигментом класса каротиноидов и широко встречается в овощах, фруктах, цветах и других растениях. Он содержится в макуле сетчатки глаза и не синтезируется в организме человека [40]. Поэтому потребление продуктов питания, включающих лютеин, крайне важно для предотвращения различных дистрофических заболеваний глаз [41,42]. В ряде исследований установлено, что прекурсором в биосинтезе лютеина является α-каротин [43,44]. Предполагаем, что достоверное снижение количества α-каротина в ферментированном чае и повышение содержания лютеина могут иметь косвенную связь (Таблица 1).

Известно, что биодоступность лютеина повышается при размельчении сырья [45]. Методика приготовления ферментированного чая из амаранта предусматривает замораживание листьев и последующую его нарезку, что способствует высвобождению содержимого клеток и большей биодоступности лютеина, который не деградирует при низких температурах, что отмечалось ранее [46]. Китайские исследователи изучали лютеин, выделенный из водоросли *Chlorella prototthecoides*, и установили уменьшение его содержания при нагревании [47]. Таким образом, благодаря высокому содержанию и сохранности лютеина, холодный ферментированный напиток из амаранта обладает большей пользой для здоровья. Корреляционный анализ (Рисунок 3) показал сильную положительную взаимосвязь лютеина с общей кислотностью ($r = 0,87$, $p < 0,05$), АК ($r = 0,91$, $p < 0,05$) и отрицательную — с сахарами ($r = -0,93$, $p < 0,01$).

Антиоксидантная активность (АОА) чая по вариантам опыта не имела существенных различий и в среднем составила 405,99 мкг-экв АК/100 г. Отмечена сильная положительная взаимосвязь АОА с суммой фенольных соединений ($r = 0,84$, $p < 0,05$), с хлорофиллом *a* ($r = 0,82$, $p < 0,05$) и с суммой флавоноидов ($r = 0,94$, $p < 0,01$) (Рисунок 3). Wojciechowski с соавторами [48] в опытах с экстрактами зеленого и черного чая также отмечали сильную корреляцию АОА с фенольными веществами. Из 13 идентифицированных нами фенольных соединений наибольшую долю составили шикимовая (36,0 %) и эллаговая (19,8 %) кислоты. Среди флавоноидов преобладал кверцетин (117,04 мг/100 г). Установлено, что эллаговая кислота и кверцетин обладают подтвержденным противовоспалительным, кардиопротекторным, гипотензивным эффектом, способствуют повышению жизнеспособности нейронов и смягчают повреждения при



Примечание: * различия между вариантами опыта существенны ($p < 0,05$).

* differences between experimental variants are significant ($p < 0.05$).

Рисунок 5. **Идентифицированные органические кислоты в опытных вариантах чая из амаранта (мг/100г).**

Figure 5. **Identified organic acids of experimental variants of amaranth tea (mg/100g)**

нейродегенеративных заболеваниях, таких как болезнь Альцгеймера и Паркинсона [49,50]. Вышесказанное подтверждает выраженное оздоравливающие действие чая из амаранта.

4. Выводы

Проведен сравнительный анализ содержания биохимических веществ и антиоксидантных свойств чайного сырья из амаранта, относительно недавно введенного в сельское хозяйство России. Показано высокое содержание таких ценных для здоровья человека компонентов, как аскорбиновая кислота, хлорофиллы, каротиноиды и лютеин. Среди кислот идентифицировано 28 соединений с преобладанием фосфорной, янтарной и глицериновой кислот. Установлено, что на фоне повышения общей кислотности в процессе ферментации уменьшается содержание сахарозы, рафинозы и альтрозы, что приводит к уменьшению сладости вкуса чая. Отмечено достоверное повышение таких ценных веществ, как аскорбиновая кислота и лютеин, являющихся сильными антиоксидантами и благотворно влияющими на здоровье человека. Высокая антиоксидантная активность чая из амаранта была сопряжена с фенольными элементами, хлорофиллом *a* и флавоноидами. Значительное присутствие эллаговой кислоты и кверцетина также свидетельствует о пользе чайного продукта из амаранта. Выявленные корреляции имеют теоретическую и практическую значимость для понимания процессов, происходящих при ферментации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Sokolova, D., Zvereva, O., Shelenga, T., Solovieva, A. (2021). Comparative characteristics of the amino acid composition in amaranth accessions from the VIR collection. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45(1), 68–78. https://doi.org/10.3906/tar-2007-7
2. Joshi, D. C., Sood, S., Hosahatti, R., Kant, L., Pattanayak, A., Kumar, A. et al. (2018). From zero to hero: The past, present and future of grain amaranth breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(9), 1807–1823. https://doi.org/10.1007/s00122-018-3138-y
3. Gelaye, Y. (2023). A review of amaranth crop as a potential solution to Ethiopia's nutritional crisis. *Nutrition and Dietary Supplements*, 15, 101–110. https://doi.org/10.2147/nds.s428058
4. Ruth, O. N., Unathi, K., Nomali, N., Chinsamy, M. (2021). Underutilization versus nutritional-nutraceutical potential of the amaranthus food plant: A mini-review. *Applied Sciences*, 11(15), Article 6879. https://doi.org/10.3390/app11156879
5. Baraniak, J., Kania-Dobrowolska, M. (2022). The dual nature of amaranth — functional food and potential medicine. *Foods*, 11(4), Article 618. https://doi.org/10.3390/foods11040618
6. Herrera, A.C., Zamudio, F.V., Campos, M.R.S. (2024). Therapeutic effects of amaranth: Analysis of the antidiabetic potential of the plant. *Journal of Medicinal Food*, 27(4), 279–286. https://doi.org/10.1089/jmf.2022.0159
7. Evon, P., de Langalerie, G., Labonne, L., Merah, O., Talou, T., Ballas, S. et al. (2021). Low-density insulation blocks and hardboards from amaranth (*Amaranthus cruentus*) stems, a new perspective for building applications. *Coatings*, 11, Article 349. https://doi.org/10.3390/coatings11030349
8. Gins, M. S., Gins, V. K., Kononkov, P. F., Udalova, Zh. V., Zinov'eva, S. V. (2020). The effect of amaranthine on the stress-resistance of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) invaded by the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*). *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 55(1), 97–106. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.1.97eng
9. Bastos, E. L., Schliemann, W. (2022). Betalains as Antioxidants. Chapter in a book: Plant Antioxidants and Health. Reference Series in Phytochemistry. Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78160-6
10. Ninfali, P., Antonini, E., Frati, A., Scarpa, E. S. (2017). C-Glycosyl flavonoids from *Beta vulgaris Cicla* and betalains from *Beta vulgaris rubra*: Antioxidant, anticancer and anti-inflammatory activities — A review. *Phytotherapy Research*, 31, 871–884. https://doi.org/10.1002/ptr.5819
11. Rajabian, F., Rajabian, A., Tayarani-Najaran, Z. (2023). The Antioxidant activity of betanin protects MRC-5 cells against cadmium induced toxicity. *Biological Trace Element Research*, 201(11), 5183–5191. https://doi.org/10.1007/s12011-023-03662-8
12. Zhang, M., Zhou, C., Zhang, C., Xu, K., Lu, L., Huang, L. et al. (2023). Analysis of characteristics in the macro-composition and volatile compounds of understory Xiaobai white tea. *Plants*, 12(24), Article 4102. https://doi.org/10.3390/plants12244102
13. Khan, R. M., Islam, A., Uddin, R., Kalam, A., Baishakh, N. N., Barua, P. et al. (2023). Biochemical investigation of Bangladeshi black tea and their correlation to organoleptic quality evaluation. *Heliyon*, 9(6), Article e16802. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16802
14. Jolvis Pou, K. R. (2016). Fermentation: The key step in the processing of black tea. *Journal of Biosystems Engineering*, 41(2), 85–92. https://doi.org/10.5307/jbe.2016.41.2.085
15. Wong, M., Sirisena, S., Ng, K. (2022). Phytochemical profile of differently processed tea: A review. *Journal of Food Science*, 87(5), 1925–1942. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16137
16. Assad, M., Ashaolu, T. J., Khalifa, I., Baky, M. H., Farag, M. A. (2023). Dissecting the role of microorganisms in tea production of different fermentation levels: A multifaceted review of their action mechanisms, quality attributes and future perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39, Article 265. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03701-5
17. Патент № 11940. Амарант метельчатый (*Amaranthus cruenthus* L.) «Франт» / Соколова Д. В. Опубл. 25.01.2022. Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию. [Sokolova D. V. Purple amaranth (*Amaranthus cruenthus* L.) 'Frant'. Patent RF, no. 11940, 2022. State Register of Varieties and Hybrids of Agricultural Plants Admitted for Usage. (In Russian)]
18. Патент № 2793627 Способ производства ферментированного чая из краснокрашенных сортов амаранта / Соколова Д. В. Опубл. 04.04.2023. Бюлл. № 10. [Sokolova D. V. method for producing fermented tea from red-coloured amaranth varieties. Patent RF, no. 12793627, 2022. (In Russian)]
19. Ермаков, А. И. (1987). Методы биохимического исследования растений. Ленинград: Агропромиздат, 1987. [Ermakov, A. I. (1987). Biochemical research methods of plants. Leningrad: Agropromizdat, 1987. (In Russian)]
20. Саенко, И. И., Тарасенко, О. В., Дейнека, В. И., Дейнека, Л. А. (2012). Бетацианины корнеплодов красной столовой свеклы. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: естественные науки*, 3(122), 194–200. [Saenko, I. I., Tarasenko, O. V., Deineka, V. I., Deineka, L. A. (2012). Betacyanins of roots of red beetrot. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, 3(122), 194–200. (In Russian)]
21. Голубкина, Н. А., Кекина, Е. Г., Молчанова, А. В., Антошкина, М. С., Надежкин, С. М., Солдатенко, А. В. (2023). Антиоксиданты растений и методы их определения. Москва: ИНФРА-М, 2023. [Golubkina, N. A., Kekina, E. G., Molchanova, A. V., Antoshkina, M. S., Nadezhkin, S. M., Soldatenko, A. V. (2018). Plant antioxidants and methods of their detection. Moscow: INFRA-M, 2023. (In Russian)]
22. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. http://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5
23. Loskutov, I. G., Shelenga, T. V., Konarev, A. V., Vargach, Y. I., Porokhovinova, E. A., Blinova, E. V. et al. (2020). Modern approach of structuring the variety diversity of the naked and covered forms of cultural oats (*Avena sativa* L.). *Ecological Genetics*, 18(1), 27–41. https://doi.org/10.17816/ecogen12977
24. Puzanskiy, R., Tarakhovskaya, E., Shavarda, A., Shishova, M. (2018). Metabolomic and physiological changes of *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyceae, Chlorophyta) during batch culture development. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 803–818. https://doi.org/10.1007/s10811-017-1326-9
25. Shtark, O. Y., Puzanskiy, R. K., Avdeeva, G. S., Yurkov, A. P., Smolikova, G. N., Yemelyanov, et al. (2019). Metabolic alterations in pea leaves during arbuscular mycorrhiza development. *PeerJ*, 7, Article e7495. https://doi.org/10.7717/peerj.7495
26. Cruz-Rus, E., Amaya, I., Sánchez-Sevilla, J. F., Botella, M. A., Valpuesta, V. (2011). Regulation of L-ascorbic acid content in strawberry fruits. *Journal of Experimental Botany*, 62(12), 4191–4201. https://doi.org/10.1093/jxb/err122
27. Tyapkina, D. Y., Kochieva, E. Z., Slugina, M. A. (2019). Vitamin C in fleshy fruits: Biosynthesis, recycling, genes, and enzymes. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 23(3), 270–280. https://doi.org/10.18699/vj19.492
28. Paciolla, C., Fortunato, S., Dipierro, N., Paradiso, A., De Leonardis, S., Mastropasqua, L. et al. (2019). Vitamin C in plants: From functions to biofortification. *Antioxidants*, 8(11), Article 519. https://doi.org/10.3390/antiox8110519
29. Li, M., Chen, X., Wang, P., Ma, F. (2011). Ascorbic acid accumulation and expression of genes involved in its biosynthesis and recycling in developing apple fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 136(4), 231–238. https://doi.org/10.21273/jashs.136.4.231
30. Platonova, N., Belous, O. (2020). Biochemical composition of tea and its changes under different factors. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(3), 404–414. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-404-414
31. Bokuchava, M. A., Skobeleva, N. I. (1969). The chemistry and biochemistry of tea and tea manufacture. *Advances in Food Research*, 17, 215–292. https://doi.org/10.1016/s0065-2628(08)60311-0
32. Wang, S., Qiu, Y., Gan, R.-Y., Zhu, F. (2022). Chemical constituents and biological properties of Pu-erh tea. *Food Research International*, 154, Article 110899. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110899
33. Li, F., Boateng, I. D., Yang, X., Li, Y., Liu, W. (2023). Effects of processing methods on quality, antioxidant capacity, and cytotoxicity of Ginkgo biloba leaf tea product. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(10), 4993–5003. https://doi.org/10.1002/jsfa.12577
34. Gins, M. S., Gins, V. K., Motyleva, S. M., Kulikov, I. M., Medvedev, S. M., Piovarov, V. F. (2020). The metabolites of autotrophic and heterotrophic leaves of *Amaranthus tricolor* L. early splendor variety. *Agricultural Biology*, 55(5), 920–931. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.5.920eng
35. Feng, N., You, J., Xu, R., Chen, L., Wang, D., Li, L. et al. (2024). Ferulic acid reduces gut redox potential and alleviates chronic Mg-induced diarrhea by modulating gut microbiota and metabolites. *Animal Advances*, 1, Article e004. https://doi.org/10.48130/animadv-0024-0004
36. Matowane, G. R., Ramorobi, L. M., Mashele, S. S., Bonnet, S. L., Noreljaleel, A. E. M., Swain, S. S. et al. (2022). Complexation potentiated promising anti-diabetic and anti-oxidative synergism between ZN(ii) and ferulic acid: A multimode study. *Diabetic Medicine*, 39(9), Article e14905. https://doi.org/10.1111/dme.14905
37. Bakholdina, L. A., Sevodin, V. P., Markova, A. A., Khlebnikov, A. I., (2019). Cytotoxicity of new ferulic-acid derivatives on human colon carcinoma (HCT116) cells. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 53(6), 516–520. https://doi.org/10.1007/s11094-019-02030-y
38. Amić, A., Marković, Z., Marković, J. M. D., Milenković, D., Stepanić, V. (2020). Antioxidative potential of ferulic acid phenoxyl radical. *Phytochemistry*, 170, Article 112218. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2019.112218
39. Mrowicka, M., Mrowicki, J., Kucharska, E., Majsterek, I. (2022). Lutein and zeaxanthin and their roles in age-related macular degeneration — neurodegenerative disease. *Nutrients*, 14, Article 827. https://doi.org/10.3390/nu14040827

40. Sanlier, N., Yildiz, E., Ozler, E. (2024). An overview on the effects of some carotenoids on health: lutein and zeaxanthin. *Current Nutrition Reports*, 13(4), 828–844. https://doi.org/10.1007/s13668-024-00579-z
41. Manayi, A., Abdollahi, M., Raman, T., Nabavi, S. F., Habtemariam, S., Daglia, M. et al. (2015). Lutein and cataract: From bench to bedside. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(5), 829–839. https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1049510
42. Sawa, M., Shunto, T., Nishiyama, I., Yokoyama, A., Shigeta, R., Miura, S. et al. (2020). Effects of Lutein Supplementation in Japanese patients with unilateral age-related macular degeneration: The Sakai lutein study. *Scientific Reports*, 10(1), Article 5958. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62483-0
43. Niu, G., Guo, Q., Wang, J., Zhao, S., He, Y., Liu, L. (2020). Structural basis for plant lutein biosynthesis from α-carotene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(25), 14150–14157. https://doi.org/10.1073/pnas.2001806117
44. Nisar, N., Li, L., Lu, S., Khin, N. C., Pogson, B. J. (2015). Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant*, 8(1), 68–82. https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.12.007
45. Hirdyani, H. (2017). Lutein — the less explored carotenoid. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 528–53. https://doi.org/10.20959/wjpr20176-8671
46. Chung, R. W. S., Leanderson, P., Gustafsson, N., Jonasson, L. (2019). Liberation of lutein from spinach: Effects of heating time, microwave-reheating and liquefaction. *Food Chemistry*, 277, 573–578. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.023
47. Shi, X.-M., Chen, F. (1997). Stability of lutein under various storage conditions. *Food / Nahrung*, 41(1), 38–41. https://doi.org/10.1002/food.19970410110
48. Wojciechowski, D., Sroka, Z., Gamian, A. (2011). Investigation of antiradical potential of different kinds of teas and extracts from these teas using antiradical activity units (TAU). *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej*, 65, 796–803. https://doi.org/10.5604/17322693.968073
49. Deepika, Maurya, P. K. (2022). Health benefits of quercetin in age-related diseases. *Molecules*, 27(8), Article 2498. https://doi.org/10.3390/molecules27082498
50. Zhu, H., Yan, Y., Jiang, Y., Meng, X. (2022). Ellagic acid and its anti-aging effects on central nervous system. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), Article 10937. https://doi.org/10.3390/ijms231810937

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Соколова Диана Викторовна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Отдел овощных и бахчевых культур, Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР), Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44 Тел.: +7–812–312–51–61 E-mail: dianasokol@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9967-7454 * автор для контактов	**Diana V. Sokolova**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Department of Genetic Resources of Vegetable and Melon Crops, N.I Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) 42, 44 B. Morskaya Str., 190031, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–312–51–61 E-mail: dianasokol@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9967-7454 * corresponding author
Соловьева Алла Евгеньевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Отдел биохимии и молекулярной биологии, Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР), Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул.Большая Морская, 42, 44 Тел.: +7–812–312–51–61 E-mail: alsol64@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6201-4294	**Alla E. Solovyeva**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Department of Biochemistry and Molecular Biology, N.I Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44 B. Morskaya Str., 190031, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–312–51–61 E-mail: alsol64@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6201-4294

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-267-275

Received 08.05.2025
Accepted in revised 15.06.2025
Accepted for publication 17.06.2025
© Morshchinin I. V., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

METHODS FOR QUANTITATIVE DETERMINATION OF MICROALGAL LIPID AND FATTY ACIDS CONTENT

Ivan V. Morshchinin
ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

KEY WORDS:
microalgae, lipids, lipid quantification, biodiesel production, biomass

ABSTRACT
Microalgae represent a promising feedstock for sustainable biofuel production and high-value lipid-based bioproducts due to their high lipid productivity and rapid growth rates. Accurate and reproducible lipid quantification is essential for strain selection, process optimization, and industrial scaling. This review presents a comprehensive and critical evaluation of contemporary lipid quantification methods applied to microalgae. The methodologies are categorized into screening, quantitative, and profiling approaches, encompassing techniques such as solvent extraction, *in situ* and direct transesterification, colorimetric assays, spectroscopic tools (NIR, FTIR), and chromatographic techniques (GC, LC–MS/MS). Each method is evaluated across multiple performance axes, including analytical accuracy, throughput, requirement to the sample, technical complexity, and standardization potential. Results are synthesized using the comparative tables. While high-throughput screening tools (e. g., Nile Red, SPV) offer speed and easiness of using, they exhibit limitations in accuracy and reproducibility. Quantitative methods such as acid-catalyzed *in situ* transesterification coupled with gas chromatography demonstrate a strong balance between precision and scalability. Profiling methods, including LC–MS/MS, provide the highest molecular resolution but are cost- and labor-intensive. The review highlights the need for methodological harmonization and discusses the trade-offs associated with analytical choices in research and industry. Practical recommendations are proposed for selecting the appropriate techniques depending on application context — from early-stage screening to advanced lipidomic profiling.

Поступила 08.05.2025
Поступила после рецензирования 15.06.2025
Принята в печать 17.06.2025
© Морщинин И. В., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЛИПИДОВ И ЖИРНЫХ КИСЛОТ В МИКРОВОДОРОСЛЯХ

Морщинин И. В.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
микроводоросли, липиды, количественное определение липидов, производство биодизельного топлива, биомасса

АННОТАЦИЯ
Микроводоросли представляют собой перспективное сырьё для устойчивого производства биотоплива и ценных биопродуктов благодаря высокой липидной продуктивности и быстрому темпу роста микроводорослей. Точное и воспроизводимое количественное определение липидов имеет решающее значение для отбора штаммов, оптимизации процессов и масштабирования производства. Настоящий обзор представляет собой всестороннюю и критическую оценку современных методов количественного анализа липидов, применяемых к микроводорослям. Рассмотренные методики классифицируются по типу применения: скрининговые, количественные и профилирующие подходы, включая такие технологии, как экстракция растворителями, *in situ* и прямая этерификация, колориметрические тесты, спектроскопические методы (NIR, FTIR), а также хроматографические техники (ГХ, ВЭЖХ–МС/МС). Каждый метод оценивается по нескольким критериям, включая аналитическую точность, пропускную способность, требования к образцам, техническую сложность и потенциал стандартизации. Результаты обобщаются в виде сравнительных таблиц. Несмотря на высокую скорость и простоту применения, скрининговые инструменты (например, Nile Red, SPV) недостаточно точны и воспроизводимы. Количественные методы, такие как кислотно-катализируемая *in situ* этерификация в сочетании с газовой хроматографией, демонстрируют оптимальное соотношение точности и масштабируемости применения. Методы профилирования, включая ВЭЖХ–МС/МС, обеспечивают наивысшее молекулярное разрешение, но требуют значительных экономических и трудовых затрат. Обзор подчёркивает необходимость гармонизации методик и обсуждает компромиссы, связанные с выбором аналитического подхода в научных и прикладных целях. Предлагаются практические рекомендации по выбору наиболее подходящих методов в зависимости от контекста применения — от раннего скрининга до продвинутого липидомного профилирования.

1. Introduction

Microalgae are a diverse group of photosynthetic microorganisms with immense biotechnological potential due to their rapid growth rates, high photosynthetic efficiency, and ability to accumulate substantial amounts of lipids under specific environmental conditions. These unicellular organisms can synthesize a wide variety of lipids, including triacylglycerols (TAGs), phospholipids, glycolipids, and free fatty acids, thus making them a valuable raw material for biofuel production, nutraceuticals, cosmetics, and pharmaceuticals [1]. The increasing demand for sustainable energy sources and environmentally friendly industrial raw materials has spurred significant interest in the development of efficient methods for analysis of lipid content in microalgae, which is critical for optimizing cultivation strategies and lipid extraction protocols [2].

Lipid content and composition in microalgae can vary significantly depending on species, cultivation conditions, and the physiological state of the cells [3]. Hence, accurate, reliable, and reproducible analytical methods are essential for the qualitative and quantitative characterization of lipid fractions. Over the past decades, a broad range of methodologies has been developed and refined to analyze lipids in microalgae. These methods differ in terms of sensitivity, specificity, throughput, complexity, and suitability for different types of samples or analytical purposes. The choice of an appropriate method is often guided by the goals of the study, available equipment, and the desired accuracy [4].

FOR CITATION: **Morshchinin, I. V.** (2025). Methods for quantitative determination of microalgal lipid and fatty acids content. *Food Systems,* 8(2), 267–275. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-267-275

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Морщинин, И. В.** (2025). Методы количественного определения липидов и жирных кислот в микроводорослях. *Пищевые системы*, 8(2), 267–275. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-267-275

Traditional gravimetric methods, such as those proposed by Folch or Bligh and Dyer, remain widely used due to their simplicity and applicability for total lipid quantification [5]. However, these methods often lack specificity and may underestimate or overestimate lipid content due to co-extraction of non-lipid components or incomplete extraction. More advanced techniques, including chromatographic and spectroscopic methods, provide detailed compositional data and improved sensitivity but may require sophisticated tools, instrumentation and technical expertise [6].

In recent years, the development of fluorescence-based and spectrophotometric assays has provided faster and more accessible alternatives for high-throughput screening of lipid content, especially in strain selection and metabolic engineering studies [7]. Furthermore, non-destructive techniques such as nuclear magnetic resonance (NMR), Fourier-transform infrared (FTIR), and Raman spectroscopy have been explored as tools for real-time monitoring of lipid accumulation *in vivo* conditions [8].

Despite the availability of numerous analytical methods, there is still a lack of consensus regarding standardized protocols for lipid quantification in microalgae. Variations in extraction procedures, calibration standards, and sample pretreatment can lead to inconsistent results across the studies, thus hindering the comparison and interpretation of data. Therefore, a comprehensive review of the existing methodologies, their principles, advantages, limitations, and applications is essential for guiding the researchers in selecting the appropriate analytical strategies tailored to the specific research goals [9].

This review aims to provide an in-depth overview of the current state-of-the-art methods used for lipid analysis in microalgae, categorized into gravimetric, spectrophotometric/fluorometric, chromatographic, and spectroscopic techniques. Special emphasis is placed on methodological considerations, accuracy, reproducibility, and practical applicability in the context of microalgal biotechnology. By summarizing the strengths and weaknesses of each approach, we intend to support the informed decision-making in the design of experimental workflows for lipid profiling and quantification.

2. Objects and methods

2.1. Study objective

The primary objective of this review was to conduct a comparative analysis of the most prevalent quantitative methods used for lipid analysis in microalgae. This involved evaluating the accuracy, technical requirements, and methodological performance of various extraction, transesterification, spectroscopic, colorimetric, and chromatographic approaches. A total of ten studies meeting specific inclusion criteria were selected for in-depth analysis, with the goal of elucidating methodological trade-offs and supporting the development of the best practices for lipid quantification in algal cultivation biotechnology.

2.2. Literature search strategy

To conduct a comprehensive review of analytical methods for lipid quantification in microalgae, a systematic literature research was performed using two primary scientific databases: Scopus and Web of Science. These databases were selected due to their extensive coverage of peer-reviewed scientific literature and their relevance to the fields of biotechnology and analytical chemistry.

The search strategy involved the use of specific keywords and Boolean operators to identify relevant publications. The keywords included "microalgae," "lipid analysis," "lipid quantification," "gravimetric," "spectrophotometric," "chromatographic," and "spectroscopic." The search was conducted within the titles, abstracts, and keywords of the articles to ensure a specifically focused and relevant selection of studies.

The initial search yielded a total of 1,339 articles published between 1990 and November 2025 in the Scopus database. A similar search in the Web of Science database provided a comparable number of publications, indicating a substantial body of research in this area. To refine the selection, the following inclusion criteria were applied:

Publications must be peer-reviewed articles written in English.

Studies must focus on methods for lipid quantification in microalgae.

Articles must provide experimental data or comprehensive reviews of analytical techniques.

2.3. Exclusion and screening criteria

To ensure the methodological relevance and scientific rigor of the included publications, a set of predefined screening criteria was applied. Each candidate paper was assessed for the following:

- Study Subject — Inclusion was limited to studies analyzing lipid content specifically in microalgae species.
- Quantitative Analytical Method — Only the studies that described and implemented at least one quantitative analytical method for lipid measurement were considered.
- Comparative Analysis — Studies were required to compare at least two different methods for lipid quantification, allowing for relative performance assessment.
- Validation Data — Only studies that included validation data or reported performance metrics (e. g., precision, R^2 values, standard deviations) were chosen.
- Methodological Detail — Sufficient methodological descriptions were necessary to permit replication or technical assessment.
- Quantitative Outcomes — Studies needed to report quantitative lipid measurements (e. g., mg/g biomass, percentage content).
- Study Type — The analysis was restricted to primary research articles and systematic reviews explicitly focused on analytical method evaluation.

Papers, that did not simultaneously meet all criteria, were excluded after a holistic assessment.

2.4. Data extraction procedure

Following screening, a structured data extraction protocol was used using a large language model to ensure consistency and accuracy in data collection. The following key data fields were extracted from each included publication:

- Lipid Quantification Method: Identification of the primary analytical technique(s), including standard methods (e. g., Bligh and Dyer, Folch), their modifications, and associated tooling and instrumentation (e. g., GC–MS, LC–MS/MS).
- Microalgae Species and Sample Characteristics: Information regarding species identity, number of strains examined, sample type (e. g., fresh, freeze-dried), and cell preparation procedures (e. g., disruption methods).
- Analytical Techniques and Instruments: Detailed listing of analytical platforms (e. g., chromatography, spectrophotometry), catalysts used (e. g., HCl, methanolic KOH), and specific quantification protocols.
- Key Results: Quantitative outcomes such as lipid yield, accuracy (e. g., correlation coefficients), relative standard deviation, and method comparison outcomes (e. g., method A yielded 15 % higher lipid values than method B).
- Limitations and Challenges: Method-specific critiques, reported analytical difficulties, limitations in sensitivity or specificity, and any author-recommended improvements.

Where specific values or techniques were not fully described in the text, "Partial information available" or "Not reported" annotations were included for transparency.

For data synthesis, methods were thematically grouped and quantitatively compared based on shared criteria such as lipid recovery efficiency, sample requirements, instrumentation, and validation protocols. Categorization enabled structured comparisons across the techniques — the ranging from traditional extraction to advanced LC–MS/MS and NIR spectroscopy. These efforts provided a reliable basis for evaluating analytical trade-offs in lipid quantification strategies.

3. Results and discussion

Lipid quantification in microalgae is a multifactorial analytical challenge due to cellular diversity, lipid heterogeneity, and environmental influences on biosynthesis. Among the peer-reviewed studies analyzed in this review, nine unique method categories were identified, each aligned with certain technical principles, ranging from gravimetric solvent extraction to real-time spectroscopic assessment. These methods were classified in the Table 1 based on technical approach, degree of quantification, and methodological complexity.

Gravimetric methods, particularly the classical Bligh and Dyer method, and Folch method of extraction, remain popular due to their simplicity and ability to provide total lipid content measuring. However, these methods lack specificity, require toxic solvents, and are labor-intensive [5,10].

Spectrophotometric methods such as the sulfo-phospho-vanillin (SPV) assay are used for their simplicity and relative cost-effectiveness. However, the presence of interfering compounds such as pigments and carbohydrates can influence the accuracy of measurements [11].

Fluorimetric methods using dyes like Nile Red and BODIPY505/515 are increasingly favored for high-throughput and *in vivo* applications usability. These dyes bind selectively to neutral lipids and fluoresce, allowing rapid quantification. However, their efficiency depends on algal cell wall composition, thus leading to inconsistencies among the species [12,13].

Chromatographic methods-such as gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID) or high-performance liquid chromatography (HPLC)-are considered the gold standards for lipid profiling due to

Table 1. **Summary of analytical methods for lipid quantification in microalgae**

Таблица 1. **Обобщенное изложение результатов аналитических методов количественной оценки объема липидов в микроводорослях**

Method category	Specific techniques	Sensitivity	Specificity	Throughput	Major advantages	Limitations	Reference
Gravimetric	Bligh and Dyer, Folch, Soxhlet	Moderate	Low	Low	Simple; provides total lipid content	Time-consuming; low selectivity; use of hazardous solvents	[5,10]
Spectrophotometric	Sulfo-phospho-vanillin (SPV)	Moderate	Low	Moderate	Inexpensive; relatively quick	Interference from pigments and proteins	[11]
Fluorimetric	Nile Red, BODIPY505/515	High	Moderate	High	Non-destructive; rapid; high-throughput screening	Variability in dye uptake; affected by cell wall permeability	[12,13]
Chromatographic	GC-FID, HPLC, TLC	High	High	Low–Medium	High accuracy; allows fatty acid profiling	Requires derivatization; expensive; complex sample preparation	[14,15]
Spectroscopic	FTIR, Raman, NMR, Near-IR	Moderate	Moderate	Moderate	Minimal sample prep; potential for real-time monitoring	Requires calibration; lower accuracy in absolute quantification	[16,17]

their high sensitivity and ability to distinguish between lipid classes and fatty acid chains. However, they require complex instrumentation and derivatization procedures [14,15].

Spectroscopic techniques such as Fourier-transform infrared (FTIR) technique, nuclear magnetic resonance (NMR) method, and Raman spectroscopy are gaining dominance for non-destructive analysis. Though less accurate for absolute lipid quantification, they are useful for monitoring trends in lipid accumulation and require minimal sample preparation [16,17].

Figure 1 provides a comprehensive comparative overview of the principal lipid quantification methods applied in microalgae research. The figure categorizes these techniques into four main groups: extraction methods, fluorometric/colorimetric methods, spectroscopic methods, and chromatographic methods. Under extraction methods, both solvent extraction and direct transesterification are presented, highlighting their operational peculiar characteristics such as efficiency, accuracy, and susceptibility to the sample composition. Fluorometric and colorimetric approaches, including Nile Red fluorescence and the sulfo-phospho-vanillin (SPV) assay, are noted for their rapidity and high accuracy, although limitations like cell wall permeability can affect performance. Spectroscopic techniques, such as Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and near-infrared (NIR) spectroscopy, offer non-destructive, rapid analysis, with NIR achieving superior accuracy across the species. Chromatographic techniques, encompassing supercritical CO_2 extraction and liquid chromatography-mass spectrometry (LC–MS/MS), demonstrate high resolution in lipid profiling but require expensive tooling, instrumentation and longer processing times. This integrative visual summary (Figure 1) facilitates an at-a-glance understanding of the methodological landscape, thus enabling researchers to evaluate trade-offs between precision, throughput, and resource demands when selecting the appropriate lipid analysis techniques for microalgae.

3.1. Extraction methods

Lipid extraction remains a foundational step in the quantitative and qualitative analysis of lipid content in microalgal biomass. Among the various approaches, solvent-based extraction and direct transesterification are the most widely utilized due to their relatively high reliability, albeit with certain limitations that have prompted continuous methodological refinements.

3.1.1. Solvent-based extraction methods

The most commonly cited classical methods include the Bligh and Dyer method and the Folch method. These are based on the partitioning of lipids into a mixture of polar and nonpolar solvents, typically chloroform-methanol-water systems [5].

The Bligh and Dyer Method (1959) is one of the most extensively applied protocols, particularly suited for the wet samples. This method utilizes a chloroform-methanol (1:2, v/v) solution followed by water addition to induce phase separation. However, while efficient for samples with lower lipid content, it often underestimates lipid yield in dry biomass and can be limited due to emulsification issues [18].

The Folch Method (1957), which uses a higher solvent-to-sample ratio (chloroform-methanol 2:1, v/v), is better suited for lipid-rich samples and tends to extract more total lipids than Bligh and Dyer's method [10]. Despite this, its high volume of toxic solvents raises environmental and safety concerns.

Soxhlet Extraction is another classical method, which continuously washes dried biomass with organic solvents (e. g., hexane, petroleum ether) under reflux. Although this method provides relatively exhaustive extraction, it is time-consuming (typically 6–8 hours), energy-intensive, and its application is limited to dried biomass only [19].

These solvent-based methods, though widely used, present several challenges such as the requirement for toxic solvents, incomplete

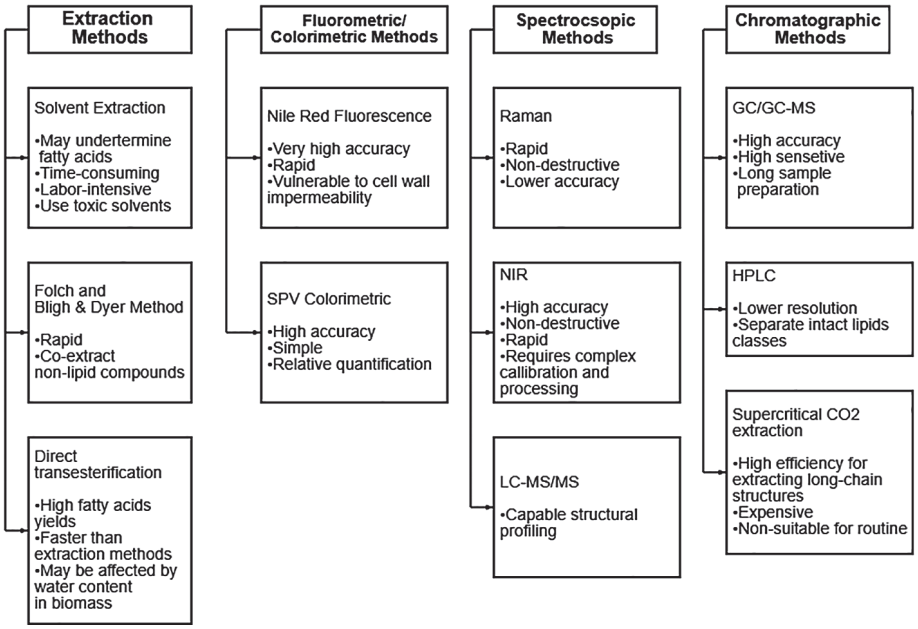


Figure 1. **Comparison of lipid quantification methods in microalgae**

Рисунок 1. **Сравнение методов количественной оценки объема липидов в микроводорослях**

extraction of bound lipids, and time-intensive procedures, which hinder high-throughput applications.

3.1.2. Direct transesterification

Direct transesterification bypasses the need for prior lipid extraction by directly converting fatty acids into fatty acid methyl esters (FAMEs) using an acid or base catalyst in the presence of methanol [20]. This technique has gained popularity due to its ability to more comprehensively convert both free and bound fatty acids in microalgae, especially for biodiesel-production oriented researches.

The primary advantages of this method include a shorter analysis time and higher total lipid yields compared to solvent extraction techniques. Nevertheless, the presence of water in the biomass can lead to saponification reactions and reduced FAME yields, requiring careful sample pretreatment and drying [21].

From the Table 2, it is evident that though the Soxhlet method features the highest extraction efficiency, it is impractical for large-scale or time-sensitive analyses. Bligh and Dyer's and Folch's methods offer a good balance between yield and time but are hindered by solvent toxicity and handling complexity. Direct transesterification, though sensitive to moisture, presents a more rapid and yield-efficient alternative, especially for biomass destined for transesterification-based downstream applications such as biodiesel production. Overall, method selection must balance extraction efficiency, safety, environmental impact, and suitability for the sample's type.

Table 2. **Comparison of extraction methods for lipid analysis in microalgae**

Таблица 2. **Сравнение методов экстракции для анализа липидов в микроводорослях**

Method	Sample Type	Accuracy (Yield%)	Solvent Use	Time Required	Key Limitations	Reference
Bligh and Dyer	Wet	80–90	Yes	~1–2 h	Underestimates in dry biomass, emulsification issues	[5]
Folch Method	Wet/ Dry	90–95	Yes	~2 h	Uses large solvent volumes, toxic solvents	[10]
Soxhlet Extraction	Dry	95–98	Yes	6–8 h	Long extraction time, not suitable for wet biomass	[19]
Direct Transeste-rification	Wet/ Dry	95–99	Minimal	~1–2 h	Affected by moisture, requires methylation step	[20]

3.2. Spectrophotometric and fluorometric methods

Spectrophotometric and fluorometric techniques represent the valuable tools in quantification of lipids extracted from microalgal biomass due to their relative simplicity, speed, and cost-effectiveness. These methods are typically applied when a rapid estimation of total lipid content is required, particularly in large-scale screening of strains or growth conditions. Although less detailed than chromatographic or spectroscopic analyses, they serve as instruments in initial assessments.

3.2.1. Sulfo-phospho-vanillin (SPV) colorimetric method

The SPV assay is based on the reaction between unsaturated lipid chains and a sulfuric acid-vanillin-phosphoric acid complex, producing a pink color that can be quantified at 520 nm using a spectrophotometer. This method is relatively sensitive and provides good linearity between lipid concentration and light absorbance ($R^2 \approx 0.99$) [22]. One major limitation, however, is its dependency on the degree of unsaturation in lipid samples, potentially leading to under- or overestimation based on lipid composition. Moreover, this method is destructive and involves the injection of corrosive reagents, such as concentrated sulfuric acid, which poses safety concerns and disposal challenges for environment [23].

3.2.2. Nile red fluorescence staining

Nile Red is a lipophilic dye that fluoresces strongly in non-polar environments such as lipid droplets, emitting at 575–600 nm when excited with blue light. This method is widely used for high-throughput lipid screening due to its rapidity and compatibility with flow cytometry and fluorescence microscopy. It provides high accuracy (R^2 up to 0.998) in species with permeable cell walls [12]. However, the method suffers from several drawbacks: cell wall impermeability in certain microalgal species can hinder dye penetration, leading to an underestimation of lipid content [24]; moreover, Nile Red fluorescence can be quenched or influenced by other cellular components, such as pigments, and it cannot distinguish between neutral and polar lipids [13].

3.2.3. BODIPY staining

BODIPY (boron-dipyrromethene) dyes are another class of fluorescent probes used for lipid detection in microalgae. Compared to Nile Red, BODIPY505/515 exhibits more consistent staining, reduced background fluorescence, and a greater specificity for neutral lipids [25]. Furthermore, it demonstrates improved performance in strains with thicker cell walls and is less susceptible to interference caused by autofluorescent pigments. However, the method is more expensive and requires advanced fluorescence imaging or plate-reader systems. The quantification accuracy is also slightly lower than Nile Red in some cases ($R^2 \approx 0.97–0.98$) [26].

Comparative analysis of the methods is presented in Table 2. These methods are optimal for comparative lipid estimation in microalgae and are often used in early-stage bio-prospecting studies. While colorimetric approaches such as SPV provide reliable quantification at low cost, fluorescence-based techniques, particularly Nile Red and BODIPY, offer superior speed and automation potential for large-scale screening. However, the variability in cell wall composition across microalgal taxa and the influence of interfering compounds demand cautious interpretation and, where possible, method of validation against gravimetric or chromatographic benchmarks.

3.3. Chromatographic methods

Chromatographic techniques have been widely adopted as key analytical tools for the qualitative and quantitative assessment of lipid content and composition in microalgae. Among the most prevalent are gas chromatography (GC), high-performance liquid chromatography (HPLC), and thin-layer chromatography (TLC). Each of these methods offers unique advantages depending on the type of lipids being analyzed, the relevant resolution, and the sample complexity.

Gas Chromatography (GC) is considered as the gold standard for fatty acid methyl ester (FAME) analysis, providing high sensitivity, reproducibility, and resolution for volatile and thermally stable compounds. The process typically involves derivatization of lipids into FAMEs, followed by separation on capillary columns with flame ionization detection (FID) or mass spectrometry (MS) detection [27]. GC-FID is commonly used due to its simplicity and cost-efficiency, whereas GC–MS enables more precise structural representation of results [28]. However, the derivatization step can introduce variability and is not suitable for intact lipid class analysis.

High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) allows for the direct analysis of intact lipid classes without the need for derivatization. HPLC coupled with evaporative light scattering detection (ELSD), diode-array detection (DAD), or tandem mass spectrometry (MS/MS) is particularly effective for profiling neutral lipids, glycolipids, and phospholipids [29]. Reversed-phase HPLC is typically applied for the separation of lipid classes based on chain length and saturation, while normal-phase HPLC is more suited for class-based lipid separation [30]. The method, however, is less efficient in resolving isomeric species compared to GC–MS, and often requires longer analysis times.

Thin-Layer Chromatography (TLC) is a low-cost, rapid screening method used for semi-quantitative lipid profiling. It is particularly useful for preliminary assessments of lipid class distribution. TLC can separate major lipid categories such as triacylglycerols (TAGs), free fatty acids (FFAs), and phospholipids by using specific solvent systems on silica gel plates. Detection can be performed using iodine vapor, charring, or

Table 3. **Comparison of spectrophotometric and fluorometric methods for lipid analysis in microalgae**

Таблица 3. **Сравнение спектрофотометрических и флуоресцентных методов для анализа липидов в микроводорослях**

Method	Principle	Accuracy (R^2)	Advantages	Limitations	References
SPV Colorimetric	Reaction with vanillin and sulfuric acid	~0.99	Simple, inexpensive, relatively accurate	Not lipid-class specific; hazardous reagents; destructive	[22,23]
Nile Red Fluorescence	Fluorescence in hydrophobic environment	0.995–0.998	Rapid, high-throughput, widely used	Cell wall permeability issues; signal interference	[12,13,24]
BODIPY505/515	Neutral lipid-specific fluorescence	0.97–0.98	Improved signal-to-noise; less pigment interference	Expensive; requires advanced instruments	[25,26]

densitometry after plate development [31]. Although TLC offers simplicity, it suffers from limited resolution, poor reproducibility, and lacks sensitivity compared to GC and HPLC.

A comparison of these chromatographic methods is summarized in the Table 4.

Among chromatographic techniques, GC offers the highest precision for fatty acid profiling but is limited with its requirement for derivatization and its inability to assess intact lipid structures. HPLC stands out as a powerful method for intact lipid profiling and identification of bioactive lipids, especially when coupled with mass spectrometry. Its limitations lie in the cost and analytical complexity. TLC, on the other hand, provides a cost-effective and fast solution for general lipid class assessment but lacks the precision and reproducibility required for detailed quantitative analysis. Therefore, the choice of method is highly context-dependent: GC is preferred for detailed fatty acid profiling, HPLC for comprehensive class-based lipidomics, and TLC for preliminary process or high-throughput screening purposes.

3.4. Spectroscopic methods

Spectroscopic techniques have emerged as powerful tools in the field of lipid quantification and characterization due to their non-destructive nature, high specificity, and potential for rapid analysis. These methods are based on the interaction of electromagnetic radiation with lipid molecules, which allows for the elucidation of molecular structures, functional groups, and even quantitative assessment of lipid content in microalgae. Compared to traditional extraction-based techniques, spectroscopy offers the advantage of minimal sample preparation and is increasingly being integrated into real-time and high-throughput lipid analysis pipelines [32].

The development and refinement of spectroscopic methods have enabled researchers to overcome some of the major drawbacks associated with classical lipid extraction and quantification techniques, such as solvent usage, long processing times, and poor reproducibility. In particular, spectroscopic techniques such as Nuclear Magnetic Resonance (NMR), Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy, Raman spectroscopy, and Near-Infrared (NIR) spectroscopy have been extensively explored due to their potential to provide qualitative and quantitative insights into the lipidome array of various microalgal species [33,34].

Each of these methods offers unique advantages: for example, FTIR and NIR are highly amenable to high-throughput screening due to their speed and minimal sample processing requirements, while Raman spectroscopy provides molecular-specific fingerprints without the need for dyes or labels. NMR, despite its high cost, is unmatched in its ability to elucidate detailed molecular structures and quantify lipid classes directly in crude extracts or even intact cells [35]. However, no single spectroscopic method offers a universal solution, and its selection depends on analytical objectives, sample's complexity, and instrumentation availability.

This section focuses on a detailed review of spectroscopic methods applied in the analysis of lipids in microalgae.

3.4.1. Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy

NMR spectroscopy is a highly reliable analytical technique that provides both qualitative and quantitative information about lipids in biological matrices. It operates based on the magnetic properties of atomic nuclei, typically ^1H and ^13C, and their response to external magnetic fields. When applied to lipid analysis, NMR enables the identification of different lipid classes, degrees of unsaturation, and positional isomerism with high accuracy and reproducibility [36].

One of the most significant advantages of NMR over chromatographic and colorimetric methods is its capacity for direct analysis of lipid extracts without the need for derivatization. This makes NMR perfect for structural elucidation and comprehensive lipid profiling. Moreover, NMR can be used quantitatively due to its linear response to concentration changes, providing reliable data on total lipid content and composition [37]. For instance, the integration of specific chemical shifts corresponding to methylene, methyl, or olefinic protons can be used to estimate saturation levels and fatty acid profiles in lipid extracts.

In the context of microalgae, several studies have demonstrated the efficacy of NMR in characterizing complex lipid mixtures. For example, Fan et al. used ^1H NMR to quantify neutral and polar lipids in *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis oceanica*, showing that NMR can yield comparable or superior results to conventional gas chromatography (GC) methods, especially in terms of reproducibility and speed [38]. Another study by Yunus et al. applied ^13C NMR to analyze lipid accumulation under nitrogen starvation in *Scenedesmus* species, revealing significant shifts in carbon skeleton composition that correlated with triacylglycerol production [39].

High-resolution NMR techniques such as two-dimensional (2D) correlation spectroscopy (COSY), heteronuclear single quantum coherence (HSQC), and total correlation spectroscopy (TOCSY) further expand the capabilities of NMR, allowing for detailed assignment of overlapping signals and identification of minor lipid species. These advanced techniques are particularly useful for resolving complex lipidomes in microalgae, where the diversity of lipid classes and structural isomers poses analytical challenges [40].

Despite its analytical power, NMR spectroscopy features limitations that restrict its widespread application in routine lipid analysis. The primary challenges include the high cost of instrumentation and maintenance, the requirement for skilled personnel, and lower sensitivity compared to mass spectrometry-based methods. Additionally, the interpretation of complex spectra can be time-consuming, particularly when dealing with heterogeneous samples or unknown compounds [41].

Nevertheless, NMR remains an indispensable tool for comprehensive lipid analysis in research settings, especially when detailed structural information is required. Recent advancements in cryogenically cooled probes, automation, and pulse sequence optimization are gradually improving sensitivity and throughput, making NMR more accessible for lipidomics applications [41].

3.4.2. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy has emerged as a reliable, non-destructive analytical technique in the field of lipid quantification due to its capacity to provide detailed molecular fingerprints of complex biological samples. FTIR measures the absorption of infrared radiation by molecular bonds, which results in characteristic vibrational spectra which correspond to specific functional groups. In lipid analysis, the most informative regions are those related to CH2 and CH3 stretching vibrations, typically found between 2800 and 3000 cm^{-1}, and ester carbonyl that stretches around 1740 cm^{-1} [42].

One of the primary advantages of FTIR is its rapid sample processing, with minimal preparation. Samples, whether in solid or liquid form, can be directly analyzed or immobilized on attenuated total reflectance (ATR) crystals, enhancing throughput and reproducibility. FTIR has been applied for monitoring lipid accumulation in microalgae such as *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis oculata*, with strong correlations to traditional gravimetric and chromatographic techniques [43].

However, the limitations of FTIR should not be overlooked. The technique is semi-quantitative unless calibrated against reference methods like gas chromatography (GC). Moreover, overlapping spectral bands in complex biological matrices can complicate spectral interpretation. Despite these limitations, recent studies have shown that multivariate calibration techniques such as partial least squares regression (PLSR) can significantly improve the accuracy of lipid quantification via FTIR [44].

3.4.3. Raman spectroscopy

Raman spectroscopy, based on inelastic scattering of monochromatic light (typically from a laser), has also gained significant attention in microalgal lipid analysis. The technique provides complementary information to FTIR, especially valuable in aqueous environments where water exhibits strong IR absorption but minimal Raman scattering [45]. Characteristic Raman bands for lipids include those at 1440 cm^{-1} (CH2 scissoring), 1655 cm^{-1} (C=C stretching), and 1300 cm^{-1} (CH2 twisting), thus enabling the assessment of lipid saturation and unsaturation [46].

Table 4. **Comparison of chromatographic methods for lipid analysis in microalgae**

Таблица 4. **Сравнение хроматографических методов анализа липидов в микроводорослях**

Method	Sample Preparation	Detection Type	Lipid Type	Advantages	Limitations	Sensitivity (LOD)	R^2	Reference
Gas Chromatography (GC-FID/MS)	FAME derivatization	FID/MS	Fatty acids	High resolution, excellent quantification	Requires derivatization, not for intact lipids	~1 ng	0.995–0.999	[27,28]
HPLC (RP or NP, ELSD/MS)	Minimal, no derivatization	ELSD/DAD/MS	Intact lipid classes	No derivatization, suitable for class profiling	Expensive, lower resolution for isomers	~10–100 ng	0.990–0.998	[29,30]
Thin-Layer Chromatography (TLC)	Minimal	Visual/Densitometry	Lipid classes	Inexpensive, rapid screening	Semi-quantitative, low resolution	~1 µg	~0.95	[31]

Raman spectroscopy offers exceptional spatial resolution, making it suitable for single-cell lipid profiling. This is particularly advantageous in studies of microalgal heterogeneity, where the lipid content can vary significantly between cells even under the same cultivation conditions. Confocal Raman microscopy allows for subcellular imaging of lipid bodies, thereby providing both qualitative and semi-quantitative insights into lipid accumulation [47].

Nevertheless, the Raman technique also has its drawbacks. The weak Raman signal often necessitates long acquisition times or signal enhancement strategies, such as surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), which can increase complexity and cost. Additionally, fluorescence interference caused from pigments such as chlorophyll can mask Raman signals, particularly in photosynthetic organisms like microalgae [48].

3.4.4. Near-infrared (NIR) spectroscopy

Near-infrared (NIR) spectroscopy is another vibrational spectroscopic technique increasingly used in lipid quantification. NIR operates within the 780–2500 nm range and detects overtones and combinations of molecular vibrations primarily involving CH, OH, and NH bonds. In microalgae, NIR spectroscopy has been applied for rapid extimation of total lipid content, with minimal sample preparation [49].

Compared to mid-IR methods like FTIR, NIR offers deeper penetration and faster result acquisition times, making it suitable for high-throughput screening. Furthermore, NIR instruments can be integrated into process monitoring systems, facilitating real-time observation of lipid production during microalgal cultivation [50].

Despite these advantages, NIR is inherently less specific than FTIR or Raman spectroscopy due to the broad and overlapping nature of overtone bands. This necessitates the application of advanced chemometric tools for data interpretation. The calibration of NIR models also requires a large and diverse dataset covering a broad range of lipid concentrations and species-specific variability [4].

The comparative analysis presented in the Table 5 of the spectroscopic techniques highlights the diversity of the available tools for lipid quantification in microalgae, each suited for specific contexts. FTIR offers a rapid, non-destructive option with reasonable accuracy, but it suffers from signal overlap with other macromolecules, necessitating thorough calibration. Raman spectroscopy, particularly in its confocal variant, stands out for its high specificity and spatial resolution, enabling lipid visualization at the single-cell level. However, this comes at the cost of more sophisticated equipment and lower throughput.

Near-infrared (NIR) spectroscopy is notable for its portability and throughput, making it an excellent candidate for real-time and in-line industrial monitoring, although its specificity is more limited than mid-infrared or Raman techniques.

In terms of quantitative reliability, all methods demonstrate relatively high correlation coefficients ($R^2 > 0.85$), while confocal Raman and fluorescence methods typically achieve the highest values. Ultimately, the choice of method depends on the analytical goal — be it process monitoring, cellular imaging, or rapid screening. Combining complementary techniques may often yield the most reliable analytical outcomes.

3.5. Comparative analysis of lipid quantification methods

Quantification of lipids in microalgae is a cornerstone in evaluating their potential for biofuel production and bioproduct applications. Multiple analytical techniques — gravimetric, colorimetric, chromatographic, spectroscopic, and fluorimetric — have been developed and applied in this context, each featuring certain advantages and limitations. A holistic comparison is essential for selecting an appropriate methodology tailored to the specific research or industrial goals, especially considering the parameters such as accuracy, specificity, required instrumentation, sample throughput, and environmental sustainability.

Gravimetric methods, particularly those based on solvent extraction (e. g., Bligh and Dyer or Folch methods), are traditionally employed due to their simplicity and directness in quantifying total lipid content [5]. These methods are cost-effective and relatively easy to perform but lack specificity and can overestimate lipid content due to co-extraction of non-lipid materials such as pigments and carbohydrates [18].

Colorimetric methods, including the sulfo-phospho-vanillin (SPV) and Nile Red assays, offer rapid assessment of lipid content and are suitable for high-throughput screening [11,51]. SPV is advantageous for estimating total lipids with relatively high sensitivity, while Nile Red is used for intracellular lipid localization and semi-quantitative analysis [13]. However, colorimetric techniques can be influenced by interfering substances, and the reproducibility may vary based on species and cellular conditions.

Chromatographic methods, especially gas chromatography (GC) and high-performance liquid chromatography (HPLC), provide high-resolution lipid profiling, enabling both qualitative and quantitative analysis of fatty acid methyl esters (FAMEs) and complex lipid species [27,52]. GC coupled with flame ionization detection (GC-FID) or mass spectrometry (GC–MS) is widely regarded as the gold standard for fatty acid quantification. These methods, however, require derivatization steps and advanced instrumentation, thus limiting their accessibility in resource-limited laboratories [14].

Spectroscopic methods, such as nuclear magnetic resonance (NMR) and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, enable non-destructive analysis of lipid components and structural information without chemical derivatization [53]. NMR provides detailed insights into lipid classes and chain composition with high reproducibility, albeit with significant instrument costs and lower sensitivity compared to chromatographic approaches [54]. FTIR and Raman spectroscopy are advantageous for rapid screening and potential in-line monitoring applications but generally provide semi-quantitative data and are susceptible to spectral overlap [55].

Fluorimetric methods, such as those using BODIPY and Nile Red fluorescent dyes, allow real-time, *in vivo* imaging of lipid accumulation with high spatial resolution, and are widely used in strain screening and metabolic studies [25]. These techniques are fast and relatively simple but can be affected by dye penetration issues and autofluorescence emitted from algal pigments, which complicates data interpretation [12].

From the comparative assessment, it is evident that no single technique is universally optimal for all research or industrial scenarios. Gravimetric and colorimetric methods remain suitable for preliminary estimations and low-resource settings due to their cost-effectiveness and simplicity. Chromatographic techniques provide unequalled specificity and accuracy in lipid profiling but require specialized infrastructure and expertise. Spectroscopic and fluorimetric methods offer promising non-destructive and high-throughput capabilities, making them perfect for rapid screening, particularly in biotechnology and bioengineering contexts. Ultimately, the selection of a quantification method should consider the balance between analytical rigor, resource availability, and the specific research objectives.

Table 5. **Comparison of spectroscopic methods for lipid analysis in microalgae**

Таблица 5. **Сравнение спектроскопических методов анализа липидов в микроводорослях**

Method	Principle	Sample Preparation	Specificity to Lipids	Sensitivity	Throughput	Quantitative Accuracy (R^2)	Advantages	Limitations	References
FTIR (Fourier-Transform Infrared)	Measures absorbance of lipid-specific bonds (e.g., C=O stretch)	Minimal (dry biomass)	Moderate	Moderate	High	~0.90–0.96	Non-destructive, fast, requires small sample volume	Interference from proteins/carbohydrates; requires calibration	[43,44]
Raman Spectroscopy	Scatters monochromatic light to detect vibrational modes of lipid molecules	Minimal (live or fixed cells)	High	High	Medium	~0.95–0.98	Label-free, can analyze living cells, high spatial resolution	Fluorescence background; limited depth penetration	[45–47]
Confocal Raman Microscopy	Raman with spatial mapping capability	Moderate	Very High	High	Medium	~0.97	Single-cell resolution, enables 3D lipid mapping	Expensive, complex instrumentation	[48]
NIR (Near-Infrared Spectroscopy)	Measures overtone vibrations, especially CH bonds	Low (intact biomass or slurry)	Moderate	Moderate	Very High	~0.85–0.92	Rapid, portable instruments available, suitable for real-time monitoring	Lower molecular specificity; needs robust chemometric calibration	[49,50]

3.5.1. Selection of the method for specific applications

The appropriate selection of a lipid quantification method in microalgae depends on several interrelated factors, including the biological material, desired data resolution, available instrumentation, cost, and required throughput. For example, when absolute quantification is required for biofuel yield estimation, gravimetric methods or GC-based fatty acid methyl ester (FAME) analysis are typically used due to their robustness and reproducibility [56]. In contrast, rapid screening of high-lipid-producing strains under variable environmental conditions is better served by high-throughput techniques such as Nile Red fluorescence or NIR spectroscopy [11,13].

Industrial-scale applications benefit from methods that offer real-time monitoring, such as FTIR or NIR, which can be integrated into process analytical technology (PAT) frameworks [55]. These methods, while often less precise than chromatographic analyses, enable fast decision-making for harvesting and processing steps.

Research requiring structural elucidation — e. g., lipid biosynthesis pathway elucidation or representation of membrane lipid composition under stress — typically uses NMR, HPLC–MS, or GC–MS techniques due to their high specificity and structural insight [52,53]. Fluorescence microscopy with dyes such as BODIPY is also commonly used in metabolic engineering studies, where spatial localization of lipid droplets provides critical information [25].

3.5.2. Combined and sequential approaches

No single method comprehensively meets all analytical needs. Therefore, sequential or complementary approaches are often applied to balance speed, resolution, and quantification accuracy. For instance, SPV or Nile Red staining may be used for preliminary screening of multiple strains or treatments, followed by gravimetric or chromatographic quantification for the selected samples [27,27]. This two-tiered strategy is particularly efficient in bioprospecting and mutagenesis-based lipid productivity enhancement programs.

Another example involves combining FTIR or NIR with GC-FID. FTIR/NIR models can be calibrated using a representative sample set analyzed via GC, allowing subsequent FTIR/NIR predictions to provide rapid, non-destructive lipid estimates [54]. Such hybrid workflows are also applicable to machine learning-based prediction models, which increasingly use spectral data to predict biochemical parameters with high accuracy [53].

3.5.3. Emerging trends and future trends directions

The field of lipid analysis is witnessing a shift toward automation, miniaturization, and integrative omics. Microfluidic platforms combined with Raman or fluorescence microscopy now enable real-time, single-cell lipid analysis, thus making them powerful tools for evolutionary screening or synthetic biology applications [13]. Likewise, biosensor-based technologies that couple selective lipid binding proteins with optical or electrochemical readouts are under active development [12].

Moreover, advanced data analytics, including chemometrics and machine learning, are enhancing the interpretability of complex spectral datasets, especially those obtained from FTIR and NIR platforms [54]. This is paving the way for deployment of intelligent lipid monitoring systems in algal biorefineries.

Finally, sustainability concerns are encouraging the development of greener methods, reducing solvent use and hazardous chemicals. Techniques such as supercritical CO_2 extraction, green solvents, and direct-*in situ* lipid estimation methods are gaining prominence [14].

4. Conclusion

A critical assessment of the methodologies used for lipid quantification in microalgae highlights the analytical complexity and multidimensional character of this task. As microalgae increasingly emerge as viable platforms for sustainable production of biofuels, nutraceuticals, and lipid-derived compounds, the need for accurate, reproducible, and context-adapted quantification strategies becomes essential — both in basic research and in the process scale-up.

The examined techniques — ranging from classical gravimetric approaches to advanced spectroscopic, chromatographic, and fluorometric systems — each offer distinctive benefits and pose particular limitations, often dictated by their specificity, sensitivity, required infrastructure, and throughput potential. While solvent-based extraction methods remain widely used for estimating total lipid content, they are limited in selectivity and may overestimate due to co-extraction of non-lipid substances. Chromatographic techniques, although highly informative in terms of lipid class composition and fatty acid distribution, are labor-intensive and often require complex instrumentation and derivatization steps. Spectroscopic approaches provide a non-destructive and relatively fast alternative, but they frequently require calibration models and may not deliver adequate resolution when used alone. Fluorescent staining techniques, particularly those compatible with live-cell analysis, have become indispensable for high-throughput screening applications but are often affected by variability in cell permeability and pigment background.

In practice, no single method meets all analytical needs. A combined approach -wherein rapid screening is followed by targeted, high-resolution analysis — often represents the most efficient and reliable strategy. The integration of multiple techniques allows for both qualitative and quantitative lipid insights, enhancing data reliability and enabling more informed decision-making process in experimental workflows.

Ultimately, method selection must be guided by the specific goals of the research — whether focused on rapid strain screening, absolute lipid quantification, or detailed lipidomic profiling. Considerations such as scalability, reproducibility, time efficiency, and operational cost should further inform this choice. At the same time, the lack of standardized protocols keep being a barrier to cross-study comparability and broader industrial implementation.

Looking forward it is obvious, that methodological innovation will likely involve increased automation, the use of integrated lab-on-chip platforms, and the application of AI-driven analytics to handle complex datasets and support real-time decision-making. In parallel, collaborative efforts aimed toward harmonizing the protocols and validating techniques across laboratories will be the key to ensuring data consistency and accelerating development across the algal biotechnology sector.

In conclusion, the reliable and standardized lipid quantification is a cornerstone of successful microalgal bioprocess development. The future of this field will rely not only on refining individual techniques but also on strategically integrating them into cohesive analytical pipelines that match the scale and complexity of emerging biotechnological challenges.

REFERENCES / БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nguyen, H. T. D., Ramli, A., Kee, L. M. (2017). A review on methods used in analysis of microalgae lipid composition. *Journal of the Japan Institute of Energy* 96(12), 532–537. https://doi.org/10.3775/jie.96.532
2. Zhou, J., Wang, M., Saraiva, J. A., Martins, A. P., Pinto, C. A., Prieto, M. A. et al. (2022). Extraction of lipids from microalgae using classical and innovative approaches. *Food Chemistry*, 384, Article 132236. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132236
3. Yao, L., Gerde, J. A., Lee, S. L., Wang, T., Harrata, K. A. (2015). Microalgae lipid characterization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(6), 1773–1787. https://doi.org/10.1021/jf5050603
4. Challagulla, V., Nayar, S., Walsh, K., Fabbro, L. (2017). Advances in techniques for assessment of microalgal lipids. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(5), 566–578. https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1206058
5. Bligh, E. G., Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911–917. https://doi.org/10.1139/o59-099
6. Morales, M., Aflalo, C., Bernard, O. (2021). Microalgal lipids: A review of lipids potential and quantification for 95 phytoplankton species. *Biomass and Bioenergy*, 150, Article 106108. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106108
7. Byreddy, A., Gupta, A., Barrow, C., Puri, M. (2016). A quick colorimetric method for total lipid quantification in microalgae. *Journal of Microbiological Methods*, 125, 28–32. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2016.04.002
8. Yang, M., Fan, Y., Wu, P.-C., Chu, Y.-D., Shen, P. — L., Xue, S. et al. (2017). An extended approach to quantify triacylglycerol in microalgae by characteristic fatty acids. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 1949. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01949
9. Blanco-Llamero, C., García-García, P., Señoráns, F. J. (2024). Efficient green extraction of nutraceutical compounds from nannochloropsis gaditana: A comparative electrospray ionization LC–MS and GC–MS analysis for lipid profiling. *Foods*, 13(24), Article 4117. https://doi.org/10.3390/foods13244117
10. Folch, J., Lees, M., Sloane Stanley, G. H. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *The Journal of Biological Chemistry*, 226(1), 497–509. https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5
11. Mishra, S. K., Suh, W. I., Farooq, W., Moon, M., Shrivastav, A., Park, M. S. et al. (2014). Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method. *Bioresource Technology*, 155, 330–333. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077
12. Elsey, D., Jameson, D., Raleigh, B., Cooney, M. J. (2007). Fluorescent measurement of microalgal neutral lipids. *Journal of Microbiological Methods*, 68(3), 639–642. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2006.11.008
13. Rumin, J., Bonnefond, H., Saint-Jean, B., Rouxel, C., Sciandra, A., Bernard, O. et al. (2015). The use of fluorescent Nile red and BODIPY for lipid measurement in microalgae. *Biotechnology for Biofuels*, 8(1), Article 42. https://doi.org/10.1186/s13068-015-0220-4

14. Wahlen, B.D., Willis, R.M., Seefeldt, L.C. (2011). Biodiesel production by simultaneous extraction and conversion of total lipids from microalgae, cyanobacteria, and wild mixed-cultures. *Bioresource Technology*, 102(3), 2724–2730. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.026
15. Breuer, G., Lamers, P. P., Martens, D. E., Draaisma, R. B., Wijffels, R. H. (2013). The impact of nitrogen starvation on the dynamics of triacylglycerol accumulation in nine microalgae strains. *Bioresource Technology*, 124, 217–226. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.003
16. Meng, Y., Yao, C., Xue, S., Yang, H. (2014). Application of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in determination of microalgal compositions. *Bioresource Technology*, 151, 347–354. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.064
17. Dean, A. P., Sigee, D. C., Estrada, B., Pittman, J. K. (2010). Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae. *Bioresource Technology*, 101(12), 4499–4507. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.065
18. Iverson, S. J., Lang, S. L., Cooper, M. H. (2001). Comparison of the bligh and dyer and folch methods for total lipid determination in a broad range of marine tissue. *Lipids*, 36(11), 1283–1287. https://doi.org/10.1007/s11745-001-0843-0
19. Saini, R. K., Prasad, P., Shang, X., Keum, Y. -S. (2021). Advances in lipid extraction methods — A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24), Article 13643. https://doi.org/10.3390/ijms222413643
20. Lewis, T., Nichols, P. D., McMeekin, T. A. (2000). Evaluation of extraction methods for recovery of fatty acids from lipid-producing microheterotrophs. *Journal of Microbiological Methods*, 43(2), 107–116. https://doi.org/10.1016/s0167-7012(00)00217-7
21. Halim, R., Danquah, M. K., Webley, P. A. (2012). Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, 30(3), 709–732. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.001
22. Chen, Z., Wang, L., Qiu, S., Ge, S. (2018). Determination of microalgal lipid content and fatty acid for biofuel production. *BioMed Research International*, 2018, Article 1503126. https://doi.org/10.1155/2018/1503126
23. Lee, J.-Y., Yoo, C., Jun, S.-Y., Ahn, C.-Y., Oh, H.-M. (2010). Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, 101(1, Supplement), S75-S77. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058
24. Chen, W., Zhang, C., Song, L., Sommerfeld, M., Hu, Q. (2009). A high throughput Nile red method for quantitative measurement of neutral lipids in microalgae. *Journal of Microbiological Methods*, 77(1), 41–47. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2009.01.001
25. Cooper, M. S., Hardin, W. R., Petersen, T. W., Cattolico, R. A. (2010). Visualizing "green oil" in live algal cells. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109(2), 198–201. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.08.004
26. Brennan, L., Fernández, A.B., Mostaert, A. S., Owende, P. (2012). Enhancement of BODIPY505/515 lipid fluorescence method for applications in biofuel-directed microalgae production. *Journal of Microbiological Methods*, 90(2), 137–143. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2012.03.020
27. Khozin-Goldberg, I., Cohen, Z. (2006). The effect of phosphate starvation on the lipid and fatty acid composition of the fresh water eustigmatophyte *Monodus subterraneus*. *Phytochemistry*, 67(7), 696–701. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.01.010
28. Guschina, I. A., Harwood, J. L. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45(2), 160–186. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.01.001
29. Triebl, A., Trötzmüller, M., Hartler, J., Stojakovic, T., Köfeler, H. C. (2017). Lipidomics by ultrahigh performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry and its application to complex biological samples. *Journal of Chromatography B,* 1053, 72–80. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2017.03.027
30. Li-Beisson, Y., Thelen, J. J., Fedosejevs, E., Harwood, J. L. (2019). The lipid biochemistry of eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 74, 31–68. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.01.003
31. Ryckebosch, E., Bruneel, C., Termote-Verhalle, R., Goiris, K., Muylaert, K., Foubert, I. (2014). Nutritional evaluation of microalgae oils rich in omega-3 long chain polyunsaturated fatty acids as an alternative for fish oil. *Food Chemistry*, 160, 393–400. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.087
32. Pääkkönen, S., Pölönen, I., Calderini, M., Yli-Tuomola, A., Ruokolainen, V., Vihinen-Ranta, M. et al. (2025). Lipid monitoring of Chlorella vulgaris using non-invasive near-infrared spectral imaging. *Journal of Applied Phycology*, 37(1), 205–219. https://doi.org/10.1007/s10811-024-03397-6
33. Shao, Y., Gu, W., Qiu, Y. A., Wang, S., Peng, Y., Zhu, Y. M. et al. (2020). Lipids monitoring in Scenedesmus obliquus based on terahertz technology. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1), Article 161. https://doi.org/10.1186/s13068-020-01801-0
34. Kiyani, D. A., Maryam, S., Amina, S. J., Ahmad, A., Chattha, M. W. A., Janjua, H. A. (2023). Lipid extraction and analysis of microalgae strain pectinodesmus PHM3 for biodiesel production. *BMC Biotechnology*, 23(1), Article 20. https://doi.org/10.1186/s12896-023-00784-8
35. Bouillaud, D., Drouin, D., Charrier, B., Jacquemmoz, C., Farjon, J., Giraudeau, P. et al. (2020). Using benchtop NMR spectroscopy as an online non-invasive *in vivo* lipid sensor for microalgae cultivated in photobioreactors. *Process Biochemistry*, 93, 63–68. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.03.016
36. Bouillaud, D., Heredia, V., Castaing-Cordier, T., Drouin, D., Charrier, B., Gonçalves, O. et al. (2019). Benchtop flow NMR spectroscopy as an online device for the in vivo monitoring of lipid accumulation in microalgae. *Algal Research*, 43, Article 101624. https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101624
37. Cheng, F., Cui, Z., Chen, L., Jarvis, J., Paz, N., Schaub, T. et al. (2017). Hydrothermal liquefaction of high- and low-lipid algae: Bio-crude oil chemistry. *Applied Energy*, 206, 278–292. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.105
38. Harini, A. B., Sarangi, N. V., Nisha, N., Rajkumar, R. (2023). Cultivation of marine diatom, *Amphora* sp. in municipal wastewater for enhancing lipids toward sustainable biofuel production. *South African Journal of Botany*, 155, 288–297. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.02.007
39. Akonjuen, B. M., Onuh, J. O., Aryee, A. N. A. (2023). Bioactive fatty acids from non-conventional lipid sources and their potential application in functional food development. *Food Science and Nutrition*, 11(10), 5689–5700. https://doi.org/10.1002/fsn3.3521
40. Jaiswal, K. K., Kumar, V., Vlaskin, M. S., Nanda, M. (2020). Impact of glyphosate herbicide stress on metabolic growth and lipid inducement in *Chlorella sorokiniana* UUIND6 for biodiesel production. *Algal Research*, 51, Article 102071. https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102071
41. Martínez-Bisbal, M. C., Mestre, N. C., Martínez-Máñez, R., Bauzá, J., Fillol, M. A. (2019). Microalgae degradation follow up by voltammetric electronic tongue, impedance spectroscopy and NMR spectroscopy. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 281, 44–52. https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.10.069
42. Mayers, J. J., Flynn, K. J., Shields, R. J. (2013). Rapid determination of bulk microalgal biochemical composition by Fourier-Transform Infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*, 148, 215–220. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.133
43. Feng, G. D., Zhang, F., Cheng, L. -H., Xu, X. -H., Zhang, L., Chen, H. -L. (2013). Evaluation of FT-IR and Nile Red methods for microalgal lipid characterization and biomass composition determination. *Bioresource Technology*, 128, 107–112. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.123
44. Czamara, K., Majzner, K., Pacia, M. Z., Kochan, K., Kaczor, A. A., Baranska, M. (2015). Raman spectroscopy of lipids: A review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 46(1), 4–20. https://doi.org/10.1002/jrs.4607
45. Wu, H., Volponi, J. V., Oliver, A. E., Parikh, A. N., Simmons, B. A., Singh, S. (2011). In vivo lipidomics using single-cell Raman spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(9), 3809–3814. https://doi.org/10.1073/pnas.1009043108
46. Sharma, S. K., Nelson, D. R., Abdrabu, R., Khraiwesh, B., Jijakli, K., Arnoux, M. et al. (2015). An integrative Raman microscopy-based workflow for rapid in situ analysis of microalgal lipid bodies. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 8, Article 164. https://doi.org/10.1186/s13068-015-0349-1
47. Shao, Y., Fang, H., Zhou, H., Wang, Q., Zhu, Y., He, Y. (2017). Detection and imaging of lipids of Scenedesmus obliquus based on confocal Raman microspectroscopy. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 10(1), Article 300. https://doi.org/10.1186/S13068-017-0977-8
48. Bruñas Gómez, I., Casale, M., Barreno, E., Catalá, M. (2022). Near-infrared metabolomic fingerprinting study of lichen thalli and phycobionts in culture: Aquaphotomics of *Trebouxia lynnae* dehydration. *Microorganisms*, 10(12), Article 2444. https://doi.org/10.3390/microorganisms10122444
49. Beć, K. B., Grabska, J., Huck, C. W. (2020). Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*, 25(12), Article 2948. https://doi.org/10.3390/molecules25122948
50. Podevin, M., Fotidis, I. A., Angelidaki, I. (2018). Microalgal process-monitoring based on high-selectivity spectroscopy tools: Status and future perspectives. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(5), 704–718. https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1398132
51. Cheng, Y.-S., Zheng, Y., Labavitch, J.M., VanderGheynst, J.S. (2011). Rapid quantification of total lipids using a colorimetric method in green microalgae. *Lipids*, 46(1), 95–103. https://doi.org/10.1007/s11745-010-3494-0
52. Khozin-Goldberg, I., Iskandarov, U., Cohen, Z. (2011). LC-PUFA from photosynthetic microalgae: Occurrence, biosynthesis, and prospects in biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91(4), 905–915. https://doi.org/10.1007/s00253-011-3441-x
53. Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M. et al. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54(4), 621–639. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03492.x
54. Lete, M. G., Tripathi, A., Chandran, V., Bankaitis, V. A., McDermott, M. I. (2020). Lipid transfer proteins and instructive regulation of lipid kinase activities: Implications for inositol lipid signaling and disease. *Advances in Biological Regulation*, 78, Article 100740. https://doi.org/10.1016/j.jbior.2020.100740
55. Wagner, H., Jungandreas, A., Fanesi, A., Wilhelm, C. (2014). Surveillance of C-allocation in microalgal cells. *Metabolites*, 4(2), 453-464. https://doi.org/10.3390/metabo4020453
56. Han, Y., Wen, Q., Chen, Z., Li, P. (2011). Review of methods used for microalgal lipid-content analysis. *Energy Procedia,* 12, 944-950. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.124

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ivan V. Morshchinin, Engineer, Faculty of Ecotechnologies, ITMO University 49, lit. A, Kronverksky pr., St. Petersburg, 197101, Russia Tel.: +7–996–182–32–99 E-mail: keshanowak@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0008-3857-3994	**Морщинин Иван Владимирович** — инженер, факультет экотехнологий, Национальный исследовательский университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А Тел.: +7–996–182–32–99 E-mail: keshanowak@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0008-3857-3994
Критерии авторства	**Contribution**
Автор самостоятельно подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.	Completely prepared the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.	The author declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-276-285

Поступила 07.04.2025
Поступила после рецензирования 17.06.2025
Принята в печать 20.06.2025
© Ульрих Е. В., Ключко Н. Ю., Агафонова С. В., Землякова Е. С., Сухих С. А., Качанова А. В., Федорова О. С., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

МАКРОФИТЫ ЭКОСИСТЕМЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ КАК ИСТОЧНИК СЫРЬЯ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ульрих Е. В., Ключко Н. Ю., Агафонова С. В., Землякова Е. С., Сухих С. А., Качанова А. В., Федорова О. С.

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *макроводоросли, прибрежно-водные растения, рдест, ряска, телорез, биологически активные свойства, пищевая промышленность*

АННОТАЦИЯ

В качестве источников биомассы для комплексной переработки могут быть использованы такие типы ресурсов, как водоросли, водные растения (макрофиты) и их метаболиты. Целью настоящего исследования является анализ видового многообразия, особенностей произрастания и потенциала производства биологически активных веществ макрофитов экосистемы Балтийского моря для использования в пищевой, кормовой и нутрицевтической промышленностях. Макроводоросли Балтийского моря являются перспективным сырьем для получения ценных биологически активных соединений, поскольку они быстро растут, легко размножаются и не требуют специальных площадей или ресурсов для накопления биомассы. Значительные объемы водорослей могут быть обнаружены на берегу (штормовые выбросы), то есть получены без затрат на их добычу. Выделение комплекса биологически активных веществ является наиболее подходящим способом использования их потенциала в качестве антибактериальных, антиоксидантных, антиканцерогенных, противовоспалительных и гепатопротекторных агентов. Многие из прибрежно-водных растений доступны, интенсивно размножаются, образуя значительное количество биомассы, которая не имеет достаточного применения в различных областях промышленности, сельском и лесном хозяйстве, рыбоводстве, медицине и др. Макрофиты имеют высокую пищевую ценность и являются перспективным сырьем для выделения как нутрицевтиков, так и парафармацевтиков. Актуально изучение потенциала ряски для очистки сточных вод, при этом возможна ее переработка в ценную биомассу для корма животных и производства биологически активных веществ. Прибрежно-водное растение рдест обладает антиоксидантной активностью и антибактериальным действием в отношении как грамотрицательной, так и грамположительной микрофлоры. Макрофит телорез широко распространен на территории Калининградской области. Высокое содержание таких макроэлементов, как магний, кальций и фосфор в телорезе способствует повышению качества кормов и эффективности производства животноводческой продукции. В дальнейшем необходимы глубокие исследования перспективных направлений переработки биомассы водных растений с целью получения биологически активных веществ для пищевой, кормовой и нутрицевтической промышленности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ», осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025–2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), а также в соответствии с соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Received 07.04.2025
Accepted in revised 17.06.2025
Accepted for publication 20.06.2025
© Ulrikh E. V., Klyuchko N. Yu., Agafonova S. V., Zemlyakova E. S., Sukhikh S. A., Kachanova A. V., Fedorova O. S., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

MACROPHYTES OF THE BALTIC SEA ECOSYSTEM AS A SOURCE OF RAW MATERIALS FOR THE FOOD INDUSTRY

Elena V. Ulrikh, Nataliya Yu. Klyuchko, Svetlana V. Agafonova, Evgeniya S. Zemlyakova, Stanislav A. Sukhikh, Anzhelika V. Kachanova, Okesya S. Fedorova

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

KEY WORDS: *macroalgae, coastal aquatic plant, asbestos, duckweed, theloresis, biologically active property, food industry*

ABSTRACT

Such types of resources as algae, aquatic plants (macrophytes) and their metabolites can be used as sources of biomass for complex processing. The purpose of this study is to study the diversity, peculiarities of growth and production of biologically active substances of macrophytes of the Baltic Sea ecosystem for the food, feed and nutraceutical industries. The macroalgae of the Baltic Sea are promising raw materials for the production of valuable biologically active compounds, as they are easily reproducible, do not require areas and special resources for accumulation. Significant amounts of algae can be found on the shore (storm emissions), that is, obtained without the cost of their extraction. Isolation of a complex of biologically active substances is the most suitable way to use their potential as antibacterial, antioxidant, anticarcinogenic, anti-inflammatory and hepatoprotective agents. Many of the coastal aquatic plants are available and multiply intensively, forming a significant amount of biomass, which currently has insufficient use in various fields of industry, agriculture, forestry, fish farming, medicine, etc. Macrophytes have high nutritional value and are promising raw materials for the isolation of both nutraceuticals and parapharmaceuticals. It is important to study the potential of duckweed for wastewater treatment, while it can be processed into valuable biomass for animal feed and the production of biologically active substances. The coastal aquatic plant radest has antioxidant activity and antibacterial action against both gram-negative and gram-positive microflora. Macrophyte teloresis is widespread in the Kaliningrad region. The high content of macronutrients such as magnesium, calcium and

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ульрих, Е. В., Ключко, Н. Ю., Агафонова, С. В., Землякова, Е. С., Сухих, С. А., Качанова, А. В. и др.** (2025). Макрофиты экосистемы Балтийского моря как источник сырья для пищевой промышленности. *Пищевые системы*, 8(2), 276–285. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-276-285

FOR CITATION: **Ulrikh, E. V., Klyuchko, N. Yu., Agafonova, S. V., Zemlyakova, E. S., Sukhikh, S. A., Kachanova, A. V. et al.** (2025). Macrophytes of the Baltic Sea ecosystem as a source of raw materials for the food industry. *Food Systems*, 8(2), 276–285. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-276-285

phosphorus in telorez improves the quality of feed and the efficiency of livestock production. In the future, in-depth research is needed into promising areas of processing biomass of aquatic plants in order to obtain biologically active substances for the food, feed and nutraceutical industries.

FUNDING: The work was carried out in accordance with the approved plan of scientific research topics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSTU", carried out at the expense of the federal budget (budget cycle 2025–2027, registration number of the EGISU R&D card 1124072300009-1 dated 07/23/2024), the agreement on the provision of subsidies from the federal budget for the financial support of the state assignment for the provision of public services (performance of work).

1. Введение

Согласно прогнозам, численность мирового населения составит 10,9 млрд человек в 2100 году. Большая часть прогнозируемого роста приходится на страны с низким уровнем дохода. Рост населения планеты является основным фактором выбросов углекислого газа, а также истощения природных ресурсов [1]. Истощение природных ресурсов и полезных ископаемых, в свою очередь, приводит к замедлению экономического роста во многих странах [2]. Для устойчивого развития необходимо рациональное обращение с ресурсами, а также минимизация отходов, поскольку их захоронение или сжигание сопровождается загрязнением плодородных почв, атмосферы и водных объектов.

Водные растения являются высоко инвазивными, плавающими растениями, и активный рост их количества в природе может приводить к критическим экологическим и экономическим последствиям. К ним относятся: нарушения в процессах орошения, выращивания рыбы, генерации гидроэнергии и рекреационных мероприятиях, а также загрязнения источников питьевой воды. С учетом вышеизложенного, возникает потребность в удалении таких растений из водоемов, что может сопровождаться высокими расходами. Однако при использовании биомассы водных растений в качестве биотоплива, пищевых и кормовых добавок, фармацевтических и косметических препаратов, предполагаемые затраты можно превратить в инвестиции. Водные растения могут производить значительное количество биологически активных веществ, а по своей активности зачастую превосходят наземные виды.

В последние годы развитие промышленности во многих странах идет в направлении максимального внедрения «зеленых» технологий в рамках построения биоэкономики [3]. В Европе для рационализации использования биомассы все чаще рассматривается концепция биоэкономики замкнутого цикла (БЗЦ). БЗЦ как идея циркулярной экономики предполагает достижение экономической и экологической устойчивости за счет максимальной целенаправленной рециркуляции потоков ресурсов, а также путем минимизации образования отходов и их утилизации в конце срока службы [4]. Считается, что использование биомассы в БЗЦ в таких отраслях, как пищевая, кормовая и нутрицевтическая, будет способствовать снижению выбросов углекислого газа и сокращению парникового эффекта. Россия занимает одну из лидирующих позиций в мире по сбору водных растений [5]. В качестве источников биомассы для комплексной переработки могут быть использованы водоросли, водные растения (макрофиты) и их метаболиты [6].

Одним из перспективных направлений переработки биомассы водных растений и макроводорослей является получение биологически активных веществ для пищевой, кормовой и нутрицевтической промышленностей. В научной литературе недостаточно освещен потенциал макрофитов экосистемы Балтийского моря для выделения из них комплексов биологически активных веществ, что определяет актуальность данного направления исследований. Целью настоящего исследования является изучение видового многообразия, особенностей произрастания и потенциала производства биологически активных веществ макрофитов экосистемы Балтийского моря для применения в пищевой, кормовой и нутрицевтической промышленностях.

2. Объекты и методы

Настоящее исследование представляет собой систематический обзор научной литературы, посвященной изучению макрофитов экосистемы Балтийского моря и их потенциала для применения в пищевой промышленности. Основное внимание уделено водорослям (*Rhodophyta, Chlorophyta, Ochrophyta*) и прибрежно-водным растениям (рдест, ряска, телорез), произрастающим в Калининградской области и в прилегающих акваториях Балтийского моря.

Систематический поиск научной литературы был произведен с использованием следующих поисковых систем: для международных публикаций применялись Scopus, Web of Science, PubMed, для русскоязычных источников — eLIBRARY.RU, CyberLeninka, для дополнительного поиска — Google Scholar. Сбор данных осуществлялся на русском и английском языках по ключевым фразам: «макрофиты/macrophytes», «водоросли/algae», «Балтийское море/Baltic Sea», «прибрежно-водные растения/coastal aquatic plants», «рдест/asbestos», «ряска/duckweed», «телорез/theloresis», «биологически активные свойства/biologically active properties», «пищевая промышленность/food industry».

В ходе работы были проанализированы полные тексты статей, соответствующих критериям поиска. Статьи, не относящиеся к теме исследования, отклонялись после изучения названия и аннотации.

Критерии включения:

1) статьи, опубликованные в рецензируемых журналах;
2) публикации, содержащие экспериментальные или аналитические данные о химическом составе, биологической активности и методах переработки макрофитов;
3) тематика научной литературы — макрофиты экосистемы Балтийского моря и их потенциал для применения в пищевой промышленности;
4) работы, содержащие данные о методах переработки и применении макрофитов в пищевой, кормовой или фармацевтической промышленностях.

Критерии исключения:

1) исследования, не соответствующие тематике настоящего обзора/не относящиеся к изучаемому предмету
2) статьи с недостоверными или непроверенными данными.

Основными источниками данных стали: научные статьи из международных и российских журналов; патенты на технологии переработки макрофитов; монографии и диссертации, посвященные водным растениям; отчеты и базы данных, такие как FAO Fishery и региональные экологические исследования.

Географический фокус исследования сосредоточен на Балтийском море и водоемах Калининградской области.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Макроводоросли Балтийского моря

Макроводоросли Балтийского моря являются перспективным сырьем для получения ценных биологически активных соединений, поскольку они быстро растут, легко размножаются и не требуют специальных площадей или ресурсов для накопления биомассы. Значительные объемы водорослей могут быть обнаружены на берегу (штормовые выбросы), то есть получены без затрат на их добычу. В Балтийском море макрофиты представлены тремя отделами — *Rhodophyta* (красные водоросли), *Chlorophyta* (зеленые водоросли) и *Ochrophyta* (охрофитовые водоросли). В Таблице 1 представлены виды водорослей, обнаруживаемых исследователями на побережье Балтийского моря.

Таблица 1. **Водоросли, обнаруживаемые на побережье Балтийского моря [7–11]**

Table 1. **Algae found on the Baltic Sea coast [7–11]**

Отдел	Род	Вид
Rhodophyta	*Bangia*	*Bangia atropurpurea*
	Ceramium	*Ceramium virgatum*
		Ceramium tenuicorne
	Coccotylus	*Coccotylus truncatus*
	Furcellaria	*Furcellaria lumbricalis*
	Polysiphonia	*Polysiphonia fucoides*
Chlorophyta	*Cladophora*	*Cladophora glomerata*
		Cladophora rupestris
		Cladophora sericea
	Ulva	*Ulva intestinalis*
		Ulva lactuca
		Ulva prolifera
	Urospora	*Urospora penicilliformis*
Ochrophyta	*Fucus*	*Fucus vesiculosus*
	Pilayella	*Pilayella littoralis*

Ввиду высокой степени загрязнения Балтийского моря тяжелыми металлами, водоросли не рекомендуется употреблять в пищу в природном виде. Поэтому получение различных продуктов на их основе, связанных с глубокой переработкой сырья, как, например, экстракция непосредственно комплексов биологически активных веществ, является наиболее подходящим способом использования их потенциала [7].

Зеленые, красные и охрофитовые водоросли обладают противогрибковыми, антибактериальными, цитостатическими, противовирусными, глистогонными свойствами [7,8], их экстракты могут подавлять рост бактерий, дрожжей и грибов [12,13].

Основными компонентами химического состава водорослей являются углеводы. Некоторые вещества углеводной природы уникальны, содержатся только в водорослях и обусловливают их высокий биопотенциал, часто это относится к полисахаридам. Липиды морских водорослей отличаются благоприятным жирнокислотным профилем за счет содержания омега-3 полиненасыщенных жирных кислот альфа-линоленовой, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой, однако общее невысокое содержание жира не позволяет использовать водоросли как сырье для выделения липидных БАВ [10,14].

Наиболее распространенными углеводами зеленых водорослей являются целлюлоза, крахмал, маннан, гетерогликан, ульван, ксилан; для красных водорослей характерны целлюлоза, флоридский крахмал, агар, каррагенан, ксилан, галактан. Общее количество полисахаридов может варьироваться от 4 до 76 % сухого веса биомассы водорослей [15].

В последнее время особый интерес вызывает ульван — уникальный сульфатированный полисахарид, содержащий остатки рамнозы и глюкуроновой кислоты, выделяемый из водорослей рода *Ulva* и обладающий целым рядом биологически активных свойств. Сообщается об антиоксидантных, противовирусных, антигиперлипидемических, антиканцерогенных, иммуномодулирующих свойствах ульвана [16–20]. Ульван обладает мощной антимикробной активностью против *Klebsiella pneumonia* и *Candida albicans* при минимальной ингибирующей концентрации 8 мкг / мл. Исследования на животных показали, что ульван облегчает течение артрита и воспалительных заболеваний кишечника. Исследования на животных показали, что ульван облегчает течение артрита и воспалительных заболеваний кишечника, снижая тяжесть симптомов, предотвращая сморщивание толстой кишки и повреждение тканей [21–23]. Имеются сведения о противовирусных свойствах ульвана для лечения SARS-CoV2 [24].

Полученные из биомассы водорослей рода *Ulva* полисахариды обладают пребиотическими свойствами. В исследовании Krangkratok W. и коллег сообщается о получении из ульвана водорослей *Ulva* ульванолигосахаридов (УОС). Показан пребиотический эффект УОС при их влиянии на рост молочнокислых бактерий *Lactobacillus acidophilus* и *Lactobacillus plantarum*. УОС способствовали росту этих микроорганизмов активнее, чем коммерческий пребиотик галактоолигосахарид, при этом подавляли рост патогенных микроорганизмов *Bacillus cereus* и *Escherichia coli*. Исследование продемонстрировало, что УОС могут быть использованы в качестве пребиотической добавки, которая имеет значительный потенциал для пищевой и комбикормовой промышленности [25]. В исследовании Liu Zh. и соавторов [26] показано положительное влияние полисахаридов, экстрагированных из биомассы *U. lactuca*, на метаболизм фекальных микроорганизмов человека: *Bacteroides vulgatus* и *Bacteroides thetaiotaomicron*.

Sun Y. и соавторами [27] сообщается об экстрагировании биоактивного ульвана из биомассы водорослей *Ulva prolifera*. Высушенные и измельченные в порошок образцы погружали в 0,2 М HCl на 24 ч для предварительной обработки с последующей фильтрацией и автоклавной экстракцией раствором карбоната натрия. После очистки и лиофилизации исследовали фракционный состав экстракта, в котором были обнаружены следующие углеводы: галактоза (9,43 %), глюкоза (73,17 %), ксилоза (9,63 %) и манноза. Антиоксидантные свойства и биосовместимость полученного экстракта при применении его в качестве биоактивного ингредиента в 3D-культуре клеток были оценены и подтверждены с помощью конфокальной лазерной сканирующей микроскопии и визуализации с применением флуоресцентного микроскопа. Таким образом, экстракт, полученный из биомассы водорослей *Ulva prolifera*, обладает большим потенциалом для использования в биомедицине. Антиоксидантные свойства экстракта *Ulva prolifera* описаны также Feng Y. и соавторами [28]. По мнению исследователей, водоросли имеют существенный потенциал для использования в качестве терапевтического средства для профилактики и лечения кишечных заболеваний, вызванных окислительным стрессом.

Актуальным вопросом для пищевой и фармацевтической промышленностей является получение гликолипидов. Гликолипиды образованы одним или несколькими остатками моносахаридов, связанными гликозидными связями с липидными группами, моноацильными или диаллилглицеринами. Гликолипиды, выделенные из морских объектов, обладают разнонаправленной биологической активностью, например, противовирусной, противоопухолевой, антимикробной [29].

В статье Sun Y. и соавторов [30] сообщается об исследовании, в ходе которого с помощью ультразвуковой метанольной экстракции, последующего разделения и хроматографической очистки из водорослей рода *Bangia* были выделены два гликолипида. Их активность в отношении свободных радикалов DPPH составила около 60 % при 1600 мкг/мл, а общая антиоксидантная способность была выше, чем у Trolox. Один из выделенных гликолипидов обладал увлажняющей активностью и был близок к сорбиту и альгинату натрия. Гликолипиды могут найти применение в качестве увлажнителей и антиоксидантов в пищевых продуктах.

Kulikova Y. с коллегами [10] исследовали химический состав и антиоксидантную активность спиртовых экстрактов водорослей родов *Cladophora*, *Polysiphonia*, *Ulva* и *Furcellaria*, собранных на побережье Балтийского моря. Авторы отмечают высокое содержание в углеводном составе водорослей таких сахаров, как фукоза и галактоза. Содержание фукозы составило 6,49, 4,13, 2,71 и 2,32 % в биомассе водорослей *Furcellaria, Polysiphonia, Cladophora* и *Ulva* соответственно, а содержание галактозы — 2,51, 1,18, 1,185 и 1,66 % соответственно. Наибольшая антиоксидантная активность, установленная по DPPH-методу (90,38 мг/мл), была отмечена для экстракта биомассы *Furcellaria*, антиоксидантная активность экстрактов *Cladophora, Ulva* и *Polysiphonia* составила 136,61, 314,74 и 1069,21 мг/мл соответственно.

Фукоза и галактоза обладают рядом важных биологических свойств. Описаны антиканцерогенные, противовоспалительные и гепатопротекторные свойства фукозы, а также ее регенерирующие, заживляющие, увлажняющие и омолаживающие свойства для кожи [31]. Доказано, что добавление фукозы в детские смеси способствует более полноценному психическому развитию и формированию иммунитета у младенцев [32]. Галактоза обладает доказанным иммуномодулирующим, антиоксидантным и противовирусным действием [10,33].

Антиоксидантные и антимикробные свойства водорослей также связаны с разнообразными пигментами, содержащимися в биомассе. Водоросли являются фотосинтезирующими организмами, пигменты позволяют морским водорослям поглощать свет, необходимый для фотосинтеза на глубинах с различной степенью освещенности. Эти пигменты можно разделить на три основные группы, которые включают хлорофиллы, фикобилипротеины и каротиноиды и обладают различной пользой для здоровья. Доминирующими пигментами зеленых водорослей являются хлорофиллы a, b, α-, β-, γ-каротин, ксантофиллы, красных — хлорофилл a, ксантофиллы, α-, β-каротин, фикоэритрин, фикоцианин [34–37].

В исследовании Punampalam R. и соавторов [38] сообщается об извлечении очищенных фикобилипротеинов из водоросли *Bangia atropurpurea*. R-фикоэритрин и R-фикоцианин были выделены и очищены методом гель-фильтрации с помощью Sephadex G-200. Содержание R-фикоэритрина составило 54,8 % от общего количества экстрагированного белка, R-фикоцианина — 16 %. Установлена высокая антиоксидантная активность R-фикоэритрина, превышающая активность синтетического антиоксиданта ионола.

Исследователями [8] изучено общее содержание каротиноидов, хлорофиллов a и b, антиоксидантная, антимикробная активность экстрактов водорослей видов *Ulva intestinalis, Furcellaria lumbricalis*, *Cladophora rupestris,* собранных на побережье Балтийского моря. Установлено, что суммарное содержание каротиноидов в экстрактах *C. rupestris*, *F. lumbricalis* и *U. intestinalis* составляет соответственно 1,26; 0,2 и 0,81 мг/г. Содержание хлорофилла *a* — 5,65; 1,5 и 5,87 мг/г, хлорофилла *b* — 5,14; 0,55 и 2,63 мг/г соответственно. Исследование антиоксидантной активности экстрактов методом DPPH показало, что ее значение составляет для экстракта *C. rupestris* 5,82 %, для *F. lumbricalis* — 2,42 %, для *U. intestinalis* — 3,32 %. При оценке антимикробной активности экстрактов методом диффузии в агаровую лунку была установлена активность всех экстрактов в отношении *Bacillus subtilis*. Анализ содержания тяжелых металлов показал их безопасные уровни в экстрактах водорослей в сравнении с исходной массой. Водоросли рекомендованы к использованию в производстве пищевых продуктов, кормов, нутрицевтиков, фармацевтических препаратов и т. д.

В статье Keramane B. и соавторов [39] сообщается об экстрагировании смесью этанола и воды биологически активных веществ из биомассы водорослей *Ulva lactuca*, *Ulva intestinalis* и *Ceramium virgatum*. Установлено общее содержание фенолов в экстрактах на уровне

15,95, 16,51 и 14,64 мг эквивалента галловой кислоты/г соответственно. Антиоксидантная активность экстрактов по методу Trolox составила 0,28, 0,27 и 0,25 ммоль эквивалента тролокса/г экстракта соответственно. Измеренная по методу с DPPH антиоксидантная активность экстрактов *U. lactuca*, *U. intestinalis* и *C. virgatum* составила 271,3, 248,9 и 123,5 мг/мл (количество антиоксиданта, необходимое для снижения концентрации DPPH на 50 %) соответственно. Таким образом, установлена высокая антиоксидантная активность экстракта *C. virgatum*. Антибактериальную активность экстрактов в отношении *Escherichia coli, Salmonella typhi, Vibrio cholerae u Candida albicans* проявили все исследованные экстракты. Наибольшую активность продемонстрировал экстракт *C. virgatum* — его минимальная ингибирующая концентрация составила 2,5 мг/мл, наибольшая активность установлена в отношении *S. typhi* минимальной ингибирующей концентрацией 1,16 мг/мл. По мнению авторов, эта активность может быть обусловлена фикоэритрином, который является наиболее распространенным белково-пигментным комплексом в красных водорослях. Экстракт зеленой водоросли *U. lactuca* продемонстрировал более высокую антибактериальную активность, чем экстракт *U. Intestinalis*, что может быть связано с более высоким содержанием в *U. lactuca* сульфатированных полисахаридов. Более активен был экстракт *U. lactuca* в отношении *S. typhi* и *E. coli* (2,08 и 5,16 мг/мл соответственно).

Антимикробные свойства выявлены у ряда биологически активных веществ, выделенных из охрофитовых водорослей *Fucus vesiculosus*. Полигидроксилированный фукофлоретол, выделенный из норвежского *F. vesiculosus*, показал ингибирование *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*, в то время как каротиноид фукоксантин подавлял размножение четырех морских бактерий в его естественных концентрациях от 0,3 до 10 мг/см^2 на поверхности водорослей [40]. Показана антимикробная активность галактолипидов и флоротаннинов, входящих в состав мембран и клеточных стенок *F. vesiculosus* [41]. В исследовании Heavisides E. и соавторов показана ингибирующая активность экстракта *F. vesiculosus* в отношении штамма метициллинрезистентного золотистого стафилококка [42].

Сообщается о противоопухолевых свойствах экстракта балтийского *F. vesiculosus* в отношении клеток рака поджелудочной железы [42,43]. Экстракт был изготовлен из слоевищ *F. vesiculosus,* собранного в прибрежных районах западной части Балтийского моря. Ацетоновое извлечение высушивали и затем разделяли с помощью жидкофазной хроматографии для выделения фракций, обладающих наибольшей антипролиферативной активностью. Фракции с наибольшей активностью способствовали сильному подавлению жизнеспособности различных линий клеток рака поджелудочной железы за счет ингибирования клеточного цикла пролиферирующих клеток. Важным является то, что экстракт не проявлял цитотоксическую активность в отношении незлокачественных клеток. Такая противоопухолевая активность экстракта может проявляться за счет флоротаннинов, фукоидана и фукоксантина, при этом некоторые исследователи особенно выделяют роль флоротаннинов [42]. Данные свидетельствуют о том, экстракт *F. vesiculosus* представляет собой многообещающий новый противоопухолевый препарат.

Таблица 2. **Основные виды прибрежно-водных растений Калининградской области [7]**

Table 2. **Main species of coastal aquatic plants of the Kaliningrad region [7]**

№ п/п	Наименование видов растений	Наиболее частые места обитания
1	Семейство рдестовые (Potamogetonaceae), род рдест (*Potamogeton*) — один из самых многочисленных гидрофитов в водоемах Калининградской области, представлен 17 видами и двумя гибридами; могут использоваться в виде удобрений и для кормовых целей	
1.1	Рдест курчавый (*P. crispus* L.)	Стоячие водоемы (озера, старицы, мелиоративные канавы, пруды), районы Калининградского залива с соленостью 4,3–4,9 ‰
1.2	Рдест пронзеннолистный или стеблеобъемлющий (*P. perfoliatus* L.)	Стоячие и медленно текущие водоемы (пруды, озера, карьеры, медленно текущие реки), районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
1.3	Рдест гребенчатый (*P. pectinatus* L.)	Различные водоемы: от мелких прудов до крупных рек и озер, районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
1.4	Рдест длиннейший (*P. praelongus* L.)	Различные водоемы: от мелких прудов до крупных рек и озер; встречается реже рдеста гребенчатого
1.5	Рдест плавающий (*P. natans* L.)	Стоячие водоемы или водоемы с медленным течением
1.6	Рдест блестящий (*P. lucens* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
2	Семейство рясковые (*Lemnaceae*), род ряска (*Lemna*)	
2.1	Ряска малая (*L. minor* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–4,9 ‰
2.2	Ряска трехдольная (*L. trisulca* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–4,9 ‰
2.3	Ряска горбатая (*L. gibba* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
3	Семейство рясковые (*Lemnaceae*), род многокоренник (*Spirodela*)	
3.1	Многокоренник обыкновенный (*S. polyrrhiza* (L.) *Schleid.*)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3 ‰
4	Семейство рясковые (*Lemnaceae*), род вольфия (*Wolffia*)	
4.1	Вольфия бескорешковая (*W. arrhiza (L.) Horkel ex Wimm.*)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–4,9 ‰
5	Семейство роголистниковые (*Ceratophyllaceae*), род роголистник (*Ceratophyllum*) — в Калининградской области установлено произрастание двух видов, образуют часто «непроходимые» заросли, создающие препятствие для движения водного транспорта	
5.1	Роголистник погруженный или темно-зеленый (*C. demersum* L.)	Медленно текущие воды прудов, озер, мелиоративных каналов и рек, а также районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
6	Семейство лютиковые (*Ranunculaceae*), род калужница (*Caltha*) — самое распространенное растение Калининградской области; зеленые части растения, в том числе бутоны; ядовиты, но при соответствующей обработке могут быть использованы в пищу и с лекарственными целями	
6.1	Калужница болотная (*C. palustris* L.)	В пресноводных водоемах всех типов, встречается на болотистых низинных лугах
7	Семейство лютиковые (*Ranunculaceae*), род водяной лютик, шелковник (Batrachium) — в водоемах Калининградской области встречается семь видов и несколько гибридов шелковников	
7.1	Шелковник волосистый (*R. trichophyllum (Chaix.) van den Bos.*)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–4,8 ‰
7.2	Шелковник водяной (Batrachium aquatile)	Стоячие и медленно текущие воды рек, озер, прудов, а также небольшие болота с застойной водой
7.3	Шелковник обильноцветущий или щитковидный (*B. floribundum*)	Стоячие и медленно текущие воды рек, озер, прудов, а также небольшие болота с застойной водой
7.4	Шелковник плавающий (*B. fluitans*)	В устье Немана и Калининградского залива
8	Семейство сланоягодниковые (*Haloragaceae*), род уруть (*Myriophyllum*)	
8.1	Уруть колосистая (*M. spicatum* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,3–5,3 ‰
8.2	Уруть мутовчатая (*M. verticcillatum* L.)	Районы Калининградского залива с соленостью 4,8–5,3 ‰

Таким образом, красные, зеленые и охрофитовые водоросли, в особенности родов *Bangia, Furcellaria, Polysiphonia, Cladophora, Ulva, Fucus*, являются богатыми источниками биологически активных веществ антиоксидантной, антимикробной, противовирусной, антиканцерогенной, иммуномодулирующей направленности.

3.2. Прибрежно-водные растения Калининградской области

Высшие водные растения, преобладающие в водоемах Калининградской области, представлены преимущественно однодольными видами [7]. Среди них более 80 % приходится на гидрофиты (истинно-водные растения), которые для нормального прохождения жизненного цикла требуют постоянного контакта своего вегетативного тела с водной средой. В Таблице 2 представлены наиболее часто встречаемые виды гидрофитов, обнаруживаемые исследователями в водоемах Калининградской области.

Многие из приведенных выше прибрежно-водных растений доступны для сбора в природных условиях, интенсивно размножаются, образуя значительное количество биомассы, которая не имеет достаточного применения в различных областях промышленности, в сельском и лесном хозяйстве, рыбоводстве, медицине и др. Гидрофиты имеют высокую пищевую ценность и являются перспективным сырьем для выделения как нутрицевтиков, так и парафармацевтиков. В Таблице 3 представлен общий химический состав некоторых видов прибрежно-водных растений, которые встречаются в Калининградской области.

Таблица 3. **Химический состав некоторых видов прибрежно-водных растений, % от абсолютно сухого веса [44–49]**

Table 3. **Chemical composition of some species of coastal aquatic plants, % of absolutely dry weight [44–49]**

Растение	Протеин	Клетчатка	Жир	Безазотистые экстрактивные вещества	Зола
Рдест курчавый (*P. crispus* L.)	22	13	2	49	14
Рдест пронзеннолистный (*P. perfoliatus* L.)	12	17	1	60	10
Рдест плавающий (*P. natans* L.)	14	22	4	50	10
Рдест блестящий (*P. lucens* L.)	14	18	2	55	12
Ряска малая (*L. minor* L.)	26	25	5	27	18
Ряска трехдольная (*L. trisulca* L.)	30	21	3	24	22
Вольфия бескорешковая (*W. arrhiza* (L.) *Horkel ex Wimm.*)	50,9	31,3	6,1	—	11,7
Роголистник темно-зеленый (*C. demersum* L.)	18	11	1	46	23

Анализ литературных данных по химическому составу рдестов, роголистника, ряски и других прибрежно-водных растений показывает, что большинство из них содержат 12–51 % сырого протеина, 12–31 % клетчатки, 1–6 % жира, 24–60 % безазотистых экстрактивных веществ и 12–23 % минеральных веществ. В данных гидрофитах обнаружены биологически активные вещества (БАВ), которые проявляют антиоксидантные, антибактериальные, альгицидные, фунгицидные и инсектицидные свойства, что представляет широкий интерес для получения биопрепаратов с заданными свойствами. В составе эфирного масла рдеста выявлено около 160, а в масле роголистника — 270 низкомолекулярных летучих органических соединений [50]. Среди них наиболее ценным выступает маноол, обладающий противовирусной активностью и представляющий интерес для медицинской и парфюмерной промышленностей [50]. По способности к биосинтезу маноола рдест может быть отнесен к группе растений-концентраторов.

Учеными Астраханского ГУ разработана технология выделения водно-спиртовых экстрактов из рдеста пронзеннолистного (*P. perfoliatus* L.), представляющих комбинацию БАВ [51]. Установлено, что рдест туполистный и роголистник темно-зеленый обладают антиоксидантной активностью и антибактериальным действием в отношении как грамотрицательной (*Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa*), так и грамположительной микрофлоры (*Bacillus subtilis*) [50,51]. Полученные растительные экстракты из *P. perfoliatus* L. могут быть использованы в качестве самостоятельных антибактериальных компонентов, и как источники БАВ с различными свойствами при изготовлении лечебно-профилактических напитков специального назначения, а также при производстве моющих средств [51].

Мукатовой М. Д. с соавторами запатентован способ комплексной переработки рдеста пронзеннолистного для получения в зависимости от назначения рдестина, рдестата аммония или рдестата натрия и кормовой продукции на основе травяного остатка [52]. Для этой цели пресноводную траву обрабатывают 1 %-ным раствором соляной кислоты при температуре 70 °С в течение 3 ч, после чего промывают водой до достижения значения pH 7. Затем фильтрованием отделяют травяную массу и проводят экстракцию пектиновых веществ в 3 стадии 1 %-ным раствором оксалата аммония при температуре 50 °С и гидромодуле 1:6 в течение 8 ч. Экстракт в первом варианте осаждают спиртом для получения рдестата аммония, во втором осаждают 10 %-ным раствором соляной кислоты до достижения значения pH 2,5, получая рдестин. В третьем варианте экстракт после осаждения соляной кислотой обрабатывают 10 %-ным раствором соды с получением рдестата натрия. Полученные после фильтрования в трех вариантах рдестат аммония, рдестин и рдестат натрия промывают водой, подвергают сушке при температуре 45 °С.

Для получения натуральной пищевой добавки — концентрата хлорофилла — Мукатова М. Д. с соавторами [53] предлагает измельчать и сушить рдест пронзеннолистный (*P. perfoliatus* L.), после чего проводить двойную экстракцию продолжительностью по 8 часов каждая, используя смесь гексана с этиловым спиртом в соотношении 9:1 при температуре 25–40 °С. Затем смесь следует фильтровать, отгонять растворитель, и полученный хлорофилл смешивать с маслом или раствором NaOH в этаноле. Хлорофилл оказывает воздействие на кровь, сходное с действием гемоглобина. Единственное различие в строении молекул заключается в том, что в центре хелатного комплекса хлорофилла находится атом магния, а в гемоглобине — атом железа. Хлорофилл стимулирует иммунную систему, ускоряет обмен веществ и образование грануляции эпителия при язвах и ранах, обладает гипотензивным, защитным действием при поражениях ионизирующим излучением [53].

В последнее десятилетие ряска рассматривается в научной среде как один из наиболее перспективных гидрофитов благодаря широким возможностям ее применения. Наиболее перспективные из них — производство биотоплива (биогаза, биомасла, биоэтанола, биоводорода и др.), белков и химикатов [54,55]. Ряска все чаще признается высококачественным источником белка, а такие виды, как *L. minor* и *W. arrhiza*, содержащие до 40 % белка в пересчете на сухой вес, сопоставимы по этому показателю с традиционными растительными источниками (например, с соевыми бобами) [46,56]. Актуально изучение ее потенциала для очистки сточных вод, сельскохозяйственных и промышленных стоков, при этом одновременно возможна ее переработка в ценную биомассу для корма животных, а также получение биоудобрений или биотоплива [55]. Применение прибрежно-водных растений в пищевых или кормовых целях предполагает потенциальные риски для человека и животных, связанные со способностью гидрофитов поглощать и концентрировать загрязняющие вещества из окружающей среды, что зависит от места их произрастания и качества воды. Поэтому перед включением указанных растений в пищевые продукты требуется их предварительная обработка.

Семейство *Lemnaceae*, включающее различные виды ряски, в водоемах Калининградской области представлено не менее чем пятью видами из родов ряска (*Lemna*), многокоренник (*Spirodela*) и вольфия (*Wolffia*) [7]. Каждый вид ряски обладает уникальными характеристиками, которые делают их пригодными для различных направлений использования. Например, *Lemna* показывает эффективность при очистке сточных вод [57]. *Spirodela*, имеющая более крупные листья, идеально подходит для производства биомассы и биоэнергетического сырья. Напротив, более мелкие виды, такие как *Wolffia*, считаются более перспективными для использования в фармацевтической и пищевой промышленностях благодаря высокому содержанию белка и быстрому росту [49,55,58,59]. Разнообразие свойств представителей семейства ясковых требует осознанного выбора вида в зависимости от целей и биологических характеристик.

Ряска известна своим быстрым ростом, высокой способностью усваивать питательные вещества и способностью адаптироваться к различным средам, включая сточные воды и пруды. Такие виды, как *Wolffia* и *Lemna*, могут удваиваться в течение нескольких дней при благоприятных условиях, что делает ряску экономически целесообразной для производства биомассы [60]. Средой для ее культивирования может выступать свиной и коровий навоз, разбавленный куриный помет, пищевые отходы, анаэробно сброженные сточные воды молочного производства [55]. Данное сырье в больших количествах присутствует на территории Калининградской области благодаря активному развитию сельского хозяйства за последние 10 лет, что делает актуальным исследования по выращиванию этой водной травы [60,61].

Использование ряски в качестве кормовой добавки для животных актуально из-за высокого содержания белка и минеральных веществ и ввиду малого содержания грубых волокон. По сравнению с наземными растениями, ряска содержит меньшее количество целлюлозы, поэтому лучше усваивается животными и особенно полезна для молодняка [62]. Кроме того, это растение не продуцирует ядовитых алкалоидов, содержит большое количество пигментов, к которым относятся β-каротин, ксантофилл, хлорофилл.

Трава является ценным ресурсом для ферментативного производства янтарной и молочной кислот [55]. Последняя является универсальным соединением, которое может быть преобразовано в пировиноградную кислоту, эфиры молочной кислоты, 1,2-пропандиол и акриловую кислоту [63]. По сравнению с другими источниками биомассы, такими как кукурузная солома, жом сахарного тростника и пищевые отходы, ряска показывает сопоставимую эффективность в производстве молочной кислоты [55]. Кроме того, ряска обладает дополнительным преимуществом: она растет на сточных водах, обеспечивая двойную выгоду — очистку сточных вод и одновременное производство биомассы. Эта характеристика делает ряску более перспективным и экологически безопасным вариантом, чем традиционные культуры, используемые для производства органической кислоты.

Ряска служит ценным источником белка, в том числе незаменимых аминокислот для питания человека [55,64]. Среди последних в ряске малой (*Lemna minor* L.) обнаружены в большем количестве незаменимые моноаминомонокарбоновые (39,71 мг/г) и заменимые моноаминодикарбоновые (32,43 мг/г), далее — заменимые моноаминомонокарбоновые (25,34 мг/г) и диаминомонокарбоновые (11,60 мг/г) и другие аминокислоты. Их отдельных представителей в общей сумме идентифицированных аминокислот преобладают аспарагиновая и глютаминовая кислоты, аргинин, лейцин, аланин, валин и лизин [64]. Данные, полученные Никифоровым А. А. с соавторами [64], позволяют характеризовать ряску малую как полноценный источник комплекса протеиногенных аминокислот. Белки из ряски можно извлекать с использованием как традиционных (щелочные и кислотные процессы экстракции), так и новых технологий. К новым технологиям относится, в частности, ультразвуковая обработка, повышающая эффективность экстракции [55,65,66].

Биомасса ряски богата также сложными углеводами. Учеными предложены способы извлечения пектинов из ряски *Lemna minor*, которые полностью соответствуют характеристикам, предъявляемым к студнеобразователям, и могут быть использованы в пищевой промышленности [67]. Технология предусматривает извлечение пектина из замороженной при температуре минус 25 °С ряски *Lemna minor*. Процесс включает выдержку сырья в подкисленной воде (pH 1–2) на водяной бане при температуре 80–100 °С в течение 1–3 часов, последующую фильтрацию и осаждение пектиновых веществ 96%-ным раствором этилового спирта в соотношении 1:2–4. Далее смесь выдерживают при температуре 2–4 °С в течение 12 часов, затем полученный раствор отфильтровывают через бумажный фильтр и полученный осадок высушивают на воздухе при комнатной температуре.

Известны случаи непосредственного употребления в пищу ряски горбатой (*Lemna gíbba*) и вольфии шаровидной (*Wolffia globosa*) жителями Мексики, Таиланда, Бирмы, Лаоса и Гватемалы, где она используется в качестве овоща и приправы. В России, несмотря на значительное распространение ряски в отдельных водоемах, ее практически не употребляют в пищу. В практике общественного питания зафиксировано использование ряски для приготовления салатов, супов, паст и «зеленого» масла. Тем не менее, ряска стала многообещающим ингредиентом благодаря своей высокой пищевой ценности, а также содержанию БАВ. Как ценный источник белка, ряска выступает потенциальным источником для замены яичного желтка на растительной основе, показывая хорошую усвояемость и биодоступность, при этом имитируя внешний вид яичного желтка [68]. Добавление 2% порошка ряски в мороженое увеличивает содержание в нем белка и клетчатки на 8% и 13% соответственно [69]. Аналогичным образом, было показано, что включение порошка ряски в закуски и хлеб улучшает их пищевую ценность, повышая содержание белка на 51%, незаменимых аминокислот — на 147% и пищевых волокон — на 83% [55,70]. Предложены способы выделения хлорофилла из ряски и применения его экстракта для приготовления зефира функционального назначения. Потребность человека в хлорофилле составляет 100 мг/сут. Внесение полученных добавок из ряски обеспечивает более 30% от суточной нормы потребления хлорофилла.

Благодаря высокому содержанию витамина B_{12} ряска может рассматриваться как растительная альтернатива красному мясу [71]. Антиоксидантные свойства этой травы еще больше позиционируют ее экстракты как натуральные удлинители срока годности мясных продуктов [72]. Однако зеленый цвет, возможные изменения в консистенции, pH готового продукта из-за введения в продукт ряски могут влиять на восприятие потребителями вкуса и качества. Но, несмотря на эти особенности, питательные и оздоровительные преимущества ряски значительны. Актуальной представляется задача сосредоточить будущие исследования на совершенствовании рецептур и расширении применения ряски и продуктов на ее основе в пищевой промышленности с целью повышения потребительского принятия и привлекательности таких продуктов.

Интерес к прибрежно-водным растениям, в том числе в контексте их использования в пищу, неуклонно растет. Гидрофиты, в особенности родов рдест (*Potamogeton*) и ряска (*Lemna*), являются богатыми источниками белка, сложных углеводов и биологически активных веществ антиоксидантной и антимикробной направленностей.

3.3. Характеристика Stratiotes aloides L.

Монотипный род *Stratiotes* включает в себя единственный оставшийся вид *S. aloides* L. и является представителем семейства *Hydrocharitaceae*, которое принадлежит к отряду *Alismatales*. В РФ носит название телорез алоэвидный или телорез обыкновенный. Ранее насчитывалось до двадцати различных видов рода *Stratiotes* [73,74].

Свободно плавающий в водоемах со слабым течением водный макрофит является многолетним растением с розеткой многочисленных, широколинейных, жестких, по краям шиповато-игольчатых листьев длиной до 40 см и шириной до 4 см, верхушкой высовывающихся из воды [75]. Листья способны сильно поранить купающегося человека, это и дало название растению. В зависимости от сезона растения появляются на поверхности водоема или погружаются в толщу воды. *S. aloides* L. был определен как вегетативно-малолетний, поликарпический, укореняющийся, розеточный, столонно-турионовый, вегетативно-подвижный, надводноцветущий, мезотрофный, условно-пресноволный, детрито-пелофильный гидатофит [75–78].

Вид *S. aloides* L. широко распространен в водоемах Евразии. Его популяции в целом довольно стабильны на большей части их современного ареала [73], в том числе и на территории Калининградской области. В регионе насчитывается 339 основных водотоков общей протяженностью 5180,8 км, 945 осушительных межхозяйственных проводящих каналов общей протяженностью 3384 км, 150 озер и прудов площадью 61,0 км^2 [75]. Основу растительности многочисленных каналов, образующих густую сеть, составляют обширные заросли элодеи канадской, рдестов, кубышки желтой и кувшинки, шейхцерии, *телореза обыкновенного*, водокраса обыкновенного, ежеголовника, болотницы. Водные и наземные растения с узкой экологической валентностью страдают из-за быстрых изменений условий окружающей среды, в то время как растения с амфибийным характером имеют преимущество, поскольку они способны развиваться и адаптироваться к текущим условиям при росте как в воде, так и на суше [79]. Все это позволяет рассматривать *S. aloides* L. как перспективный малоиспользуемый сырьевой источник. В связи с этим представляет интерес изучить химический состав этого растения, включая его биологически активные вещества.

В исследованиях А. Н. Ефремова в соавторстве [80,81] установлено в фитомассе *S. aloides* L. (водоемы бассейна Среднего Иртыша) высокое содержание клетчатки, жиров, сырого протеина и золы. Массовая доля аминокислот составила 5,0%, в их составе преобладают глутаминовая кислота, изолейцин, фенилаланин, лейцин, валин (Таблицы 4 и 5).

Установлено содержание витаминов в фитомассе *S. aloides* L. (Таблица 6).

Количество жирорастворимых витаминов установлено: Е (5,9±0,9 мкг/г), А (1,3 ± 0,2 мкг/г). Данные можно использовать для обоснования использования рассматриваемого объекта как источника для получения витаминизированных премиксов к кормовым добавкам. Выявлено, что показатели качества крахмала *S. aloides* L. соответствуют требованиям нормативных документов,

Таблица 4. **Общий химический состав воздушно-сухого вещества *S. aloides* L. [80]**

Table 4. **Total chemical composition of the air-dry substance *S. aloides* L. [80]**

Компонент	Содержание, %
белок	12,8 ± 0,4
сырой протеин	14 ± 0,4
жир	0,9 ± 0,4
клетчатка	18 ± 2
зола	13 ± 2

Таблица 5. **Аминокислотный состав *S. aloides* L.**
Table 5. **Amino acid composition of *S. aloides* L.**

Компонент	Содержание в воздушно-сухом веществе, %	Компонент	Содержание в воздушно-сухом веществе, %
Аспарагиновая кислота	0,40 ± 0,10	Тирозин	0,16 ± 0,04
Глутаминовая кислота	0,46 ± 0,09	Валин	0,56 ± 0,09
Серин	0,12 ± 0,03	Фенилаланин	0,50 ± 0,10
Гистидин	0,18 ± 0,04	Изолейцин	0,45 ± 0,09
Глицин	0,19 ± 0,04	Лейцин	0,60 ± 0,10
Треонин	0,11 ± 0,02	Лизин	0,20 ± 0,05
Аргинин	0,38 ± 0,09	Цистин	0,17 ± 0,04
Аланин	0,32 ± 0,08	Триптофан	0,10 ± 0,02
Метионин	0,10 ± 0,02	Всего АК	5,0

Таблица 6. **Содержание водорастворимых витаминов в фитомассе *S. aloides* L. [80,81]**
Table 6. **The content of water-soluble vitamins in the phytomass of *S. aloides* L. [80,81]**

Компонент	Содержание, 10^{-7} г/100 г сухого вещества
B_1	390 ± 10
B_2	190 ± 10
B_6	21 ± 1
C	770 ± 30

действующих в РФ (ГОСТ Р), что является одной из предпосылок возможного использования телореза алоэвидного (*S. aloides* L.) как источника крахмала.

Флавоноиды обладают противовоспалительными, капилляроукрепляющими, желчегонными, противолучевыми, противоотечными и др. свойствами, поиск сырьевых источников для их получения с хорошей сырьевой базой является актуальной задачей. В качестве одного из таких источников может выступать *S. aloides* L. [82], в составе которого обнаружены такие флавоноиды, как рутин, лютеолин, хризоэриол.

Ряд исследований выявил, что *S. aloides* L. может быть перспективным источником для получения антоцианов (в первую очередь цианидина), лейкоантоцианов, дубильных веществ (танинов), сапонинов и антраценпроизводных углеводородов [82,83].

В исследованиях установлено высокое содержание танинов в побегах *S. aloides* L. (3,1 ± 0,1 %), что позволяет рассматривать его как потенциальный источник дубильных веществ, сопоставимый с такими официальными источниками, как крапива двудомная (*Urtica dioica* L.) и череда трехраздельная (*Bidens tripartita* L.), содержащие в своем составе танины в количестве 3,3 ± 0,17 % и 5,10 ± 0,08 соответственно [84,85]. Отметим, что срок хранения высушенного сырья не влияет на содержание дубильных веществ, что важно, так как период сбора свежего *S. aloides* L. ограничен и чаще всего сырье заготавливается для дальнейшей переработки именно методом сушки.

Содержанию химических элементов в фитомассе *S. aloides* L. посвящена работа [86]. Установлено высокое количество таких важных макроэлементов, как магний, кальций и фосфор (мг/кг воздушно-сухого вещества): Mg (30850 ± 60), Ca (4490 ± 40), P (2910 ± 40). От содержания этих макроэлементов зависит качество кормов и эффективность производства животноводческой продукции [87].

3.4. Перспективы использования макрофитов

Макрофиты формируют растительные сообщества, занимающие значительные площади в водоемах с медленным течением. Эти сообщества характеризуются высоким проективным покровом и быстрой скоростью накопления фитомассы. Макрофиты являются богатым источником пищевых и биологически активных веществ, что позволяет рассматривать их как перспективное и недооцененное сырье для создания биологически активных добавок, функциональных и специализированных пищевых продуктов, а также кормов для сельскохозяйственных животных с широким спектром физиологической активности [73,80,88–90].

Использование фитомассы макрофитов в кормовых целях обусловлено не только их богатым составом (полифенолы, каротиноиды, витамины, макро- и микроэлементы и др.), но и высокой ферментативной активностью (инвертазная — до 15770 ± 252,85 мг глюкозы на 0,2 г/сут. — обеспечивающая им большое количество простых углеводов; каталазная — до 45,25 ± 0,59 мл O_2/г/мин — обуславливающая их антиоксидантные свойства). Исследования [88] установили, что использование фитомассы *S. aloides* L. в составе премикса в комбикормах способствует лучшему перевариванию и усвоению корма цыплятами. Это повлияло на лейкоцитарную формулу крови, ускорило рост цыплят и, как следствие, сократило сроки их выращивания.

Высокое содержание сырого протеина в составе макрофитов позволяет рассматривать объект исследования в качестве альтернативного источника пищевого белка. Альтернативные белки обладают значительным потенциалом для повышения качества рациона современного человека, а также соответствуют принципам экологичного и осознанного потребления. Согласно прогнозам, ожидается, что потребление альтернативных белков вырастет с нынешних 13 миллионов тонн в год до 97 миллионов тонн в год к 2035 году [91]. В обзоре [92] приводится обоснование использования в качестве источника растительного белка, в том числе и фитомассы съедобных водных растений, а также технологии извлечения белков из водных растений включая физические, химические/биохимические методы и их комбинации.

С ростом спроса на использование растительного белка такие источники, как водные растения и растительные побочные продукты или отходы, становятся популярными. В работах [93,94] рассматривается метод ферментативного гидролиза растительных биомасс как наиболее перспективный для получения не только легкоусвояемых растительных белков, но и для повышения пищевой ценности и придания уникального вкуса продуктам питания. Варьируя такие факторы, как выбор микроорганизмов, состав субстрата и условия ферментации, можно влиять на изменения в структуре белка для получения в том числе биоактивных пептидов.

4. Выводы

Таким образом, нетрадиционные пищевые растения, в том числе макрофиты экосистемы Балтийского моря, привлекают внимание исследователей из-за богатого химического состава. Однако существует необходимость в исследованиях усвояемости и биодоступности этих химических веществ в рационе животных и человека. Запасы этих водных растений достаточно велики в Балтийском море, в реках и озерах Калининградской области. После сбора растения быстро теряют влагу, а при ненадлежащем хранении и первичной переработке снижается их качество, что может ограничивать применение в пищевой промышленности. Последующие исследования могут способствовать повышению качественной и количественной оценок состава макрофитов водоемов Калининградской области. Поэтому необходимо провести дополнительные научные работы для подтверждения лекарственных и питательных свойств этого малоиспользуемого сырьевого источника. Впоследствии это может привести к целенаправленному выращиванию, заготовке и дальнейшему изучению потенциального применения макрофитов в пищевой, кормовой, медицинской и других отраслях промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Maja, M.M., Ayano, S.F. (2021). The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment*, 5, 271–283. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00209-6
2. Nawaz, M.A., Azam, A., Bhatti, M.A. (2019). Natural resources depletion and economic growth: Evidence from ASEAN countries. *Pakistan Journal of Economic Studies*, 2(2), 155–172.
3. Rasoulinezhad, E., Taghizadeh-Hesary, F., Taghizadeh-Hesary, F. (2020). How is mortality affected by fossil fuel consumption, CO_2 emissions and economic factors in CIS region? *Energies*, 13(9), Article 2255. https://doi.org/10.3390/en13092255
4. Solis, C.A., Mayol, A.P., San Juan, J.G., Ubando, A.T., Culaba, A.B. (2020). Multi-objective optimal synthesis of algal biorefineries toward a sustainable circular bioeconomy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463, Article 012051. https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012051
5. FAO (2023). World Food and Agriculture — Statistical Yearbook. Rome. https://doi.org/10.4060/cc8166en
6. Ubando, A.T., Felix, C.B., Chen, W.-H. (2019). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299, Article 122585. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585
7. Володина, А.А., Герб, М.А., Зверева, А.Ю., Горлач, А.А. (2022). Макрофиты российской части Калининградского / Вислинского залива (бассейн

Балтийского моря). *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*, 4, 64–77. [Volodina, A.A., Gerb, M.A., Zvereva, A. Yu., Gorlach, A.A. (2022). Macrophytes of the Russian part of the Kaliningrad/Vistula Bay (Baltic Sea basin). *Vestnik IKBFU. Natural and Medical Sciences*, 4, 64–77. (In Russian)] https://doi.org/10.5922/gikbfu-2022-4-6
8. Tolpeznikaite, E., Bartkevics, V., Ruzauskas, M., Pilkaityte, R., Viskelis, P., Urbonaviciene, D. et al. (2021). Characterization of macro- and microalgae extracts bioactive compounds and micro- and macroelements transition from algae to extract. *Foods*, 10(9), Article 2226. https://doi.org/10.3390/foods10092226
9. Tolpeznikaite, E., Ruzauskas, M., Pilkaityte, R., Bartkevics, V., Zavistanaviciute, P., Starkute, V. et al. (2021). Influence of fermentation on the characteristics of Baltic Sea macroalgae, including microbial profile and trace element content. *Food Control*, 129(15), Article 108235. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108235
10. Kulikova, Y., Sukhikh, S., Kalashnikova, O., Chupakhin, E., Ivanova, S., Chubarenko, B. et al. (2022). Assessment of the resource potential of baltic sea macroalgae. *Applied Sciences*, 12, Article 3599. https://doi.org/10.3390/app12073599
11. Rinne, H., Kostamo, K. (2022). Distribution and species composition of red algal communities in the northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 269, Article 107806. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107806
12. Matin, M., Koszarska, M., Atanasov, A.G., Król-Szmajda, K., Artur Jó´zwik, A., Stelmasiak A. et al. (2024). Bioactive potential of algae and algae-derived compounds: Focus on anti-inflammatory, antimicrobial, and antioxidant effects. *Molecules*, 29(19), Article 4695. https://doi.org/10.3390/molecules29194695
13. Čmiková, N., Galovičová, M., Miškeje, M., Borotová, P., Kluz, P., Kačániová, M. (2022). Determination of antioxidant, antimicrobial activity, heavy metals and elements content of seaweed extracts. *Plants*, 11(11), Article 1493. https://doi.org/10.3390/plants11111493
14. Luhila, Õ., Paalme, T., Tanilas, K., Sarand, I. (2022). Omega-3 fatty acid and B12 vitamin content in Baltic algae. *Algal Research*, 67, Article 102860. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102860
15. Balina, K., Ivanovs, K., Romagnoli, F., Blumberga, D. (2020). Comprehensive literature review on valuable compounds and extraction technologies: The Eastern Baltic Sea Seaweeds. *Environmental and Climate Technologies*, 24(2), 178–195. https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0065
16. Li, C., Tang, T., Du, Y., Jiang, L., Yao, Z., Ning, L. et al. (2023). Ulvan and *Ulva* oligosaccharides: A systematic review of structure, preparation, biological activities and applications. *Bioresources and Bioprocessing*, 10, Article 66. https://doi.org/10.1186/s40643-023-00690-z
17. Romero, A.M., Morales, J.J.P., Klose, L., Liese, A. (2023). Enzyme-assisted extraction of Ulvan from the green macroalgae *Ulva fenestrate*. *Molecules*, 28(19), Article 6781. https://doi.org/10.3390/molecules28196781
18. Pari, R.F., Uju, U., Hardiningtyas, S.D., Ramadhan, W., Wakabayashi, R., Goto, M. et al. (2025). Ulva seaweed-derived Ulvan: A promising marine polysaccharide as a sustainable resource for biomaterial design. *Marine Drugs*, 23(2), Article 56. https://doi.org/10.3390/md23020056
19. Flórez-Fernández, N., Rodríguez-Coello, A., Latire, T., Bourgougnon, N., Torres, M.D., Buján, M. et al. (2023). Anti-inflammatory potential of Ulvan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(Part 4), Article 126936. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126936
20. Ou, J.-Y., Wei, Y.-J., Liu, F.-F., Huang, C.-H. (2023). Huang anti-allergic effects of Ulva-derived polysaccharides, oligosaccharides and residues in a murine model of food allergy. *Heliyon*, 9(12), Article e22840. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22840
21. Khan, N., Sudhakar, K., Mamat, R. (2024). Eco-friendly nutrient from ocean: Exploring *Ulva* seaweed potential as a sustainable food source. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, Article 101239. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101239
22. Barakat, K.M., Ismail, M.M, Abou El Hassayeb, H.E., El Sersy, N.A., Elshobary, M.E. (2022). Chemical characterization and biological activities of Ulvan extracted from *Ulva fasciata* (*Chlorophyta*). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 33, 829–841. https://doi.org/10.1007/s12210-022-01103-7
23. Li, Y., Ye, H., Wang, T., Wang, P., Liu, R., Li, Y. et al. (2020). Characterization of low molecular weight sulfate Ulva polysaccharide and its protective effect against IBD in mice. *Marine Drugs*, 18(10), Article 499. https://doi.org/10.3390/md18100499
24. Pereira, L., Critchley, A.T. (2020). The COVID19 novel coronavirus pandemic 2020: Seaweeds to the rescue? Why does substantial, supporting research about the antiviral properties of seaweed polysaccharides seem to go unrecognized by the pharmaceutical community in these desperate times? *Journal of Applied Phycology*, 32, 1875–1877. https://doi.org/10.1007/s10811-020-02143-y
25. Krangkratok, W., Chantorn, S., Choosuwan, P., Phomkaivon, N., La-ongkham, O., Kosawatpat, P. et al. (2023). Production of prebiotic ulvan-oligosaccharide from the green seaweed *Ulva rigida* by enzymatic hydrolysis. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 54, Article 102922. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102922
26. Liu, Z., Wang, M., Li, J., Guo, X., Guo, Q., Zhu, B. (2025). Differences in utilization and metabolism of *Ulva lactuca* polysaccharide by human gut *Bacteroides* species in the *in vitro* fermentation. *Carbohydrate Polymers*, 351, Article 123126. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123126
27. Yu, S., Sun, Y., Wang, Q., Wu, J., Liu, J. (2023). Extraction of bioactive polysaccharide from *Ulva prolifera* biomass waste toward potential biomedical application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, Article 123852. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123852
28. Feng, Y., An, Z., Chen, H., He, X., Wang, W., Li, X. et al. (2020). *Ulva prolifera* extract alleviates intestinal oxidative stress via Nrf2 signaling in weaned piglets challenged with hydrogen peroxide. *Frontiers in Immunology*, 11, Article 599735. https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.599735
29. Sun, Y.-Y., Dong, S.-S., Zhang, N.-S., Zhou, J., Long, Z.-K. (2021). Screening and isolation of glyceroglycolipids with antialgal activity from several marine macroalgae. *Journal of Applied Phycology*, 33(4), 2609–2616. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02466-4
30. Sun, Y., Mu, Y., Li, T., Wang, S., Li, Y., Liu, J. et al. (2024). Extraction, isolation and biological activity of two glycolipids from *Bangia fusco-purpurea*. *Marine Drugs*, 22(4), Article 144. https://doi.org/10.3390/md22040144
31. Pradhan, B., Patra, S., Nayak, R., Behera, C., Dash, S.R., Nayak, S. et al. (2020). Multifunctional role of fucoidan, sulfated polysaccharides in human health and disease: A journey under the sea in pursuit of potent therapeutic agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 4263–4278. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.019
32. Zhu, Y., Wan, L., Li, W., Ni, D., Zhang, W., Yan, X. et al. (2020). Recent advances on 2′-fucosyllactose: Physiological properties, applications, and production approaches. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1, 2083–2092. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1850413
33. Hans, N., Malik, A., Naik, S. (2021). Antiviral activity of sulfated polysaccharides from marine algae and its application in combating COVID-19: Mini review. *Bioresource Technology Reports*, 13, Article 100623. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100623
34. Barzkar, N., Ivanova, S., Sukhikh, S., Malkov, D., Noskova, S., Babich, O. (2024). Phenolic compounds of brown algae. *Food Bioscience*, 62, Article 105374. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105374
35. Cikoš, A.M., Šubarić, D., Roje, M., Babić, J., Jerković, I., Jokić, S. (2022). Recent advances on macroalgal pigments and their biological activities (2016–2021). *Algal Research*, 65, Article 102748. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102748
36. Piotrowicz, Z., Tabisz, L., Leska, B., Messyasz, B., Pankiewicz, R. (2022). Comparison of the antioxidant properties of green macroalgae from diverse European water habitats by use of several semi-quantitative assays. *Molecules*, 27(12), Article 3812. https://doi.org/10.3390/molecules27123812
37. Freitas, M.V., Pacheco, D., Cotas, J., Mouga, T., Afonso, C., Pereira, L. (2022). Red seaweed pigments from a biotechnological perspective. *Phycology*, 2(1), 1–29. https://doi.org/10.3390/phycology2010001
38. Punampalam, R., Khoo, K.S., Sit, N.W. (2018). Evaluation of antioxidant properties of phycobiliproteins and phenolic compounds extracted from *Bangia atropurpurea*. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 14(2), 289–297. https://doi.org/10.11113/mjfas.v14n2.1096
39. Keramane, B., Sánchez-Camargo, A.P., Montero, L., Laincer, F., Bedjou, F., Ibañez, E. (2013). Pressurized liquid extraction of bioactive extracts with antioxidant and antibacterial activity from green, red and brown Algerian algae. *Algal Research*, 76, Article 103293. https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103293
40. Saha, M., Rempt, M., Grosser, K., Pohnert, G., Weinberger, F. (2011). Surface-associated fucoxanthin mediates settlement of bacterial epiphytes on the rockweed Fucus Vesiculosus. *Biofouling*, 27, 423–433. https://doi.org/10.1080/08927014.2011.580841
41. Buedenbender, L., Astone, F.A., Tasdemir, D. (2020). bioactive molecular networking for mapping the antimicrobial constituents of the Baltic brown alga *Fucus vesiculosus*. *Marine Drugs*, 18(6), Article 311. https://doi.org/10.3390/md18060311
42. Heavisides, E., Rouger, C., Reichel, A.F., Ulrich, C., Wenzel-Storjohann, A., Sebens, S. et al. (2018). Seasonal variations in the metabolome and bioactivity profile of *Fucus vesiculosus* extracted by an optimised, pressurised liquid extraction protocol. *Marine Drugs*, 16(12), Article 503. https://doi.org/10.3390/md16120503
43. Geisen, U., Zenthoefer, M., Peipp, M., Kerber, J., Plenge, J., Managð, A. et al. (2015). Molecular mechanisms by which a *Fucus vesiculosus* extract mediates cell cycle inhibition and cell death in pancreatic cancer cells. *Marine Drugs*, 13(7), 4470–4491. https://doi.org/10.3390/md13074470
44. Ullah, H., Gul, B., Khan, H., Zeb, U. (2021). Effect of salt stress on proximate composition of duckweed (*Lemna minor* L.). *Heliyon*, 7, Article e07399. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07399
45. Ullah, H., Gul, B., Khan, H., Akhtar, N., Rehman, K.U., Zeb, U. (2022). Effect of growth medium nitrogen and phosphorus on nutritional composition of *Lemna minor* (an alternative fish and poultry feed). *BMC Plant Biology*, 22, Article 214. http://dx.doi.org/10.1186/s12870-022-03600-1
46. Sonta, M., Więcek, J., Szara, E., Rekiel, A., Zalewska, A., Batorska, M. (2023). Quantitative and qualitative traits of duckweed (*Lemna minor*) produced on growth media with pig slurry. *Agronomy*, 13(7), Article 1951. https://doi.org/10.3390/agronomy13071951
47. Okwuosa, O.B., Eyo, J.E., Amadi-Ibiam, C.O. (2021). Growth and nutritional profile of duckweed (*Lemna minor*) cultured with different organic Manure. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 8(12), 7–11. http://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.81202
48. Smith, K.E., Schäfer, M., Lim, M., Robles-Zazueta, C.A., Cowan, L., Fisk, L.D. et al. (2024). Aroma and metabolite profiling in duckweeds: Exploring species and ecotypic variation to enable wider adoption as a food crop. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Article 101263. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101263
49. Hu, Z., Fang, Y., Yi, Z., Tian, X., Li, J., Jin, Y. et al. (2022). Determining the nutritional value and antioxidant capacity of duckweed (*Wolffia arrhiza*) under artificial conditions. *LWT*, 153, Article 112477. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112477
50. Крылова, Ю.В., Курашов, Е.А., Митрукова, Г.Г. (2016). Компонентный состав эфирного масла *Potamogeton perfoliatus L.* из Ладожского озера в начале периода плодоношения. *Химия растительного сырья*, 2, 79–88. [Krylova, YU.V., Kurashov, E.A., Mitrukova, G.G. (2016). The component composition of *Potamogeton perfoliatus* L. essential oil from Lake Ladoga at the beginning of the fruiting period. *Himiya Rastitel'nogo Syr'ya,* 2, 79–88. (In Russian)]. https://doi.org/10.14258/jcprm.2016021189
51. Новиченко, О.В. (2016). Биологически активные вещества высших водных растений *Potamogeton perfoliatus* L. и *Zostera noltii*: состав, свойства, применение. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 1(67), 137–142. [Novichenko, O.V. (2016). Biologically active substances of higher aquatic plants *Potamogeton perfoliatus* L. and *Zostera noltii*: Composition, properties, application. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 1(67), 137–142. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-1-137-142

52. Патент 2447675C2. Способ комплексной переработки пресноводной травы рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*) / Мукатова М. Д., Салиева А. Р. Опубл. 20.04.2012. [Mukatova M. D., Salieva A. R. The method of complex processing of freshwater grass is the pierced-leaved rdest (*Potamogeton perfoliatus*). Patent RF 2447675C2. 2012. (In Russian)]
53. Патент 2496813C2. Способ получения хлорофилла из высших водных растений / Мукатова М. Д., Кабанин М. И., Салиева А. Р. Опубл. 27.10.2013. [Mukatova M. D., Kabanin M. I., Salieva A. R. Method of obtaining chlorophyll from higher aquatic plants. Patent RF 2496813C2. 2013. (In Russian)]
54. Wang, S., He, G., Liu, Y., Wang, Y., Ma, Y., Fu, C. et al. (2024). A P1-like MYB transcription factor boosts biosynthesis and transport of C-glycosylated flavones in duckweed. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277(2), 134–138. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134138
55. Ujong, A., Naibaho, J., Ghalamara, S., Tiwari, B.K., Hanon*, S.,* Tiwari, U. (2024). Duckweed: Exploring its farm-to-fork potential for food production and biorefineries. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 54–80. http://doi.org/10.1039/d4fb00288a
56. Prosridee, K., Oonsivilai, R., Tira-aumphon, A., Singthong, J., Oonmetta-aree, J., Oonsivilai, A. (2023). Optimum aquaculture and drying conditions for *Wolffia arrhiza* (L.) Wimn. *Heliyon*, 9, Article e19730. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19730
57. Xu, Y., Ma, S., Huang, M., Peng, M., Bog, M., Sree, S.K. et al. (2015). Species distribution, genetic diversity and barcoding in the duckweed family (Lemnaceae). *Hydrobiologia*, 743, 75–87. http://doi.org/10.1007/s10750-014-2014-2
58. Kutschera, U., Niklas, K.J. (2014). Darwin-wallace demons: Survival of the fastest in populations of duckweeds and the evolutionary history of an enigmatic group of angiosperms. *Plant Biology*, 17(s1), 24–32. https://doi.org/10.1111/plb.12171
59. Hemalatha, M., Mohan, S.V. (2022). Duckweed biorefinery — Potential to remediate dairy wastewater in integration with microbial protein production. *Bioresource Technology*, 346, Article 126499. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126499
60. Министерство сельского хозяйства Калининградской области: животноводство. Электронный ресурс: https://mcx.gov39.ru/zhivotnovodstvo/. Дата обращения 10 марта 2025 г. [Ministry of Agriculture of the Kaliningrad region: animal husbandry. Retrieved from: https://mcx.gov39.ru/zhivotnovodstvo /. Accessed March 10, 2025 (In Russian)]
61. Калининградская область. Хозяйство. Сельское хозяйство. Электронный ресурс: https://bigenc.ru/c/kaliningradskaia-oblast-khoziaistvo-sel-skoe-khoziaistvo-2d43c7. Дата обращения 10 марта 2025. [Kaliningrad region. Farming. Agricultural industry. Retrieved from: https://bigenc.ru/c/kaliningradskaia-oblast-khoziaistvo-sel-skoe-khoziaistvo-2d43c7. Accessed March 10, 2025 (In Russian)]
62. Патент № 2399298. Способ переработки бурых водорослей / Герасименко Н. И. Опубл. 20.09.2010. Бюл. № 33. [Gerasimenko N. I. A method for processing brown algae. Patent RF, no. 2399298. 2010. (In Russian)].
63. Liu, Y., Xu, H., Wang, Y., Tang, X., He, G., Wang, S. et al. (2020). A submerged duckweed mutant with abundant starch accumulation for bioethanol production. *Global Change Bioljgy Bioenergy*, 12(12), 1078–1091. http://doi.org/10.1111/gcbb.12746
64. Никифоров, Л.А., Белоусов, М.В., Фурса, Н.С. (2011). Изучение аминокислотного состава ряски малой (*Lemna minor* L.). *Бюллетень сибирской медицины*, 10(5), 74–77. [Nikiforov, L.A., Belousov, M.V., Fursa, N.S. (2011). Study of amino-acid structure *Lemna minor* L.. *Bulletin of Siberian Medicine*, 10(5), 74–77. (In Russian)]
65. Duangjarus, N., Chaiworapuek, W., Rachtanapun, C., Ritthiruangdej, P., Charoensiddhi, S. (2022). Antimicrobial and functional properties of duckweed (*Wolffia globosa*) protein and peptide extracts prepared by ultrasound-assisted extraction. *Foods*, 11(15), Article 2348. https://doi.org/10.3390/foods11152348
66. Nitiwuttithorn, C., Wongsasulak, S., Vongsawasdi, P., Yongsawatdigul, J. (2024). Effects of alkaline and ultrasonication on duckweed (*Wolffia arrhiza*) protein extracts' physicochemical and techno-functional properties. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, Article 1343615. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1343615
67. Патент 2694969C1. Способ получения пектиновых веществ из ряски Lemna minor / Политаева Н. А., Смятская Ю. А., Опарина А. М. Опубл. 18.07.2019. [Politaeva N. A., Smyatskaya Y. A., Oparina A. M. A method for obtaining pectin substances from Lemna minor duckweed. Patent RF 2694969C1. 2019. (In Russian)]
68. Vu, G., Xiang, X., Zhou, H., McClements, D.J. (2023). Lutein-fortified plant-based egg analogs designed to improve eye health: Formation, characterization, in vitro digestion, and bioaccessibility. *Foods*, 12(1), Article 2. https://doi.org/10.3390/foods12010002
69. Yahaya, N., Hamdan, N.H., Zabidi, A.R., Mohamad, A.M., Suhaimi, M.L.H., Johari, M.A.A. et al. (2022). Duckweed as a future food: Evidence from metabolite profile, nutritional and microbial analyses. *Future Foods*, 5, Article 100128. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100128
70. On-Nom, N., Promdang, P., Inthachat, W., Kanoongon, P., Sahasakul, Y., Chupeerach, C. et al. (2023). *Wolffia* globosa-based nutritious snack formulation with high protein and dietary fiber contents. *Foods*, 12(14), Article 2647. https://doi.org/10.3390/foods12142647
71. Sela, I., Meir, A.Y., Brandis, A., Krajmalnik-Brown, R., Zeibich, L., Chang, D. et al. (2020). *Wolffia globosa — Mankai* plant-based protein contains bioactive vitamin B_{12} and is well absorbed in humans. *Nutrients*, 12(10), Article 3067. https://doi.org/10.3390/nu12103067
72. Rocchetti, G., Rebecchi, A., Zhang, L., Dallolio, M., Del Buono, D., Freschi, G. et al. (2023). The effect of common duckweed (*Lemna minor* L.) extract on the shelf-life of beef burgers stored in modified atmosphere packs: A metabolomics approach. *Food Chemistry: X*, 20, Article 101013. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101013
73. Efremov, A.N., Sviridenko, B.F., Toma, C., Mesterházy, A., Murashko, Y.A. (2019). Ecology of *Stratiotes aloides* L. (Hydrochoritaceae) in Eurasia. *Flora*, 253, 116–126. https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.03.009
74. Cook, C.D.K., Urmi-König, K. (1983). A revision of the genus *Stratiotes* (hydrocharitaceae). *Aquatic Bot*any, 16(3), 213–249. https://doi.org/10.1016/0304-3770(83)90035-9
75. Ефремов, А.Н., Свириденко, Б.Ф. (2008) Экобиоморфа телореза обыкновенного *Stratiotes abides* L. (*Hydrocharitaceae*) в Западно-Сибирской части ареала. *Биология внутренних вод*, 3, 29–34. [Efremov, A.N., Sviridenko, B.F. (2008). Ecobiomorph of the common watercreeper *Stratiotes abides* L. (*Hydrocharitaceae*) in the West Siberian part of its range. *Biologiya Vnutrennikh Vod*, 3, 29–34. (In Russian)]
76. Бобров, Ю.А. (2017). Жизненные формы водных трав Северо-Востока Европейской России. *Arctic Environmental Research*, 17(2), 104–112. [Bobrov, Yu. A. Growth forms of Aquatic herbsin the Northeast of European Russia. *Arctic Environmental Research*, 17(2), 104–112. (In Russian)]. https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2017.17.2.104
77. Ефремов, А.Н., Филоненко, А.В., Свириденко, Б.Ф. (2015). Анатомия и морфология репродуктивных органов *Stratiotes aloides* L. (Hydrocharitaceae). *Биология внутренних вод*, 4, 1223. [Efremov, A.N., Filonenko, A.V., Sviridenko, B.F. (2015). Anatomy and morphology of the reproductive organs of *Stratiotes aloides* L. (Hydrocharitaceae). *Biologiya Vnutrennikh Vod*, 4, 12–23. (In Russian).] https://doi.org/10.7868/S0320965215040051
78. Turner, B., Hameister, S., Hudler, A., Bernhardt, K.-G. (2021). Genetic diversity of *Stratiotes aloides* L. (Hydrocharitaceae) stands across Europe. *Plants*, 10(5), Article 863. https://doi.org/10.3390/plants10050863
79. Germ, M., Gaberščik, A. (2025). Water or dry land — that is not a question for amphibious plant species. *International Journal of Limnology*, 61, Article 1. https://doi.org/10.1051/limn/2024025
80. Ефремов, А.Н., Бельгибаева, А.М., Алехина, Е.А., Филимонова, М.В., Свириденко, Б.Ф., Шалыгин, С.П. и др. (2012). Компонентный состав *Stratiotes aloides* (Hydrocharitaceae) в водоемах бассейна Среднего Иртыша. *Химия растительного сырья*, 4, 161–166. [Efremov, A.N., Belgibaeva, A.M., Alyokhina, E.A., Filimonova, M.V., Sviridenko, B.F., Shalygin, S.P. et al. (2012). Composition structure of *Stratiotes aloides* (Hydrocharitaceae) in water bodies of the Medium Irtysh basin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 4, 161–166. (In Russian)]
81. Ефремов, А.Н., Алехина, Е.А., Иминова, Д.Е., Омаргалиева, Н.К. (2016). К вопросу о содержании аминокислот и водорастворимых витаминов у некоторых представителей семейства Hydrocharitaceae. *Химия растительного сырья*, 1, 85–91. [Efremov, A.N., Alyokhina, E.A., Pimenova, D.E., Omargalieva, N.K. (2016). On the question of the amino acids and water-soluble vitamins content in some species of the family Hydrocharitaceae. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 1, 85–91. (In Russian)]. https://doi.org/ 10.14258/jcprm.201601924
82. Алехина, Е. А. Ефремов, А.Н., Емельянова, О.А. (2018). Растения семейства Hydrocharitaceae — новый источник дубильных веществ? *Химия растительного сырья*, 3, 179–184. [Alyokhina, E. A. Efremov, A.N., Yemelyanova, O.A. (2018). Are the plants of the family Hydrocharitaceae a new source of tannins? *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 3, 179–184 (In Russian)]. https://doi.org/ 10.14258/jcprm.2018033723
83. Kotelnaya, Ya.I., Alekhina, E.A., Efremov, A. N. Bolotova Ya, V., Guselnikova, M.V., Nikolaenko S. A. et al. (2019). Notes on the saponins in the plants of the family Hydrocharitaceae. *Botanica Pacifica: A Journal of Plant Science and Conservation*, 8(1), 57–61. https://doi.org/10.17581/bp.2019.08101
84. Исайкина, Н.В., Коломиец, Н.Э., Абрамец, Н.Ю., Марьин, А.А. (2022) Исследование травы крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.), произрастающей в некоторых районах Европейской части России и Сибири. *Химия растительного сырья*, 3, 127–138. [Isaykina, N.V., Kolomiets N. E., Abramets, N. Yu., Maryin, A.A. (2022) Study of stinging nettle herb (*Urtica dioica* L.), growing in some areas of the European part of Russia and Siberia. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 3, 127–138. (In Russian)]. https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310873
85. Рябинина, Е.И., Зотова, Е.Е., Пономарева, Н.И. (2012). Потенциометрическое определение дубильных веществ в лекарственном растительном сырье. *Фармация*, 2, 8–10. [Ryabinina, E.I., Zotova, E.E., Ponomareva, N.I. (2012). Potentiometric determination of tannins in medicinal plant raw materials. *Farmatsiya*, 2, 8–10. (In Russian)]
86. Ефремов, А.Н., Иминова, Д.Е., Алехина, Е.А., Дюсембаев, С.Т. (2017). Содержание химических элементов в фитомассе некоторых представителей семейства *Hydrocharitaceae*. *Химия растительного сырья*, 1, 107–111. [Efremov, A.N., Iminova, D.E., Alyokhina, E.A., Dyusembaev, S.T. (2017). The content of chemical elements in biomass of some species of the Hydrocharitaceae family. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 1, 107–111. (In Russian)]. https://doi.org/ 10.14258/jcprm.2017011294
87. Байкалова, Л.П., Горбачев, И.А. (2019). Влияние видового состава трав на содержание макроэлементов и кормовых единиц в пастбищных кормах. *Вестник КрасГАУ*, 11(152), 90–97. [Baykalova, L.P., Gorbachev, I.A. (2019). The influence of species composition of grasses on the content of macroelements and fodder units in pasture feed. *Bulletin of KrasGAU*, 11(152), 90–97 (In Russian)]. https://doi.org/10.36718/1819-4036-2019-11-90-97
88. Рабинович, Г.Ю., Васильева, Е.А. (2024). Создание и перспективы использования препаратов для кормопроизводства и животноводства. *Аграрный научный журнал*, 8, 95–102. [Rabinovich, G. Yu., Vasilyeva, E.A. (2024). Creation and prospects for the use of drugs for feed production and livestock livestock farming. *The Agrarian Scientific Journal*, 8, 95–102 (In Russian)]. https://doi.org/10.28983/asj.y2024i8pp95-102
89. Рабинович, Г.Ю., Васильева, Е.А. (2019). Разработка премикса с адаптогенными свойствами и его апробация. *Достижения науки и техники АПК,* 33(8), 72–76. [Rabinovich, G. Yu., Vasilyeva, E.A. (2019). Development and testing of premix with adaptogenic properties. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 33(8), 72–76. (In Russian)]. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10816
90. Lima, N.P., Maciel, G.M., Pinheiro, D.F., Ribeiro I. S., Lima, N.F., Liviz, C.A.M. et al. (2025). Innovative protein sources from freshwater and marine environments — A comprehensive review. *Measurement: Food*, 17, Article 100215. https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2025.100215

91. Morach, B., Witte, B., Walker, D., von Koeller, E., Grosse-Holz, F., Rogg, J. et al. (2021). Food for thought: The protein transformation. *Industrial Biotechnology*, 17(3), 125–133. https://doi.org/10.1089/ind.2021.29245.bwi
92. Li, Y., Xiang, N., Zhu, Y., Yang, M., Shi, C., Tang, Y. et al. (2024). Blue source-based food alternative proteins: Exploring aquatic plant-based and cell-based sources for sustainable nutrition, *Trends in Food Science and Technology*, 147, Article 104439. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104439
93. Raja, K., Kadirvel, V., Subramaniyan, T. (2022). Seaweeds, an aquatic plant-based protein for sustainable nutrition — A review. *Future Foods*, 5, Article 100142. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100142
94. Farid, M.S., Anjum, R., Yang, Y., Tu, M., Zhang, T., Pan, D. et al. (2024). Recent trends in fermented plant-based analogues and products, bioactive peptides, and novel technologies-assisted fermentation. *Trends in Food Science and Technology*, 149, Article 104529. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104529

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ульрих Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор, кафедра инжиниринга технологического оборудования, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–99–53–40 E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277	**Elena V. Ulrikh**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technological Equipment Engineering, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–99–53–40 E-mail: elena.ulrikh@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4107-7277
Ключко Наталия Юрьевна — кандидат технических наук, доцент, кафедра пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–56–48–07 E-mail: natalya.kluchko@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6708-9674	**Nataliya Yu. Klyuchko**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–56–48–07 E-mail: natalya.kluchko@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6708-9674
Агафонова Светлана Викторовна — кандидат технических наук, доцент, кафедра пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–56–48–07 E-mail: svetlana.agafonova@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5992-414X * автор для контактов	**Svetlana V. Agafonova**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–56–48–07 E-mail: svetlana.agafonova@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5992-414X * corresponding author
Землякова Евгения Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, кафедра пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–93–53–50 E-mail: evgeniya.zemljakova@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0974-3914	**Evgeniya S. Zemlyakova**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–93–53–50 E-mail: evgeniya.zemljakova@klgtu.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0974-3914
Сухих Станислав Алексеевич — доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Балтийский Федеральный университет им. И. Канта 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14 Тел.: +7–960–903–62–81 E-mail: stas-asp@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388	**Stanislav A. Sukhikh**, Doctor of Technical Sciences., Associate Professor, Head of Laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University 236041, 14, Nevsky str., Kaliningrad, Russia Тел.: +7–960–903–62–81 E-mail: stas-asp@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7910-8388
Качанова Анжелика Валерьевна — аспирант, кафедра пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–56–48–07 E-mail: asunyaykina54@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1290-0577	**Anzhelika V. Kachanova**, Graduate Student, Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–56–48–07E-mail: asunyaykina54@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0009-0006-1290-0577
Федорова Олеся Сергеевна — студент, кафедра пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, проспект Советский, 1 Тел.: +7–4012–56–48–07 E-mail: olesya.student.fedorova@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0006-8226-1408	**Olesya S. Fedorova**, Student, Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University 1, Prospekt Sovetskiy, 236022, Kaliningrad, Russia Tel.: +7–4012–56–48–07 E-mail: olesya.student.fedorova@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0006-8226-1408

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-286-295

Поступила 15.04.2025
Поступила после рецензирования 19.06.2025
Принята в печать 23.06.2025
© Куликов Д. С., Королев А. А., Пчелкина В. А., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

СВОЙСТВА И МОЛЕКУЛЯРНО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФЕРМЕНТАТИВНО-ГИДРОЛИЗОВАННЫХ БЕЛКОВ ГОРОХОВОГО ИЗОЛЯТА И ВТОРИЧНОГО КРАХМАЛО-БЕЛКОВОГО ПРОДУКТА

Куликов Д. С.[1]*, Королев А. А.[1], Пчелкина В. А.[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования, Видное, Московская область, Россия
[2] Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
гороховая мука, белки, ферменты, изолят, крахмало-белковый продукт, вторичная структура, функциональные свойства, перевариваемость

АННОТАЦИЯ

В ходе исследований изучены функциональные характеристики и молекулярная структура ферментативно-гидролизованного горохового изолята и вторичного крахмало-белкового продукта, полученных методом ферментативной экстракции муки с применением отечественных карбогидраз и протеазы. Установлена взаимосвязь между структурными особенностями белков, их функциональными свойствами и биодоступностью. Изолят содержал 94% белка, имел светло-кремовый цвет и слабый привкус гороха. По сравнению с изолятом, полученным традиционной щелочной экстракцией, он отличался повышенными показателями растворимости (на 23,40%), пенообразующей способности (на 35,56%), жиросвязывающей способности (на 33,48%), перевариваемости *in vitro* (на 11,79%) и увеличенным содержанием β-изгибов в структуре белка (в 2,32 раза). Активность уреазы, в сравнении с исходной гороховой мукой, в исследуемом изоляте снизилась в 5 раз. Увеличение пенообразующей способности белков изолята и снижение стабильности пены связано с высоким содержанием β-структур и со снижением количества α-спиралей. Повышенная пористость частиц белков исследуемого изолята способствовала увеличению растворимости его в воде и атакуемости ферментами желудочно-кишечного тракта, в сравнении с изолятом, полученным традиционным способом. Крахмало-белковый продукт содержал около 75% крахмала и 10% белка, обладал молочным цветом, мучнистым вкусом со слабым привкусом гороха. Также в сравнении с мукой продукт имел расщепленную структуру, увеличенные показатели перевариваемости белков *in vitro* (на 2,81%), содержания в белке α-спиралей (на 67,90%), β-изгибов (в 2,37 раза) со снижением количества β-слоя (в 10,12 раза) и активности уреазы. С учетом достигнутых результатов гороховый изолят, полученный ферментативной экстракцией российскими ферментами, целесообразно рекомендовать в качестве белкового ингредиента при изготовлении напитков на растительной основе и продуктов питания с пенной системой, а крахмало-белковый продукт — в технологии изготовления экструзионных снеков.

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

Received 15.04.2025
Accepted in revised 19.06.2025
Accepted for publication 23.06.2025
© Kulikov D. S., Korolev A. A., Pchelkina V. A., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

PROPERTIES AND MOLECULAR-STRUCTURAL FEATURES OF ENZYMATICALLY HYDROLYZED PROTEINS OF PEA ISOLATE AND SECONDARY STARCH-PROTEIN PRODUCT

Denis S. Kulikov[1]*, Aleksey A. Korolev[1], Viktoriya A. Pchelkina[2]

[1] Russian Research Institute of Canning Technology, Vidnoe, Moscow region, Russia
[2] V. M. Gorbatov Federal Research Center of Food System, Moscow, Russia

KEY WORDS:
pea flour, proteins, enzymes, isolate, starch-protein product, secondary structure, functional properties, digestibility

ABSTRACT

The study examined the functional characteristics and molecular structure of the enzymatically hydrolyzed pea isolate and secondary starch-protein product obtained by enzymatic extraction of flour using domestic carbohydrases and protease. A relationship was established between the structural features of proteins, their functional properties and bioavailability. The isolate contained 94% protein, had a light cream color and a slight pea flavor. Compared with the isolate obtained by traditional alkaline extraction, it had increased solubility (by 23.40%), foaming capacity (by 35.56%), fat-binding capacity (by 33.48%), in vitro digestibility (by 11.79%) and an increased content of β-bends in the protein structure (by 2.32 times). Urease activity in the isolate under study decreased 5 times in comparison with the original pea flour. Increased foaming capacity of the isolate proteins and decreased foam stability are associated with a high content of β-structures and a decrease in the number of α-helices. Increased porosity of the isolate protein particles contributed to an increase in its solubility in water and attackability by gastrointestinal enzymes, in comparison with the isolate obtained in the traditional way. The starch-protein product contained about 75% starch and 10% protein, had a milky color, a floury taste with a slight pea flavor. Also, in comparison with flour, the product had a split structure, increased protein digestibility in vitro (by 2.81%), the content of α-helices in protein (by 67.90%), β-bends (by 2.37 times) with a decrease in the amount of β-layer (by 10.12 times) and urease activity. Taking into account the achieved results, the pea isolate obtained by enzymatic extraction with Russian enzymes should be recommended as a protein ingredient in the production of plant-based drinks, food products with a foam system, and the starch-protein product — in the technology of manufacturing extrusion snacks.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Куликов, Д. С., Королев, А. А., Пчелкина, В. А.** (2025). Свойства и молекулярно-структурные особенности ферментативно-гидролизованных белков горохового изолята и вторичного крахмало-белкового продукта. *Пищевые системы*, 8(2), 286–295. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-286-295

FOR CITATION: **Kulikov, D. S., Korolev, A. A., Pchelkina, V. A.** (2025). Properties and molecular-structural features of enzymatically hydrolyzed proteins of pea isolate and secondary starch-protein product. *Food Systems*, 8(2), 286–295. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-286-295

1. Введение

Значимой проблемой и одной из главных причин развития ряда алиментарных заболеваний является дефицит полноценного белка в ежедневном рационе питания населения [1]. Необходимость создания высокоценных белковых ингредиентов и расширение их ассортимента с использованием современных технологий, включая биотехнологии, является актуальной задачей и диктуется Стратегией повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Правительством РФ в 2016 году. Производство белковых продуктов из растительного сырья отличается более высокой рентабельностью и меньшим негативным воздействием на биосферу по сравнению с животными аналогами [2,3]. Перспективным растительным сырьем для переработки на белковые ингредиенты в России является горох — популярнейшая зернобобовая культура, валовые сборы которой в 2024 году, по предварительным прогнозам, составили 4,8 млн тонн [4]. Горох отличается высоким содержанием белка (до 25 %) и незаменимых аминокислот, которые поступают в организм человека исключительно с пищей [2,5]. Кроме того, его зерно является гипоаллергенным и практически не содержит ингибиторов ферментов желудочно-кишечного тракта — так называемых антипитательных веществ [6,7].

Белковые ингредиенты из гороха (изоляты, концентраты) нашли широкое применение в технологиях изготовления протеиновых батончиков [8], экструзионных хлопьев [9,10], хлеба [11], пасты [12], бисквитов [13], кисломолочных продуктов [14], заменителей мяса [15], растительных аналогов сыров [16] и многих других продуктов. Однако в современных условиях производства белковых ингредиентов, в том числе из растительного сырья, на стадии экстракции белков традиционно используются щелочные растворы. Они изменяют структуру белков, снижают их биодоступность и некоторые функционально-технологические свойства, которые определяют качество и направление реализации белковых продуктов в пищевых системах [17–19]. Более того, щелочная экстракция белков приводит к образованию горечи и к потемнению белковых продуктов, что существенно ограничивает их применение в продуктах питания [20,21]. Решением данной проблемы является использование биотехнологического метода экстракции белков с применением ферментных препаратов, не снижающих качество белковых продуктов за счет высокой специфичности ферментов и сравнительно мягких условий обработки [5,20,22,23]. Важной рекомендацией, указанной в ранее упомянутой Стратегии, является разработка и внедрение в производство пищевой продукции отечественных ингредиентов и субстанций, включая ферментные препараты. Однако в научной литературе практически отсутствуют сведения о применении ферментных препаратов российских производителей в процессе биотехнологической переработки гороховой муки, а также о влиянии отечественных ферментов на функционально-технологические свойства, вторичную структуру и биодоступность гороховых белков.

Другой важной проблемой промышленного производства белковых изолятов и концентратов является образование вторичных продуктов, которые чаще всего утилизируются, негативно влияя на экологию, или реализуются на изготовление кормов с низкой добавленной стоимостью [17]. Одним из таких продуктов глубокой переработки гороха выступает крахмало-белковый остаток, состоящий из горохового крахмала, клетчатки и нерастворимой белковой фракции. При биотехнологической обработке гороховой муки с использованием ферментных систем увеличиваются органолептические показатели и биодоступность не только целевых белковых препаратов, но и вторичных продуктов, которые могут быть реализованы в качестве полезных ингредиентов пищевых продуктов [17,20]. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является изучение изменений свойств и молекулярно-структурных особенностей белкового изолята и вторичного крахмало-белкового продукта, полученных биотехнологической экстракцией белков гороховой муки с использованием отечественных ферментных препаратов.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты

В качестве объектов для исследований использовалась цельносмолотая гороховая мука («Образ жизни», РФ), а также полученные из нее различными способами (ферментативная, щелочная экстракция) белковые изоляты и вторичный крахмало-белковый продукт.

2.2. Подготовка образцов

Ферментативно-гидролизованный белковый изолят получен путем ферментативной экстракции гороховой муки ферментными препаратами российского производства («Сиббиофарм») с амилазной («АмилоЛюкс-А»), целлюлазной, ксиланазной («ЦеллоЛюкс-А»), глюкоамилазной («ГлюкоЛюкс-А») и протеолитической активностью («АцидоЛюкс-НП»). Технология предусматривает приготовление суспензии с гидромодулем мука–вода 1:10 и с последующей двухстадийной ферментативной обработкой гороховой муки: 1 стадия — добавление карбогидраз в концентрации 1,0 %/г белка при pH 5,7 ± 0,1, температуре 55 ± 1 °C, скорости перемешивания 150 об/мин и продолжительности 120 минут; 2 стадия — добавление протеазы в концентрации 1,2 %/г белка при pH 7,0 ± 0,1, температуре 55 ± 1 °C, скорости перемешивания 150 об/мин и продолжительности 120 минут. Процессы экстракции, изоэлектрического осаждения и нейтрализации белков проводили на лабораторном ферментере (BIORUS, РФ) объемом 5 литров с постоянным контролем температуры, pH среды, скорости и продолжительности перемешивания. Обработка муки карбогидразами предусматривается с целью расщепления углеводных молекул (крахмал, целлюлоза, гемицеллюлоза, пентозаны) и высвобождения связанного с ними белка для перевода его в растворенное состояние. Применение протеазы в процессе ферментативной экстракции позволяет расщепить высокомолекулярные белки для их легкого перевода в раствор и увеличения выхода.

После обработки ферментами суспензию центрифугировали в течение 20 минут при 4200 g на центрифуге MPW-260R (MPW Med. Instruments, Польша). Затем отделяли нерастворимый остаток — крахмало-белковый продукт, содержащий углеводы (в основном крахмал) и нерастворимую белковую фракцию. В полученном супернатанте (белковый экстракт) осаждали белок в изоэлектрической точке (pH 4,2 ± 0,1), осадок нейтрализовывали 0,5 H NaOH до pH 7,0 ± 0,1, промывали водой и высушивали на сублимационной сушилке LAB3 (Lyomachines, РФ) при температуре заморозки — 30 ± 1 °C.

В качестве сравнения свойств и молекулярно-структурных изменений белков был получен из гороховой муки того же производителя белковый изолят традиционным способом с применением щелочной экстракции белков при pH 9,0 ± 0,1 [22].

2.3. Определение химического состава и свойств образцов

Массовую долю влаги в образцах определяли по ГОСТ 13586.5-2015[1]; общих азотистых веществ (Nx6,25) — по ГОСТ 10846-91[2]; золы — по ГОСТ 27494-2016[3]; жира — по ГОСТ 29033-91[4]; крахмала — по ГОСТ 10845-98[5]; прочих углеводов — по разнице между 100 % и суммой остальных компонентов. Функционально-технологические свойства гороховых изолятов исследовали по методикам [24,25]. Перевариваемость белков *in vitro* определяли по методу А. А. Покровского и И. Д. Ертанова, моделируя процесс пищеварения в желудочно-кишечном тракте человека на первой стадии с пепсином («ЛенРеактив», РФ) в кислой среде при pH 1,8 ± 0,1, на второй — с трипсином («Самсон-Мед», РФ) в щелочной среде при pH 8,4 ± 0,1 [26]. Активность уреазы в образцах определяли по ГОСТ 13979.9-69[6].

2.4. Микроскопия образцов

Изучение микроструктуры образцов проводили методом «раздавленная капля» на световом микроскопе AxioImaiger A1 (Carl Zeiss, Германия) с применением программы анализа изображений AxioVision 4.7.1.0 (Carl Zeiss, Германия).

Морфология частиц была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Coxem EM-30 Plus (Coxem, Корея). Для этого часть образца наносили на карбоновую двустороннюю клейкую ленту, размещенную на держателе образца, и покрывали тонким слоем золота с помощью установки для нанесения ионных покрытий SPT-20 (Coxem, Корея) (в режиме 100 сек, 5 мА).

2.5. Рамановская спектроскопия

Регистрацию спектров проводили на конфокальном спектроскопе InVia Raman (Renishaw plc, Wotton-under-Edge, Великобритания), оснащенном детектором CCD, согласно работе [27]. Пик Si 521 $см^{-1}$ использовали для калибровки спектрометра. Небольшую часть образца помещали на предметное стекло, обернутое алюминиевой

[1] ГОСТ 13586.5-2015. «Зерно. Метод определения влажности». — М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

[2] ГОСТ 10846-91. «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». — М.: Стандартинформ, 2009. — 9 с.

[3] ГОСТ 27494-2016. «Мука и отруби. Методы определения зольности». — М.: Стандартинформ, 2019. — 16 с.

[4] ГОСТ 29033-91. «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира». — М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. — 6 с.

[5] ГОСТ 10845-98. «Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала». — М.: Стандартинформ, 2009. — 6 с.

[6] ГОСТ 13979.9-69. «Жмыхи и шроты. Методика выполнения измерений активности уреазы». — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 9 с.

фольгой, и сжимали другим предметным стеклом, которое затем удаляли. Для каждого образца спектры записывали с десяти точек. Снятие спектров осуществляли с помощью лазера с длиной волны 785 нм (решетка 1200 шт/мм) при мощности 100 %, время съемки составляло 10 с. Лазер фокусировали на образце объективом x50L. Спектры регистрировали в диапазоне от 700 до 1800 $см^{-1}$. Предварительная обработка спектров включала коррекцию базовой линии, сглаживание с применением алгоритма Савицкого-Голея, нормализацию. Полосу амида I (1630–1700 $см^{-1}$) анализировали с использованием деконволюции спектра в программе WiRE версии 5.5.24865-r5.5.HF2 (Renishaw plc, Wotton-under-Edge, Великобритания) согласно работе [28].

2.6. Статистический анализ экспериментальных данных

Исследования проводили в 3–4-кратных повторностях, полученные числовые результаты представляли в виде среднего арифметического с использованием стандартного отклонения, рассчитанного с критерием Стьюдента при уровне значимости $p \leqslant 0,05$.

Числовые характеристики спектров (наименование пиков, их площадь, высота, ширина, интенсивность) обрабатывали в Microsoft Excel, статистическую достоверность отличий рассчитывали в программе STATISTICA 10.0, использовали дисперсионный анализ (ANOVA) с применением критерия Тьюки. Вероятность 0,05 была выбрана в качестве значимого уровня.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Внешний вид образцов

Ферментативно-гидролизованный белковый изолят представлял собой порошок светло-кремового цвета со слабым гороховым привкусом. Для сравнения: образцы исходной гороховой муки и изолята, полученного традиционной щелочной экстракцией, имели цвет от желтого до светло-коричневого и характерный бобовый, горьковатый вкус (Рисунок 1).

Полученные результаты объясняются тем, что в щелочной среде протекают окислительные процессы, приводящие к образованию темноокрашенных соединений и к появлению горечи в белковых продуктах из бобовых культур. Напротив, ферментативная экстракция в мягких условиях не оказывает негативного влияния на органолептические свойства, снижая горечь и нейтрализуя специфический бобовый вкус [5,19,20]. Благодаря высокому содержанию крахмала вторичный крахмало-белковый продукт обладал молочным цветом и мучнистым вкусом, характерным для крахмала, со слабым привкусом гороха.

3.2. Химический состав, функционально-технологические и биохимические свойства

Химический состав образцов представлен в Таблице 1. Установлено, что при использовании ферментативной экстракции белков гороховой муки с отечественными ферментными препаратами получен белковый продукт с содержанием белка более 90 %, что выше, чем в исходной муке, в 3,87 раза и относится к группе «изоляты» [18]. Процесс щелочной экстракции белков позволяет получить изолят с меньшей чистотой белка (около 85 %) в сравнении с ферментативно-гидролизованным образцом. Отмечено также, что в полученном ферментативной экстракцией изоляте, по сравнению с белком, выделенным традиционным способом, практически полностью отсутствовали углеводы, содержалось меньше липидов (в 2,78 раза) и зольных элементов (на 29,95 %). Накопление золы в изолятах объясняется несколькими переходами pH среды в процессе экстракции и изоэлектрического осаждения белков с образованием соли. Поскольку pH среды при щелочной экстракции белков (pH 9,0) выше, чем при ферментативной (pH 5,7–7,0), то возросло и количество выделившейся соли. Крахмало-белковый продукт отличался высоким содержанием общих углеводов и крахмала, что выше, чем в исходной муке, на 20,51 % и 25,86 % соответственно. Также вторичный продукт производства белкового изолята содержал около 10 % белка, что сравнимо с содержанием белка в зерновых культурах [7]. В этой связи перспективно использование экструзионных технологий для получения гороховых снеков из крахмало-белкового продукта.

Были проведены исследования функционально-технологических свойств белковых гороховых изолятов, полученных различными методами (Таблица 2). По сравнению с изолятом, выделенным щелочной экстракцией, ферментативно-гидролизованный изолят имел повышенные показатели растворимости (на 23,40 %), пенообразующей (на 35,56 %) и жиросвязывающей способности (на 33,48 %). В то же время белки изолята, экстрагированные щелочью, обладали увеличенной водосвязывающей способностью (в 2,96 раза), что согласуется с литературными данными, объясняющими это изменение образованием новых межмолекулярных связей между остатками аминокислот при щелочном сдвиге pH среды [29]. Также изолят характеризовался большей стабильностью пены (на 11,69 %), эмульсии (на 26,92 %) и более высокой жироэмульгирующей способностью (на 9,62 %).

Таким образом, исходя из полученных данных по функционально-технологическим свойствам, ферментативно-гидролизованный изолят целесообразно рекомендовать к применению в качестве белкового ингредиента в технологиях изготовления напитков на растительной основе, протеиновых коктейлей, а также продуктов питания

Гороховая мука | Изолят. Ферментативная экстракция | Изолят. Щелочная экстракция | Крахмало-белковый продукт

Рисунок 1. **Внешний вид образцов**
Figure 1. **Appearance of samples**

Таблица 1. **Химический состав образцов**
Table 1. **Chemical composition of samples**

Показатель	Образец			
	Гороховая мука	Изолят. Ферментативная экстракция	Изолят. Щелочная экстракция	Крахмало-белковый продукт
Содержание влаги, %	10,54 ± 0,02^{c}	4,17 ± 0,19^{b}	3,17 ± 0,03^{a}	3,06 ± 0,08
Содержание белка (*N* × 6,25), % на СВ	24,33 ± 0,07^{c}	94,16 ± 0,15^{b}	85,38 ± 0,12^{a}	10,06 ± 0,07^{d}
Содержание зольных элементов, % на СВ	2,72 ± 0,04^{c}	4,04 ± 0,06^{b}	5,25 ± 0,07^{a}	0,87 ± 0,05^{d}
Содержание липидов, % на СВ	0,89 ± 0,04^{c}	1,65 ± 0,08^{b}	4,58 ± 0,11^{a}	4,47 ± 0,27
Содержание углеводов, % на СВ	72,06 ± 0,10^{c}	0,15 ± 0,07^{b}	4,79 ± 0,19^{a}	86,84 ± 0,17^{d}
в т. ч. крахмала, % на СВ	59,60 ± 0,16^{a}			75,01 ± 0,11^{b}

Примечание: СВ — сухие вещества; числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 3$ при использовании критерия Стьюдента; ^{abcd} — значимая разница между образцами ($p \leqslant 0,05$).

Таблица 2. **Функционально-технологические свойства белковых изолятов**

Table 2. **Functional and technological properties of protein isolates**

Показатель	Образец изолята	
	Ферментативная экстракция	Щелочная экстракция
Растворимость белков в воде, %	86,96 ± 0,71[a]	70,47 ± 0,50[b]
Водосвязывающая способность, г/г	0,84 ± 0,03[a]	2,49 ± 0,03[b]
Пенообразующая способность, %	61 ± 1[a]	45 ± 3[b]
Стабильность пены, %	77 ± 1[a]	86 ± 1[b]
Жиросвязывающая способность, г/г	3,03 ± 0,15[a]	2,27 ± 0,02[b]
Жироэмульгирующая способность, %	52 ± 2[a]	57 ± 1[b]
Стабильность эмульсии, %	52 ± 1[a]	66 ± 2[b]

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 4$ при использовании критерия Стьюдента; [ab] — значимая разница между образцами ($p \leqslant 0,05$).

с пенной системой (кексы, зефир, пастила, бисквиты, крема и т. д.). Изолят, полученный традиционным щелочным способом, рекомендуется к применению в технологиях изготовления растительного мяса, кисломолочных продуктов на растительной основе, низкокалорийного маргарина, соусов и т. д.

Белки изолята, выделенного ферментативной экстракцией, и вторичного крахмало-белкового продукта практически полностью усваивались *in vitro*, перевариваясь на 2,81–5,64 % интенсивнее, чем белки исходной гороховой муки (Таблица 3).

При этом установлено снижение перевариваемости белков изолята, полученного щелочной экстракцией, на 5,50 %, относительно гороховой муки, что объясняется денатурацией белковых молекул в процессе щелочной обработки, рацемизацией аминокислот и снижением их биодоступности [5,18,20]. Несмотря на то, что в исходной гороховой муке активность уреазы, коррелирующей с активностью антипитательных веществ бобовых культур, была низкой, в процессе получения изолятов с высоким содержанием белка могла увеличиться концентрация антипитательных веществ в белковых продуктах [6,7]. Проведенные исследования показали снижение активности уреазы относительно гороховой муки в обоих образцах изолятов, независимо от метода их получения. Во вторичном крахмало-белковом продукте активность уреазы была ниже, чем в гороховой муке, но несколько выше, чем в изолятах, что, предположительно, означает переход уреазы в нерастворимую фракцию белков в процессе ферментативной обработки муки.

3.3 Микроскопия образцов

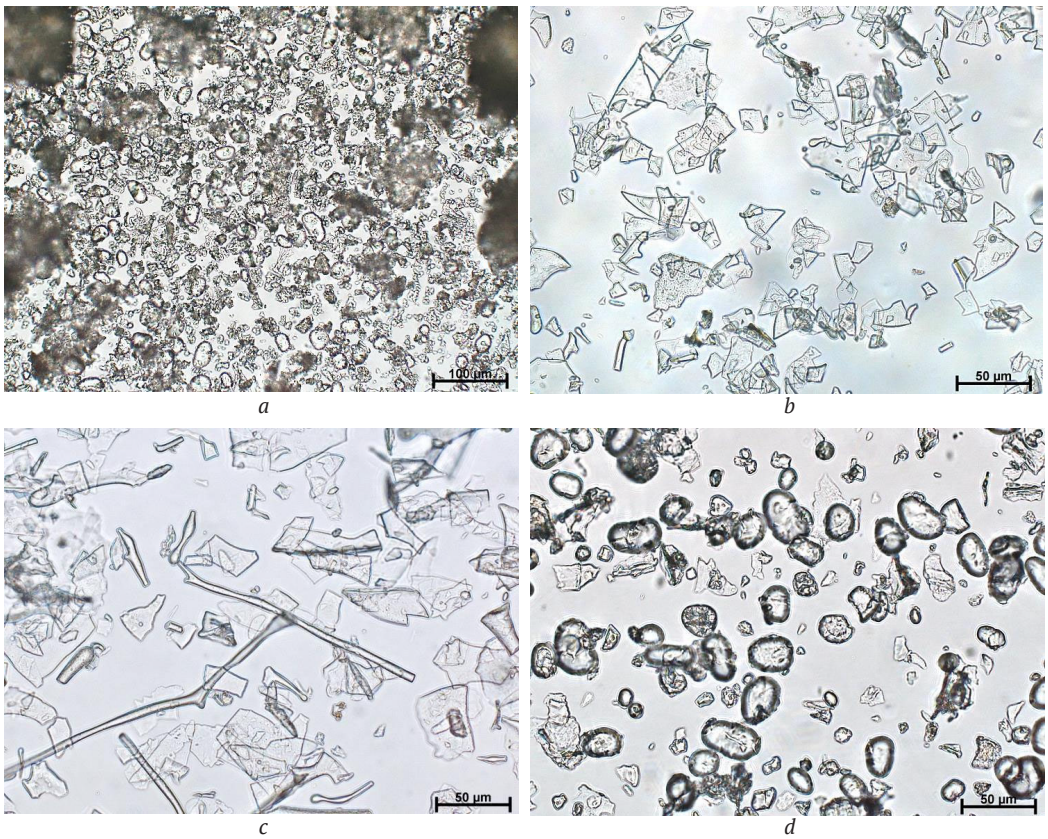
Образец гороховой муки состоял из крупных фрагментов растительных тканей, сохранивших свою структуру. Эти фрагменты представляли собой округлые клетки с четко различимой целлюлозной оболочкой, заполненные крахмальными зернами (Рисунок 2*a*).

Таблица 3. **Перевариваемость белков *in vitro* и активность уреазы в образцах**

Table 3. ***In vitro* protein digestibility and urease activity in samples**

Показатель	Образец			
	Гороховая мука	Изолят. Ферментативная экстракция	Изолят. Щелочная экстракция	Крахмало-белковый продукт
Перевариваемость белков, %	93,64 ± 0,15[b]	98,92 ± 0,11[a]	88,49 ± 0,19[c]	96,27 ± 0,17[d]
в т. ч. с пепсином (pH 1,8), %	70,16 ± 0,11[b]	84,44 ± 0,06[a]	62,68 ± 0,12[c]	74,71 ± 0,10[d]
с трипсином (pH 8,4), %	23,48 ± 0,04[b]	14,48 ± 0,05[a]	25,81 ± 0,07[c]	21,56 ± 0,07[d]
Активность уреазы, ед. pH	0,05 ± 0,01[b]	0,01 ± 0,01[a]	0,02 ± 0,01	0,03 ± 0,01

Примечание: числовые данные представляют собой средние значения ± стандартное отклонение для группы $n = 4$ при использовании критерия Стьюдента; [abcd] — значимая разница между образцами ($p \leqslant 0,05$).



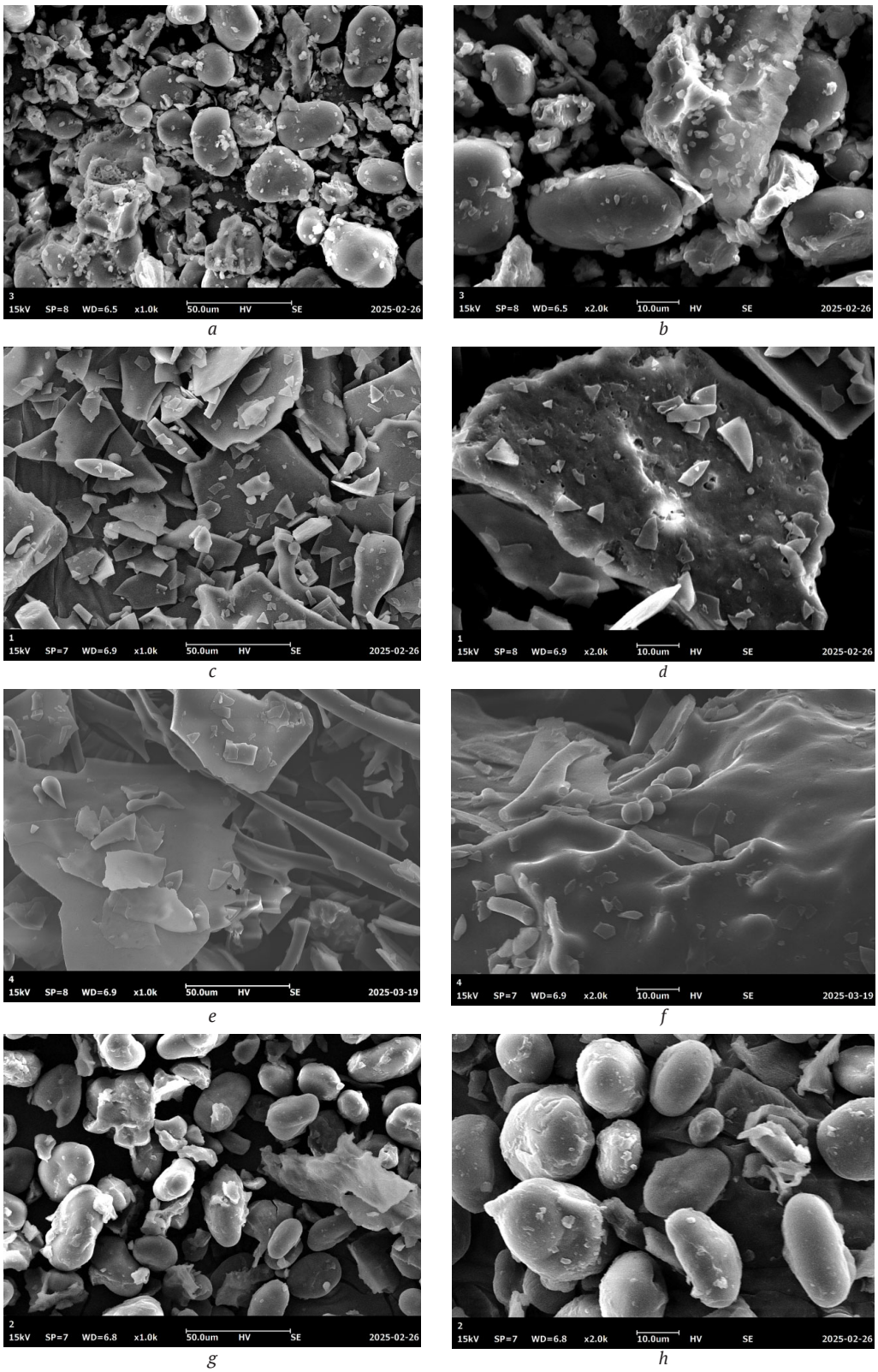
a *b* *c* *d*

Рисунок 2. **Фотографии структур, полученные на просвечивающем микроскопе: *a* — гороховая мука (увеличение ×200), *b* — изолят, ферментативная экстракция (увеличение ×400), *c* — изолят, щелочная экстракция (увеличение ×400), *d* — крахмало-белковый продукт (увеличение ×400)**

Figure 2. **Photographs of structures obtained with a transmission microscope: *a* — pea flour (magnification ×200), *b* — isolate, enzymatic extraction (magnification ×400), *c* — isolate, alkaline extraction (magnification ×400), *d* — starch-protein product (magnification ×400)**

Кроме того, в результате механического измельчения образовались отдельные фрагменты клеток и мелкие частицы неправильной формы, которые были связаны с крахмальными зернами или находились в межгранулярном пространстве и представляли собой фрагменты белковой матрицы (Рисунок 3*a*, 3*b*).

В образце изолята, полученного ферментативной экстракцией белков, присутствовали уплощенные частицы неправильной геометрической формы с хорошо дифференцируемыми границами (Рисунок 2*b*). При электронной микроскопии было установлено, что крупные частицы имели пористость, вероятно, вследствие протеолиза



a *b* *c* *d* *e* *f* *g* *h*

Рисунок 3. **Фотографии структур, полученные на сканирующем электронном микроскопе: *a* — гороховая мука (увеличение ×1000), *b* — гороховая мука (увеличение ×2000), *c* — изолят, ферментативная экстракция (увеличение ×1000), *d* — изолят, ферментативная экстракция (увеличение ×2000), *e* — изолят, щелочная экстракция (увеличение x1000), *f* — изолят, щелочная экстракция (увеличение ×2000), *g* — крахмало-белковый продукт (увеличение ×1000), *h* — крахмало-белковый продукт (увеличение ×2000)**

Figure 3. **Scanning electron micrographs of structures: *a* — pea flour (magnification ×1000), *b* — pea flour (magnification ×2000), *c* — isolate, enzymatic extraction (magnification ×1000), *d* — isolate, enzymatic extraction (magnification ×2000), *e* — isolate, alkaline extraction (magnification ×1000), *f* — isolate, alkaline extraction (magnification ×2000), *g* — starch-protein product (magnification ×1000), *h* — starch-protein product (magnification ×2000)**

белковых молекул (Рисунок 3*c*, 3*d*). При анализе образца изолята, полученного традиционной щелочной экстракцией, выявлены уплощенные частицы неправильной геометрической формы с хорошо дифференцируемыми границами (Рисунок 2*c*), схожие с частицами ферментативно-гидролизованного изолята, а также удлиненные частицы в виде «палочек». При электронной микроскопии было установлено, что плоские частицы имели небольшую пористость, удлиненные частицы были монолитны (Рисунок 3*e*, 3*f*).

Повышенная пористость структуры белков ферментативно-гидролизованного изолята в сравнении с образцом, экстрагированным щелочью, позволяла увеличить площадь соприкосновения белковых частиц с молекулами воды и растворами протеаз (пепсин, трипсин), что, соответственно, способствовало повышению показателей растворимости и биодоступности (перевариваемости) изолята [5].

Крахмало-белковый продукт состоял преимущественно из однотипных зерен горохового крахмала (Рисунок 2*d*). Крупные комплексы растительных клеток отсутствовали, однако выявлялись единичные фрагменты целлюлозных оболочек и мелкие частицы неправильной формы, предположительно, белковые, схожие с частицами ферментативно-гидролизованного изолята (Рисунок 3*g*, 3*h*).

3.4. Рамановская спектроскопия образцов

В образцах гороховой муки и крахмало-белкового продукта в зависимости от структуры полученные спектры разделили на две группы: углеводная часть (крахмал) и белковая часть. На спектрах, полученных от углеводной части образцов (Рисунок 4), область между 800 и 1200 $см^{-1}$ относилась к симметричным модам растяжения C–O и C–C и деформации C–O–C в гликозидной связи [30,31]. Область 1200–1500 $см^{-1}$ содержала информацию об особенностях колебания углеводов (амилозы и амилопектина в крахмале) и, согласно литературным данным, была специфична для деформационных колебаний –CH [31,32].

Основное внимание при анализе уделили спектрам, полученным от белковой части образцов муки, изолятов и крахмало-белкового продукта (Рисунок 5). Информация о вторичной структуре белка (α-спирали, β-слой, β-изгибы и неупорядоченная структура) на рамановских спектрах представлена полосами амида I (1600~1700 $см^{-1}$), амида II (1510~1560 $см^{-1}$) и амида III (1230~1350 $см^{-1}$) [33–37]. Полосы амидов II и III редко используются в анализе, поскольку их интерпретация затруднена: у амида II это связано с малой изменчивостью поляризуемости изгиба N–H, а также растяжений связей C–C и C–N пептидной группы, а у амида III — с перекрытием полос, характерных для β-слоя (1230–1245 $см^{-1}$) и неупорядоченной структуры (1240–1255 $см^{-1}$) [33,34].

При сравнении спектров образцов можно отметить, что в ферментативно-гидролизованном изоляте присутствовал отчетливый сигнал 1235–1245 $см^{-1}$ (амид III), отвечающий за антипараллельный

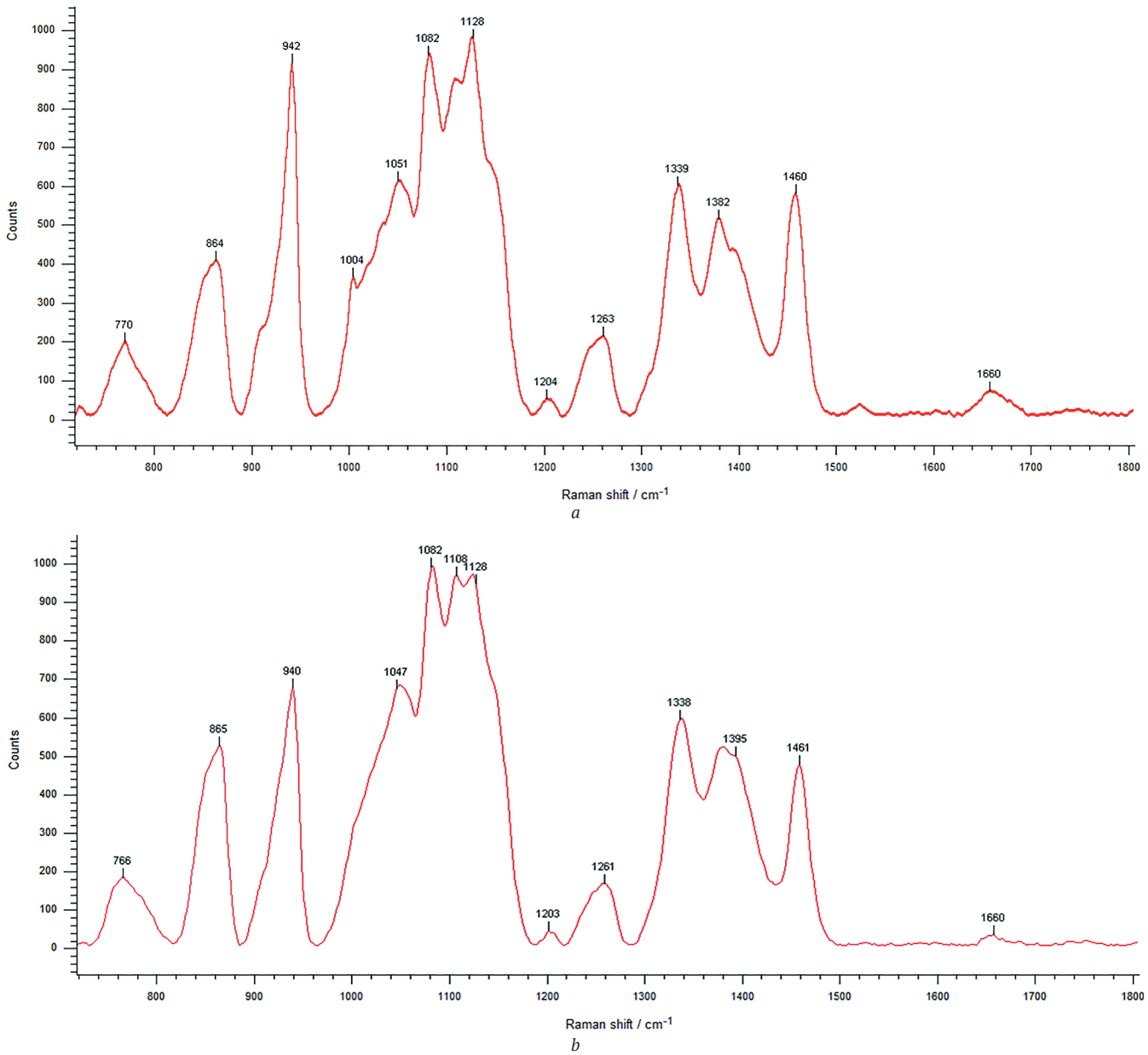


Рисунок 4. **Рамановские спектры углеводной части образцов в диапазоне 800–1800 $см^{-1}$: *a* — гороховая мука, *b* — крахмало-белковый продукт**

Figure 4. **Raman spectra of the carbohydrate part of the samples in the range of 800–1800 $см^{-1}$: *a* — pea flour, *b* — starch-protein product**

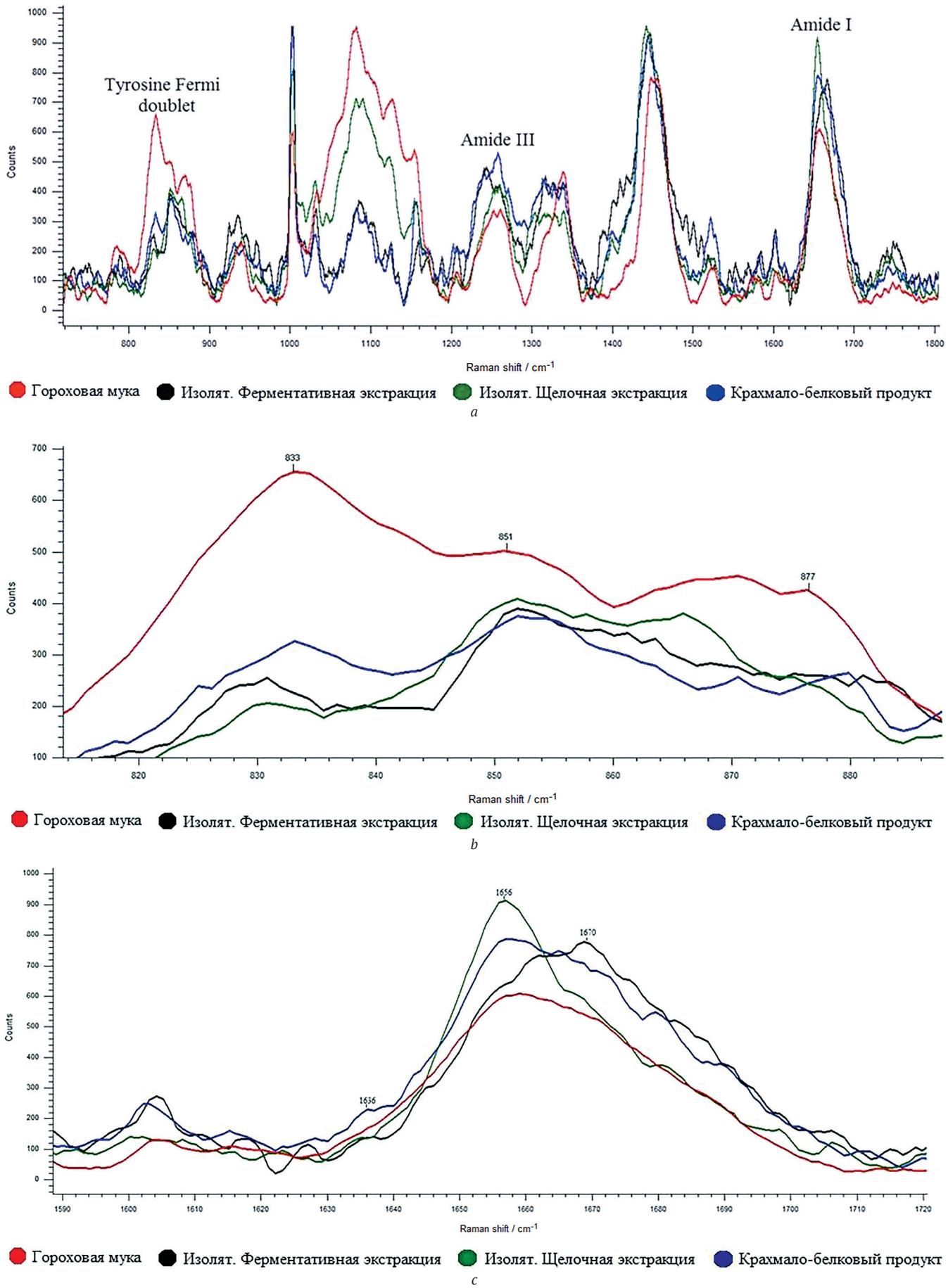


Рисунок 5. **Рамановские спектры белковой части образцов: *a* — в диапазоне 800–1800 см$^{-1}$, *b* — в диапазоне 830–850 см$^{-1}$ (дублет тирозина), *c* — в диапазоне 1630–1700 см$^{-1}$(область амид I)**

Figure 5. **Raman spectra of the protein portion of the samples: *a* — in the range of 800–1800 cm^{-1}, *b* — in the range of 830–850 cm^{-1} (tyrosine doublet), *c* — in the range of 1630–1700 cm^{-1} (amide I region)**

β-слой и неупорядоченную структуру, тогда как в других образцах наблюдался более интенсивный сигнал ~1260 $см^{-1}$, характеризующий α-спирали.

Также в спектре ферментативно-гидролизованного изолята область, отвечающая за амид I, смещена правее спектров прочих образцов, что также свидетельствует о большем присутствии β-структур. Согласно литературным данным, полосу амида I (1630–1700 $см^{-1}$) можно использовать для анализа вторичной структуры белка, так как она редко подвергается помехам со стороны других молекул [34]. Результаты анализа вторичной структуры белков в исследуемых образцах показаны в Таблице 4.

Анализ спектра Рамана показал, что образцы белковых изолятов различались по содержанию белковых структур: в образце ферментативно-гидролизованного изолята β-изгибов было в 2,33 раза больше, тогда как в изоляте, полученном щелочной экстракцией, содержание α-спиралей превышало его в 2,12 раза. Это может быть связано с разрушением водородных связей в изоляте после ферментативного гидролиза, которые поддерживают стабильность структуры α-спиралей. В то же время, по сравнению с гороховой мукой, при щелочной экстракции наблюдается значительное увеличение процентного содержания α-спиралей (на 38,67 %) и снижение β-структур (на 28,96 %). Эти изменения подтверждаются литературными данными, согласно которым денатурация белковых молекул может снижать функционально-технологические свойства белкового продукта [38].

В структуре белковой части крахмало-белкового продукта по сравнению с гороховой мукой зафиксировано увеличение количества α-спиралей (на 67,90 %) и β-изгибов (в 2,37 раза). При этом содержание β-слоя снизилось (в 10,12 раза), как и в обоих образцах изолятов (в 2,45–2,62 раза). Известно, что уменьшение содержания β-слоя указывает на обнажение гидрофобно связанных участков белка. Это может быть использовано, например, при взаимодействии с гидрофобными полиненасыщенными жирными кислотами с целью ингибирования окисления липидов и увеличения их сохранности в пищевых продуктах [34]. Также известно, что бобовые белки с относительно более высоким содержанием β-структур, как, например, у ферментативно-гидролизованного изолята, обладают большей термической стабильностью и денатурируют при более высоких температурах. Это указывает на возможность их применения в технологиях производства пищевых продуктов с термической обработкой без утраты структурной и функциональной ценности [39,40]. К тому же, исходя из результатов работ по изучению гороховых, нутовых и рисовых белковых концентратов, полученных ферментативной экстракцией белков с использованием импортных ферментных препаратов, установлена взаимосвязь между вторичной структурой белков и функционально-технологическими свойствами концентратов [17,24]. Определено, например, что увеличение пенообразующей способности белков и снижение стабильности пены связано с высоким содержанием β-структур. Данный вывод подтверждается и результатами настоящей работы: в образце ферментативно-гидролизованного изолята, характеризующегося преобладанием β-структур, отмечено более высокое пенообразование (61 %) и более низкая стабильность пены (77 %). Для сравнения, у изолята, полученного щелочной экстракцией и содержащего в структуре белков преимущественно α-спирали, эти показатели составили 45 % и 86 % соответственно.

Другим подходом для определения структурных изменений белка является соотношение интенсивности тирозина [36]. Дублет 855 и 830 $см^{-1}$ возникает в результате резонанса Ферми. Соотношения интенсивности при 850 $см^{-1}$ и 830 $см^{-1}$ спектра Рамана можно использовать для мониторинга силы водородной связи фенольного гидроксила и полярности микроокружения вокруг остатков тирозина, для характеристики его скрытых и открытых состояний (является он донором или акцептором водородной связи) [34]. Изменения, вызванные факторами денатурации, влияют на природу водородных связей и на изменение отношения интенсивности этого дублета. Когда I_{850} меньше I_{830}, это указывает на то, что в белке количество скрытых остатков тирозина выше, если I_{850} больше I_{830} — остатки тирозина переходят из «скрытого» в «открытое» состояние. В образце исходной гороховой муки I_{850} была меньше I_{830}, чем в изолятах и крахмало-белковом продукте, что говорит о тенденции к обнажению остатков тирозина при любом способе получения белковых изолятов. Соотношение I_{850}/I_{830} составило: для гороховой муки — $0{,}746 \pm 0{,}073^{b}$; для ферментативно-гидролизованного изолята — $1{,}449 \pm 0{,}135^{a}$; для изолята для сравнения — $1{,}263 \pm 0{,}144$; для крахмало-белкового продукта — $1{,}847 \pm 0{,}172^{c}$ (^{abc} — значимые различия между образцами, $p < 0{,}05$). Таким образом, образцы белковых изолятов, полученные разными способами, по соотношению I_{850} / I_{830} не имели существенных различий.

4. Выводы

Выявлены особенности свойств и молекулярной структуры ферментативно-гидролизованного изолята и вторичного крахмало-белкового продукта, полученных с использованием отечественных карбогидраз («АмилоЛюкс-А», «ЦеллоЛюкс-А», «ГлюкоЛюкс-А») и протеазы («АцидоЛюкс-НП»). Обнаружена взаимосвязь структуры белков с их функционально-технологическими свойствами и биодоступностью.

Ферментативно-гидролизованный изолят содержал 94 % белка. Он имел светло-кремовый оттенок, пористую структуру и слабый привкус гороха. По сравнению с изолятом, полученным традиционным способом (щелочной экстракцией), он характеризовался большей растворимостью (на 23,40 %), более высокими пенообразующей (на 35,56 %) и жиросвязывающей (на 33,48 %) способностями, а также повышенной перевариваемостью белка *in vitro* (на 11,79 %). Также было отмечено увеличение содержания β-изгибов в структуре белка (в 2,32 раза). Активность антипитательных веществ по сравнению с гороховой мукой была снижена в 5 раз.

Вторичный крахмало-белковый продукт содержал около 75 % крахмала и 10 % белка. Он отличался молочным оттенком, мучнистым вкусом со слабым привкусом гороха и расщепленной структурой без крупных белково-крахмальных комплексов (в сравнении с гороховой мукой). Продукт демонстрировал повышенную перевариваемость белков *in vitro* (на 2,81 %), а также увеличение содержания α-спиралей (на 67,90 %) и β-изгибов (в 2,37 раза) при одновременном снижении количества β-слоя (в 10,12 раза). Кроме того, наблюдалось снижение активности антипитательных веществ.

На примере изолятов, полученных ферментативной и щелочной экстракцией, установлено, что увеличение пенообразующей способности белков и снижение стабильности пены взаимосвязано с высоким содержанием β-структур и со снижением количества α-спиралей. Повышенная пористость крупных частиц белков ферментативно-гидролизованного изолята способствовала увеличению растворимости в воде и атакуемости ферментами желудочно-кишечного тракта (пепсин, трипсин), что увеличивало, соответственно, биодоступность изолята. С учетом достигнутых результатов, полученный ферментативной экстракцией российскими ферментами гороховый белковый изолят целесообразно рекомендовать в качестве легкоусвояемого белкового ингредиента в технологиях изготовления напитков на растительной основе, протеиновых коктейлей, продуктов питания с пенной системой (кексы, зефир, пастила, бисквиты, крема и т. д.), а вторичный крахмало-белковый продукт — в технологии изготовления экструзионных снеков.

Таблица 4. **Содержание вторичных белковых структур в образцах, % от общего количества**

Table 4. **Content of secondary protein structures in samples, % of total amount**

Вторичные структуры	Образец			
	Гороховая мука	Изолят. Ферментативная экстракция	Изолят. Щелочная экстракция	Крахмало-белковый продукт
α-спирали	$34{,}73 \pm 1{,}87^{c}$	$22{,}67 \pm 1{,}15^{a}$	$48{,}16 \pm 1{,}04^{d}$	$58{,}31 \pm 2{,}64^{b}$
β-слой	$43{,}82 \pm 2{,}36^{c}$	$16{,}74 \pm 0{,}90^{a}$	$17{,}86 \pm 0{,}88$	$4{,}33 \pm 1{,}04^{b}$
β-изгибы	$7{,}98 \pm 0{,}50^{c}$	$44{,}13 \pm 3{,}89^{a}$	$18{,}94 \pm 0{,}63^{d}$	$33{,}47 \pm 3{,}13^{b}$
Неупорядоченная структура	$13{,}46 \pm 1{,}02^{c}$	$16{,}46 \pm 0{,}46^{a}$	$15{,}04 \pm 0{,}49$	$3{,}89 \pm 1{,}07^{b}$

Примечание: ^{abcd} — значимая разница между образцами ($p < 0{,}05$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Урубков, С. А., Королёв, А. А., Смирнов, С. О. (2022). Разработка рецептур каш и крупяных продуктов для диетического профилактического питания. *Техника и технология пищевых производств*, 52(3), 536–544. [Urubkov, S. A., Korolev, A. A., Smirnov, S. O. (2022). Cereals and cereal products for dietary preventive nutrition. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(3), 536–544. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2380
2. Ismail, B. P., Senaratne-Lenagala, L., Stube, A., Brackenridge, A. (2020). Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. *Animal Frontiers*, 10(4), 53–63. https://doi.org/10.1093/af/vfaa040
3. Webber, J. (2023). How many CO2 emissions does the meat industry actually produce? Plant based news. Retrieved from: https://plantbasednews.org/opinion/the-long-read/emissions-meat-industry Accessed March 28, 2025.
4. Экспертно-аналитический центр агробизнеса «АБ-Центр». (2024). Прогноз сборов гороха в России в 2024 году. Электронный ресурс: https://ab-centre.ru/news/prognoz-sborov-goroha-v-rossii-v-2024-godu?ysclid=m8sn6qjq9e598121550 Дата обращения: 28.03.2025. [Expert and analytical center of agribusiness «AB-Center». (2024). Forecast of pea harvests in Russia in 2024. Retrieved from: https://ab-centre.ru/news/prognoz-sborov-goroha-v-rossii-v-2024-godu?ysclid=m8sn6qjq9e598121550 Accessed March 28, 2025. (In Russian)]
5. Куликов, Д. С., Королев, А. А. (2025). Аспекты ферментативной модификации растительных белков. *Пищевые системы*, 8(1), 22–28. [Kulikov, D. S., Korolev, A. A. (2025). Aspects of enzymatic modification of plant proteins. *Food Systems*, 8(1), 22–28. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-8-1-22-28
6. Вебер, А. Л., Леонова, С. А. (2024). Изменения биологической и пищевой ценности зерна гороха и фасоли в результате его биоактивации. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*, 27(3), 282–293. [Veber, A. L., Leonova, S. A. (2024). Changes in the biological and nutritional value of pea and bean grains as a result of their bioactivation. *Vestnik of MSTU. Scientific Journal of Murmansk State Technical University,* 27(3), 282–293. (In Russian)] https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-3-282-293
7. Samtiya, M., Aluko, R. E., Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2, Article 6. https://doi.org/10.1186/s43014-020-0020-5
8. Khodaei, D., Noci, F., Ryan, L. (2025). Optimizing protein bars with whey protein isolate, pea protein isolate, and blue whiting (*Micromesistius poutassou*) fish protein hydrolysate: A simplex-centroid mixture design study. *Food Science and Nutrition*, 13, Article e4701. https://doi.org/10.1002/fsn3.4701
9. Leiva-Castro, B., Mamani-Benavente, L., Elías-Peñafiel, C., Comettant-Rabanal, R., Silva-Paz, R., Olivera-Montenegro, L. et. al. (2025). Andean pseudocereal flakes with added pea protein isolate and banana flour: Evaluation of physical — chemical, microstructural, and sensory properties. *Foods,* 14, Article 620. https://doi.org/10.3390/foods14040620
10. Öztürk, Z., Lille, M., Rosa-Sibakov, N., Sozer, N. (2024). Impact of heat treatment and high moisture extrusion on the *in vitro* protein digestibility of sunflower and pea protein ingredients. *LWT*, 214, Article 117133. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117133
11. Wójcik, M., Różyło, R., Schönlechner, R., Berger, M.V. (2021). Physico-chemical properties of an innovative gluten-free, low-carbohydrate and high protein-bread enriched with pea protein powder. *Scientific Reports*, 11(1), Article 14498. https://doi.org/10.1038/s41598-021-93834-0
12. Nguyen, N. P. M., Marzec, A. (2024). Effect of microwave–vacuum drying and pea protein fortification on pasta characteristics. *Processes,* 12(11), Article 2508. https://doi.org/10.3390/pr12112508
13. Bustillos, M. A., Jonchère, C., Garnier, C., Réguerre, A. L., Valle, G. D. (2020). Rheological and microstructural characterization of batters and sponge cakes fortified with pea proteins. *Food Hydrocolloids*, 101, Article 105553. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105553
14. Колпакова, В. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Уланова, Р. В., Бессонов, В. В. (2024). Кисломолочный продукт функционального назначения с гороховым концентратом. *Пищевая промышленность,* 6, 126–132. [Kolpakova, V. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Ulanova, R. V., Bessonov, V. V. (2024). Fermented milk product for functional purposes with peas concentrate. *Food Industry*, 6, 126–132. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2024.6.6.026
15. Plattner, B. J., Hong, S., Li, Y., Talavera, M. J., Dogan, H., Plattner, B. S. et al. (2024). Use of pea proteins in high-moisture meat analogs: physicochemical properties of raw formulations and their texturization using extrusion. *Foods,* 13(8), Article 1195. https://doi.org/10.3390/foods13081195
16. Hanley, L., Dobson, S., Stobbs, J., Marangoni, A. G. (2025). Physicochemical and functional characterization of plant protein isolates and their influence on plant-based mozzarella cheese performance. *Food Hydrocolloids*, 164, Article 111222. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111222
17. Колпакова, В. В., Уланова, Р. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Семенов, Г. В., Шевякова, Л. В. (2022). Показатели качества гороховых и нутовых белковых концентратов. *Техника и технология пищевых производств*. 52(4), 650–664. [Kolpakova, V. V., Ulanova, R. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Semenov, G. V., Shevjakova, L. V. Pea and chickpea protein concentrates: Quality indicators. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 649–664. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394
18. Ma, K., Greis, M., Lu, J., Nolden, A., McClements, D., Kinchla, A. (2022). Functional performance of plant proteins. *Foods*, 11, Article 594. https://doi.org/10.3390/foods11040594
19. Shevkani, K., Singh, N., Chen Y., Kaur, A., Yu, L. (2019). Pulse proteins: Secondary structure, functionality and applications. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2787–2798. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03723-8
20. Nasrabadi, M. N., Doost, A. S., Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118, Article 106789. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789
21. Lu, Z. X., He, J. F., Zhang, Y. C., Bing, D. J. (2020). Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. C*ritical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2593–2605. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248
22. Kravchenko, I. V., Furalyov, V. A., Kostyleva, E. V., Sereda, A. S., Kurbatova, E. I., Tsurikova, N. V. et. al. (2024). Effect of different classes of proteases on the techno-functional properties of pea protein isolates. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 60, 106–117. https://doi.org/10.1134/S0003683824010083
23. Kravchenko, I. V., Furalyov, V. A., Pshennikova, E. S., Kostyleva, E. V., Sereda, A. S., Kurbatova, E. I. et. al. (2024). The effect of various domestically produced proteolytic enzyme preparations on the organoleptic properties of pea protein isolates. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 60(4), 656–662. https://doi.org/10.1134/S0003683824604335
24. Колпакова, В. В., Фан, К. Ч., Гайворонская, И. С., Чумикина, Л. В. (2023). Свойства и структурные особенности белков нативных и модифицированных концентратов из белого и коричневого риса. *Пищевые системы*, 6(3), 317–328. [Kolpakova, V. V., Fan, Q. Ch., Gaivoronskaya, I. S., Chumikina, L. V. (2023). Properties and structural features of native and modified proteins of concentrates from white and brown rice. *Food Systems*, 6(3), 317–328. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-317-328
25. Дегтярев, И. А., Гаравири, М., Фоменко, И. А., Вострикова, Н. Л., Машенцева, Н. Г. (2025). Сравнение функционально-технологических свойств и аминокислотного состава изолятов белка растительного происхождения. *Вестник КрасГАУ,* 2(215), 202–215. [Degtyarev, I. A., Garaviri, M., Fomenko, I. A., Vostrikova, N. L., Mashentseva, N. G. (2025). Comparison of functional and technological properties and amino acid composition of protein isolates of plant origin. *Bulliten KrasSAU,* 2(215), 202–215. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-2-202-215
26. Василевская, Е. Р., Арюзина, М. А., Ахремко, А. Г. (2022). Биоконверсия *in vitro*: сравнение мультиферментных систем INFOGEST 2.0 и протокола Покровского-Ертанова. *Все о мясе,* 6, 44–49. [Vasilevskaya, E. R., Aruzina, M. A., Akhremko, A. G. (2022). *In vitro* bioconversion: Comparison of multi-enzyme systems INFOGEST 2.0 and Pokrovkiy-Ertanov protocol. *Vsyo o Myase,* 6, 44–49. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-6-44-49
27. Zhao, H., Shen, C., Wu, Z., Zhang, Z., Xu, C. (2020). Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products. *Journal of Food Biochemistry*, 44, Article e13157. https://doi.org/10.1111/jfbc.13157
28. Lv, T., Wang, Y., Pan, D., Cao, J., Zhang, X., Sun, Y., et. al. (2017). Effect of trypsin treatments on the structure and binding capacity of volatile compounds of myosin. *Food Chemistry*, 214, 710–716. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.115
29. Jeong, M.-S., Cho, S.-J. (2024). Effect of pH-shifting on the water holding capacity and gelation properties of mung bean protein isolate. *Food Research International*, 177, Article 113912. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113912
30. Stawoska, I., Wesełucha-Birczyńska, A., Skoczowski, A., Dziurka, M., Waga, J. (2021). FT-Raman spectroscopy as a tool to study the secondary structures of wheat gliadin proteins. *Molecules,* 26(17), Article 5388. https://doi.org/10.3390/molecules26175388
31. Wiercigroch, E., Szafraniec, E., Czamara, K., Pacia, M. Z., Majzner, K., Kochan, K. et al. (2017). Raman and infrared spectroscopy of carbohydrates: A review. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 185, 317–335. https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.05.045
32. Volant, C., Gilet, A., Beddiaf, F., Collinet-Fressancourt, M., Falourd, X., Descamps, N. et al. (2020). Multiscale structure of starches grafted with hydrophobic groups: A new analytical strategy. *Molecules,* 25(12), Article 2827. https://doi.org/10.3390/molecules25122827
33. Hunt, N. T. (2024). Using 2D-IR spectroscopy to measure the structure, dynamics, and intermolecular interactions of proteins in H_2O. *Accounts of Chemical Research,* 57(5), 685–692. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00682
34. Yu, D., Zhang, X., Zou, W., Tang, H., Yang, F., Wang, L. et al. (2021). Raman spectroscopy analysis of the effect of electrolysis treatment on the structure of soy protein isolate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15, 1294–1300. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00716-6
35. Guo, J., Jiang, S., Lu, B., Zhang, W., Zhang, Y., Hu, X. et al. (2025). Exploring the potential of microscopic hyperspectral, Raman, and LIBS for nondestructive quality assessment of diverse rice samples. *Plant Methods,* 21(1), Article 25. https://doi.org/10.1186/s13007-025-01345-0
36. Kuhar, N., Sil, S., Umapathy, S. (2021). Potential of Raman spectroscopic techniques to study proteins. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 258, Article 119712. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119712
37. Nawrocka, A., Krekora, M., Niewiadomski, Z., Szymańska-Chargot, M., Krawęcka, A., Sobota, A., Miś, A. (2020). Effect of moisturizing pre-treatment of dietary fibre preparations on formation of gluten network during model dough mixing — A study with application of FT-IR and FT-Raman spectroscopy. *LWT*, 121, Article 108959. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108959
38. Fernández Sosa, E. I., Chaves, M. G., Quiroga, A. V., Avanza, M. V. (2021). Comparative study of structural and physicochemical properties of pigeon pea (*Cajanus cajan L.*) protein isolates and its major protein fractions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76, 37–45. https://doi.org/10.1007/s11130-020-00871-7
39. Wang, D., Du, H., Dang, X., Zhao, Y., Zhang, J., Liu, R. et al. (2024). Enzymatic hydrolysis processing of soybean meal altered its structure and *in vitro* protein digestive dynamics in pigs. *Frontiers in Veterinary Science,* 11, Article1503817. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1503817
40. Parmar, N., Singh, N., Kaur, A., Virdi, A., Shevkani, K. (2017). Protein and microstructure evaluation of harder-to-cook and easy-to-cook grains from different kidney bean accessions. *LWT- Food Science and Technology*, 79, 487–495. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.027

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Куликов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 Тел.: +7–903–709–81–23 E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * автор для контактов	**Denis S. Kulikov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia Tel.: +7–903–709–81–23 E-mail: d.kulikov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2171-0522 * corresponding author
Королев Алексей Александрович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией процессов и оборудования консервного производства, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская область, Видное, ул. Школьная, 78 Тел.: +7–926–113–19–08 E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522	**Alexey A. Korolev**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Processes and Equipment for Canning Production, Russian Research Institute of Canning Technology 78, Shkol`naya str., 142703, Vidnoe, Moscow region, Russia Tel.: +7–926–113–19–08 E-mail: a.korolev@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7144-2522
Пчелкина Виктория Александровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина, 26 Тел.: +7–495–676–95–11 (242) Email: v.pchelkina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8923-8661	**Viktoriya A. Pchelkina**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7–495–676–95–11 (242) Email: v.pchelkina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8923-8661
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-296-305

Поступила 13.05.2025
Поступила после рецензирования 24.06.2025
Принята в печать 27.06.2025
© Мягконосов Д. С., Топникова Е. В., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИИ С ТРЕХФАЗНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ СВЕЖЕГО МОЛОКА ВОССТАНОВЛЕННЫМ СУХИМ МОЛОКОМ

Мягконосов Д. С.*, Топникова Е. В., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г.

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
молоко, сухое молоко, фальсификация, реакция Майяра, колориметрия

АННОТАЦИЯ

Авторами предложен метод раскрытия фальсификации натурального свежего молока добавлением сухого молока, основанный на количественной оценке содержания продуктов начальной стадии реакции Майара, являющихся специфическим индикатором присутствия сухого молока. Реализация метода предполагает выделение из молока препарата сухого, очищенного от лактозы казеина, последующую его тепловую обработку в строго контролируемых условиях. Эти условия включают поддержание влажности на уровне приблизительно 6% и температуры 100±1 °C в течение пяти часов. В процессе тепловой обработки происходит трансформация неокрашенных продуктов начальной стадии реакции Майара (лактозилированных аминогрупп аминокислот) в меланоиды, характеризующиеся интенсивной окраской. Интенсивность окраски меланоидов может быть измерена с использованием колориметра и представлена в координатах цветового пространства CIE $L^*a^*b^*$. Концентрация меланоидных пигментов может быть определена с применением как стандартного критерия общего цветового различия (ΔE), так и предлагаемого авторами комплексного критерия (KCh), который рассчитывается как соотношение значений Chroma и Hue. Критерий KCh демонстрирует более высокую точность в описании взаимосвязи между интенсивностью окрашивания образца и массовой долей белка сухого молока в смеси по сравнению со стандартным критерием ΔE. Разработанный колориметрический метод обеспечивает возможность выявления добавления сухого молока на уровне приблизительно 5 граммов на 1 литр свежего натурального молока.

Received 13.05.2025
Accepted in revised 24.06.2025
Accepted for publication 27.06.2025
© Myagkonosov D. S., Topnikova E. V., Abramov D. V., Kashnikova O. G., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

USE OF TRISTIMULUS REFLECTANCE COLORIMETRY FOR DETECTION OF FRESH MILK ADULTERATION WITH RECONSTITUTED DRY MILK

Dmitry S. Myagkonosov, Elena V. Topnikova, Dmitry V. Abramov, Olga G. Kashnikova

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEY WORDS:
milk, dry milk, adulteration, Maillard reaction, colorimetry

ABSTRACT

The authors propose a method for disclosing the adulteration of natural fresh milk by adding powdered milk, based on a quantitative assessment of the content of products of the initial stage of the Maillard reaction, which are a specific indicator of the presence of powdered milk. Implementation of the method involves isolation from milk of the preparation of dry, lactose-purified casein, followed by heat treatment under strictly controlled conditions. These conditions include maintaining a moisture level of approximately 6% and a temperature of 100±1 °C for five hours. In the process of heat treatment, the transformation of uncolored products of the initial stage of the Maillard reaction (lactosylated amino groups of amino acids) into melanoids characterized by intense coloration takes place. The color intensity of melanoids can be measured using a colorimeter and represented in color space coordinates CIE $L^*a^*b^*$. The concentration of melanoid pigments can be determined using both the standard criterion of total color difference (ΔE) and the complex criterion (KCh) proposed by the authors, which is calculated as the ratio of Chroma and Hue values. The criterion KCh demonstrates a higher accuracy in describing the relationship between the staining intensity of the sample and the mass fraction of milk powder protein in the mixture compared to the standard criterion ΔE. The developed colorimetric method makes it possible to detect the addition of dry powdered milk at the level of approximately 5 grams per 1 liter of fresh natural milk.

1. Введение

Фальсификация — это умышленное изменение состава продукта или придание продукту скрытых свойств, информация о которых является заведомо неполной или недостоверной. Добавление сухого молока к натуральному молоку или продажа восстановленного сухого молока под видом натурального, являются одними из наиболее распространенных форм фальсификации молочной продукции в мире [1,2]. Раскрытие фальсификации натурального и термически обработанного молока сухим представляет собой сложную аналитическую задачу ввиду сходства их состава, так и в следствии вариации химического состава термически обработанного молока из-за широкой вариации применяемых режимов тепловой обработки [3,4].

Для обнаружения фальсификации сухим молоком молочной продукции было разработано большое количество методов, базирующихся на разных физических принципах. Ссылки на указанные методы приведены, в частности, в работах [2,4–6].

К настоящему времени наиболее надежными признаны методы выявления фальсификации сухим молоком, основанные на оценке содержания фуросина [7]. Фуросин является производным от лактозилированного лизина — продукта начальной стадии реакции Майяра, образующегося в большом количестве в процессе высушивания молока [8].

Типичное содержание фуросина составляет:

- в сыром молоке — 4–10 мг/100 г белка [9–11];
- в пастеризованном молоке с низким уровнем тепловой нагрузки — 6–7 мг/100 г белка [9];

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Мягконосов, Д. С., Топникова, Е. В., Абрамов, Д. В., Кашникова, О. Г.** (2025). Использование колориметрии с трехфазным коэффициентом отражения для выявления фальсификации свежего молока восстановленным сухим молоком. *Пищевые системы*, 8(2), 296–305. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-296-305

FOR CITATION: **Myagkonosov, D. S., Topnikova, E. V., Abramov, D. V., Kashnikova, O. G.** (2025). Use of tristimulus reflectance colorimetry for detection of fresh milk adulteration with reconstituted dry milk. *Food Systems,* 8(2), 296–305. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-296-305

- в пастеризованном молоке с высоким уровнем тепловой нагрузки — 12–29 мг/100 г белка [12];
- в ультрапастеризованном (УВТ) молоке с обработкой косвенным методом нагрева — 100–250 мг/100 г белка [10,13];
- в сухом молоке — 50–300 мг/100 г белка (без хранения) и 270–700 мг/100 г белка (после 1–2 лет хранения при комнатной температуре) [9–11].

С 2005 года метод выявления фальсификации пастеризованного и УВТ молока с добавлением сухого молока по содержанию фурозина и лактулозы принят в КНР в качестве государственного стандарта [12]. В настоящее время действует новая редакция данного стандарта NY/T939-2016[1].

Регламентированная в указанном стандарте методика выявления фурозина с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и ультрафиолетового детектора (λ = 280 нм) требует тщательности проведения процедуры пробоподготовки, от которой зависит чувствительность и погрешность метода [14]. Были предприняты исследования по усовершенствованию методики. В частности, с целью повышения чувствительности и надежности ВЭЖХ-определения фурозина с применением УФ-детектора, Ho et al. [3] модифицировали процедуру твердофазной экстракции на стадии подготовки образцов молока к хроматографии. Это позволило увеличить на хроматограмме амплитуду пика фурозина, по которому проводится количественная оценка доли восстановленного молока в образце свежего.

Liu et al. [12] разработали усовершенствованную модификацию метода ВЭЖХ для выявления примеси сухого молока в термически обработанном питьевом молоке по содержанию фурозина, применив вместо используемого в стандартной методике NY/T939–2016 ультрафиолетового детектора, тандемный масс-спектрометрический детектор. Модифицированный метод имеет меньшую погрешность и позволяет выявлять наличие меньшей дозы сухого молока, чем стандартный метод.

Оценка, основанная на определении содержания фурозина, не всегда позволяет достоверно выявлять наличие сухого молока в пастеризованном и УВТ молоке ввиду значительной вариативности содержания в их составе продуктов реакции Майяра [6]. Это требует разработки других, более надежных методов для дифференциации термически обработанного натурального молока и восстановленного молока, ориентированных на использование большего количества химических индикаторов [4]. Современный подход к решению таких сложных аналитических задач, как выявление фальсификации пищевых продуктов, заключается в получении от исследуемого образца массива измерительных сигналов, с максимальной полнотой отражающих его сложный химический состав. Данные измерений обрабатываются методами хемометрики, включающими как классические приемы статистической обработки, так и процедуры добычи данных с помощью машинных алгоритмов [2].

В работе Tan et al. [4] для выявления биомаркеров, которые могут быть использованы для классификации ультрапастеризованного и восстановленного молока, был применен метод нецелевой метаболомики. Анализ метаболических профилей восстановленного и ультрапастеризованного молока проводился с использованием техники сверхпроизводительной жидкостной хроматографии, совмещенной с квадрупольной времяпролетной масс-спектрометрией (UPLC-Q-TOF-MS) или с тандемной масс-спектрометрией (UPLC-MS/MS). С помощью иерархического кластерного анализа было выделено три категории маркерных метаболитов (пептиды, липиды и нуклеиновые кислоты), отличающих восстановленное сухое молоко от ультрапастеризованного молока. В частности, в ультрапастеризованном молоке наблюдалось более высокое содержание витамина B5 и его производных, метаболитов нуклеиновых кислот (никотинамид, цитидин, аденозин), фосфолипидов и продуктов их распада, а также продуктов гидролиза белка (пептидов), в сравнении с восстановленным молоком.

Cui et al. [5] в своем исследовании применили подход нецелевой липидомики в сочетании с хемометрией для различения ультрапастеризованного и восстановленного молока с помощью сверхпроизводительной жидкостной хроматографии, совмещенной с квадрупольной масс-спектрометрией сверхвысокого разрешения с орбитальной ионной ловушкой (UPLC-Q-Exactive Orbitrap). Пятнадцать липидов были идентифицированы и выбраны в качестве биомаркеров для различения ультрапастеризованного и восстановленного молока. Содержание одних из этих веществ было выше в ультрапастеризованном молоке, а других — в восстановленном. В соответствии с выбранными биомаркерами липидного происхождения была создана дискриминантная модель, обеспечивающая надежное дифференцирование ультрапастеризованного и восстановленного молока.

Нецелевой пептидомический подход, основанный многомерном анализе данных, был применен в работе Tan et al. [15] для выявления пептидов, потенциально позволяющих отличать ультрапастеризованное молоко от восстановленного. Анализ состава образцов проводился с использованием сверхпроизводительной жидкостной хроматографии, совмещенной с квадрупольной времяпролетной масс-спектрометрией (UPLC-Q–TOF-MS). Пептидные профили восстановленного и ультрапастеризованного молока существенно различались. Из установленных 1352 метаболитов (массой 50–2000 Да) были идентифицированы тридцать три маркерных пептида, содержание которых существенно различалось в ультрапастеризованном и восстановленном молоке. В основном пептиды имели происхождение от C- и N- терминальных групп казеина. Ключевыми факторами, приводящими к образованию пептидов, были тепловая нагрузка при производстве или гидролиз белков нативной протеазой молока.

Du et al. [16] создали чувствительный и надежный подход для обнаружения фальсификации сухим молоком натурального молока путем анализа профилей измерительных сигналов интактного белка и пептидов, полученных при гидролизе с помощью трипсина. Анализ состава образцов проводился с использованием сверхэффективной жидкостной хроматографии с квадрупольным времяпролетным масс-спектрометром (UPLC-QTOF-MS). Две базы данных по профилям сигналов интактных белков и пептидов были объединены и обработаны при помощи метода анализа основных компонентов (PCA). Были обнаружены и предварительно идентифицированы некоторые репрезентативные белковые вещества, которые могут быть использованы в качестве маркеров для различения восстановленного сухого молока и натурального молока, в частности, гликозилированный полипептид, образованный из α-лактальбумина. Результаты показали, что объединение данных позволяет достигнуть высокой чувствительности анализа и отличать фальсифицированное молоко с очень низким уровнем содержания сухого молока от натурального цельного молока. Предел обнаружения сухого молока в натуральном молоке составлял 0,5 % (от общего содержания белка).

Методы с применением жидкостной хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией высокой разрешающей способности (ВЭЖХ–МС), позволяют идентифицировать большое количество метаболитов и проводить измерение их концентрации. Вместе с тем эти методы сопряжены со сложной предварительной подготовкой образцов, требующей много времени и большего расхода органических растворителей. Методы инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR), спектроскопии среднего ИК-диапазона (MIR), рамановской спектрометрии и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) позволяют получать объемы аналитических данных, сопоставимые с ВЭЖХ–МС, но при этом не требуют сложной предварительной подготовки образцов и отличаются меньшей продолжительностью анализа [6,17].

В исследовании Cui et al. [6] для определения биомаркеров, позволяющих дифференцировать ультрапастеризованное молоко от восстановленного молока, был использован метод ЯМР-анализа метаболитов в сочетании с хемометрией. В ультрапастеризованном и восстановленном молоке было идентифицировано одиннадцать соединений, содержание которых различалось между указанными типами молока. Обработка данных с помощью анализа основных компонентов (PCA) и с помощью дискриминантного анализа методом частичных наименьших квадратов (PLS-DA) позволила выявить три биомаркера (L-карнитин, янтарная и уксусная кислоты), по содержанию которых можно провести дифференциацию образцов ультрапастеризованного и восстановленного молока.

В исследовании Du [17] для определения фальсификации свежего натурального молока сухим молоком при помощи ИК-спектроскопии с уменьшенной полной отражательной способностью и преобразованием Фурье (ATR-FTIR) был проведен анализ полного спектра и трех его отдельных областей (1800–580 $см^{-1}$, 3700–2700 $см^{-1}$ и 1800–580 $см^{-1}$ + 3700–2700 $см^{-1}$). Полученные спектральные данные были использованы для обучения машинного алгоритма. С помощью дискриминантного анализа методом частичных наименьших квадратов (PLS-DA) и обработки алгоритмом опорных векторов (SVM) набора данных в области спектра 1800–580 $см^{-1}$ удалось получить быструю и надежную идентификацию фальсифицированного молока. К достоинствам разработанного метода относятся короткое время анализа и отсутствие этапа подготовки пробы.

[1] NY/T939-2016. (2016). Agricultural industry standards of the People's Republic of China. Identification of reconstituted Milk in pasteurized and UHT milk. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China.

Chu et al. [18] применили ИК-спектроскопию с преобразованием Фурье (FTIR) и новейшие статистические алгоритмы машинного обучения для качественной идентификации посторонних веществ в составе натурального молока и количественной оценки их содержания. Результаты исследования показали, что применение современных нелинейных алгоритмов статистического машинного обучения повышает эффективность FTIR-спектроскопии при прогнозировании фальсификации молока. Это дало лучшие результаты по сравнению с традиционной обработкой данных методом частичных наименьших квадратов (PLS). Для качественного определения типов веществ, используемых для фальсификации молока, была разработана высокоэффективная мультиклассификационная модель с использованием алгоритма многослойного персептрона (MLP), обеспечивающая высокую точность прогнозирования — 97,4 %. Наилучшие результаты для целей количественного определения содержания примесей меламина, мочевины и сухого молока показали байесовские регуляризованные нейронные сети (BRNN). Разработанные в этой работе предсказательные модели могут быть интегрированы в состав программного обеспечения портативных ИК-спектрометров для проверок на фермах и выборочных проверок регулирующими органами, что позволит проводить более масштабные испытания молока на безопасность.

Nikolaou et al. [2] разработали вольтамперометрический метод для выявления фальсификации натурального молока сухим молоком. Метод основан на получении окислительно-восстановительного профиля образца при помощи циклической вольтамперометрии с использованием гибридного графит-силиконового электрода. Образцы свежего молока при сканировании как с прямым, так и с обратным потенциалом показали на вольтамперограммах увеличенные пропорции «пик/плато», что в основном было связано с наличием в их составе природных оксидаз. Подобные пики отсутствовали в образцах восстановленного сухого обезжиренного молока из-за инактивации ферментов и распада некоторых антиоксидантов, вызванного тепловой обработкой. Метод контролируемой классификации данных (SIMCA) был использован для моделирования класса «свежее молоко» с предварительным обучением на наборе из 12 образцов свежего молока. Прогнозирование случаев фальсификации свежего молока сухим восстановленным обезжиренным молоком было выполнено с помощью регрессионного анализа методом частичных наименьших квадратов (PLS). Разработанный вольтамперометрический метод имеет предел обнаружения 6 % и позволяет отличать образцы свежего молока от образцов, фальсифицированных восстановленным сухим молоком. Недостатком метода можно считать сложную процедуру изготовления и контроля качества электролитической ячейки, которую можно выполнить только в специально оборудованной лаборатории.

Jin et al. [19] разработан нецелевой метод обнаружения фальсификации молочных продуктов, основанный на обработке данных, полученных с помощью радиоизотопного анализа, методами хемометрики. Методами радиоизотопного анализа было определено содержание стабильных изотопов водорода (δ2H), углерода (δ13C), азота (δ15N) и кислорода (δ18O) в 232 образцах сухого молока и в 88 образцах свежего молока, собранных по всему миру. Полученный массив данных был обработан методами принципиального анализа компонентов (PCA), линейного дискриминантного анализа (LDA), а также использован для обучения нейронных сетей (ANN) для определения критериев отличия свежего молока от восстановленного. С помощью оценки содержания стабильных изотопов углерода, азота, водорода и кислорода в сочетании с хемометрическими методами удалось идентифицировать восстановленное молоко и свежее молоко с точностью до 99,6 %.

Описанные выше методы — ВЭЖХ–МС, инфракрасная спектроскопия, ядерный магнитный резонанс, радиоизотопный и вольтамперометрический анализ — в сочетании с продвинутыми статистическими методами обработки эффективно решают поставленную задачу. Вместе с тем указанные методы требуют использования сложного дорогостоящего измерительного оборудования и привлечения высококвалифицированного персонала, что ограничивает возможность их широкого внедрения.

Целью настоящего исследования является разработка метода, предназначенного для раскрытия фальсификации сухим молоком свежего натурального молока. Колориметрический метод, предлагаемый авторами, представляет собой модификацию метода оценки интенсивности пастеризации молока, описанного в нашей работе [20]. Метод прост в реализации и не требует применения сложного и дорогостоящего оборудования.

2. Объекты и методы

2.1. Материалы

В работе были использованы образцы сборного сырого молока (8 образов от одного поставщика-производителя — ООО «АгриВолга» (Ярославская область, Угличский район, д. Головино)), 5 образцов от разных производителей (Московская область, Дмитровский район), а также 2 индивидуальных образца от отдельных коров, всего 15 образцов сырого молока.

Были использованы 4 образца сухого обезжиренного молока и 4 образца сухого цельного молока от 8 разных производителей.

Исследование проводили на смесях натурального сырого обезжиренного молока с восстановленным сухим молоком (ВСМ), составленных по плану эксперимента, приведенному в Таблице 1. Для приготовления восстановленного сухого молока, сухое обезжиренное молоко (в количестве 10 г на 100 см^3 смеси) или сухое цельное молоко (14 г на 100 см^3 смеси) растворяли в деионизированной воде комнатной температуры и далее выдерживали в холодильнике при температуре 5 °C в течение ночи для полного растворения. Восстановленное цельное сухое молоко, перед смешиванием с натуральным молоком обезжиривали на центрифуге ЦЛн–16 (Changsha Xiangzhi Centrifuge Instrument Co., Ltd., КНР) при 10 000 об/мин в течение 10 мин.

Таблица 1. **План эксперимента**

Table 1. **Experiment plan**

Вариант	Массовая доля ВСМ в смеси, %	Масса ВСМ, г	Масса свежего обезжиренного молока, г
1	0	0	80
2	5	4	76
3	10	8	72
4	25	20	60
5	50	40	40
6	100	80	0

Составленные согласно плану эксперимента молочные смеси использовали для получения очищенных от лактозы препаратов казеина.

2.2. Методы

2.2.1. Методы исследования фракции белков молока

Массовую долю общего белка в молоке определяли методом Кьельдаля по ГОСТ 23327-1998[2].

2.2.2. Приготовление очищенных от лактозы препаратов казеина

Из составленных согласно плану эксперимента молочных смесей получали очищенные от лактозы препараты казеина. Для этого сначала выделяли казеин из молока: 40 см^3 молока переносили в центрифужную пробирку объемом 50 см^3, добавляли 4 см^3 10 %-ной уксусной кислоты, перемешивали, выдерживали 10 мин для формирования хлопьев белка и центрифугировали на центрифуге ЦЛн–16 (Changsha Xiangzhi Centrifuge Instrument Co., Ltd., КНР) при 5 000 об/мин в течение 5 мин. Надосадочную жидкость сливали, а казеиновый осадок промывали деионизированной водой. Для этого в стакан с осадком добавляли воду, доводя массу содержимого центрифужной пробирки до 35,0 ± 0,1 г. Содержимое пробирки гомогенизировали на диспергаторе ULTRA-TURRAX T 18 digital (IKA, Германия) при 15 000 об/мин в течение 0,5–1 мин. Массу стакана с содержимым доводили до 55,0 ± 0,1 г, перемешивали, и центрифугировали на центрифуге ЦЛн–16 (Changsha Xiangzhi Centrifuge Instrument Co., Ltd., КНР) при 5 000 об/мин в течение 5 мин. Надосадок отбрасывали. Проводили пять циклов промывания. Получали очищенный от свободной лактозы казеиновый сгусток.

Промытый казеиновый сгусток нарезали ножом на части размером не более 3 × 10 мм, после чего измельчали, продавливая через сито из проволочной сетки 14 Mesh (размер ячейки — 1,43 × 1,43 мм). Частицы измельченного сгустка высушивали на открытых чашках Петри под тягой при комнатной температуре в течение 2,5 ч с периодическим перемешиванием. Получали очищенный от свободной лактозы сухой препарат казеина. Массовая доля влаги в препаратах варьировала в пределах 6,15 ± 0,71 %.

[2] ГОСТ 23327-98. Молоко и молочные продукты. Метод измерения массовой доли общего азота по Кьельдалю и определение массовой доли белка. М.: Стандартинформ, 2009. — 8 с.

2.2.3. Контроль эффективности промывания казеинового осадка от лактозы

Эффективность промывания казеинового осадка от свободной лактозы оценивали косвенно, по содержанию в промывных водах белковых веществ, растворимых в 2,5 %-м растворе трихлоруксусной кислоты (ТХУ). Для этого в центрифужный стакан на 50 см^3 помещали образец промывной воды в количестве 12 см^3, к которой добавляли 0,8 см^3 раствора ТХУ концентрацией 40 % (вес/вес), для получения концентрации ТХУ в растворе 2,5 %.

Смесь перемешивали на вортексе VX–MT (Xiamen Branch Tongxin Biomedical Technology Co., Ltd., КНР), после чего выдерживали в состоянии покоя в течение 10–15 мин для формирования хлопьев белка. Продолжительность выдерживания была установлена авторами в предыдущем исследовании [21]. Далее образцы центрифугировали на центрифуге ЦЛн–16 (Changsha Xiangzhi Centrifuge Instrument Co., Ltd., КНР) при 10 000 об/мин в течение 10 мин. Надосадок фильтровали на фильтрах из нейлона с размером пор 0,45 мкм (Tianjin Jinteng Experiment Equipment Co., ltd, КНР).

Содержание белковых веществ в пробе проводили спектрофотометрическим методом по величине поглощения на длинах волн 280 и 320 нм [22]. Оптическую плотность образцов измеряли в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 10 мм на спектрофотометре РВ2201 (ЗАО «Спектроскопия, оптика и лазеры — авангардные разработки», Республика Беларусь).

Количество промываний считается достаточным, если в осветленном с помощью ТХУ фильтрате из промывной воды величина поглощения (Abs280–Abs320) < 0,1, где Abs280 и Abs320 — оптическая плотность фильтрата на длинах волн 280 и 320 нм соответственно.

2.2.4. Процесс тепловой обработки препаратов казеина

Перед тепловой обработкой высушенные препараты промытого от свободной лактозы казеина упаковывали на машине Henkelman Boxer 42 (Henkelman Vacuum Systems, Нидерланды) под вакуумом (отрицательное давление 1 Бар; продолжительность вакуумирования 20 с) в пакеты из кэшированной фольги толщиной 200 мкм (Hefei Tao Lai Tao to E-commerce Co., Ltd, КНР). Герметичная упаковка была необходима для предотвращения выпаривания влаги из препаратов казеина.

Тепловую обработку препаратов казеина проводили в нагревательном электрошкафе марки СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И5М («НПФ Термикс», Россия) при поддержании температуры на уровне 101 ± 1 °С в течение 5 ч. Необходимая температура и продолжительность тепловой обработки была установлена в предыдущей работе авторов [20].

2.2.5. Методы исследования окрашивания

Измерение интенсивности окрашивания препаратов казеина проводили в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$ [23] при помощи колориметра модели NR20XE (Shenzhen Threenh Technology Co., Ltd., КНР) с оптической геометрией сенсора 45°/0° (где 45° — угол осветителя относительно образца; 0° — угол сенсора относительно образца), апертурой измерения 20 мм и стандартом освещения D65 («искусственный солнечный свет»). Для измерения окрашивания порошок препарата казеина помещали в измерительную приставку из комплекта для измерителя белизны WSB–1 (JVLAB, КНР), имеющую геометрию кюветы для образца: диаметр 21 мм, глубина 4 мм. Порошок выравнивали при помощи шпателя. Проводили 5 последовательных измерений, из которых отбирали 3 результата, дающих наименьшую сумму стандартных отклонений для L^*, a^*, b^*. Результат измерений вычисляли как среднее значение по трем отобранным результатам измерений.

Величину общего цветового отличия ΔE_{ab} в соответствии со стандартом CIE1976 [23] рассчитывали по формуле:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}, \quad (1)$$

где $\Delta L^*=L_1^* - L_0^*$; $\Delta a^*=a_1^* - a_0^*$; $\Delta b^*=b_1^* - b_0^*$; L_0^*, a_0^*, b_0^* — показатели стандартного образца сравнения; L_1^*, a_1^*, b_1^* — показатели исследуемого образца.

В качестве стандартного образца сравнения использовали препараты казеинов до тепловой обработки, в качестве исследуемого образца применяли препараты казеинов после тепловой обработки.

Уровни цветовых показателей, характеризующих оттенок и насыщенность цвета, определяли по адаптированной цветовой шкале CIE $L^*C^*h^*$, отложенной на полярных координатах, по формулам:

$$h_{ab} = \left(\frac{b^*}{a^*}\right), \quad (2)$$

где h_{ab} — цветовой угол (hue angle), рад;

$$C^*_{ab} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}, \quad (3)$$

где C^*_{ab} — насыщенность цвета (chroma).

2.2.6. Методы статистического анализа

Математическая обработка данных осуществлялась с применением программных пакетов Microsoft Excel и Statsoft Statistica (v. 5.5). Оценку влияния фактора «массовая доля ВСМ» на переменные отклика проводили методами дисперсионного, кластерного и регрессионного анализа. Оценку достоверности отличий по окрашиванию между вариантами препаратов казеина, проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа методом парных сравнений Тьюки. Достоверность отличий между факторами принималась при уровне статистической значимости $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Формирование окрашивания

В процессе высушивания молока происходит интенсивное развитие реакции Майяра, на ранней стадии которой формируются лактозилированные группы аминокислот. Их содержание может быть использовано в качестве маркерного признака отличия восстановленного сухого молока от свежего и термически обработанного натурального молока [8].

Физический принцип описываемого в настоящей работе метода основан на оценке содержания лактозилированных аминокислот в исследуемом образце молока колориметрическим методом. Для этого из исследуемого образца молока выделяют препарат казеина и подвергают его тепловой обработке, для преобразования содержащихся в нем продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированные аминокислоты), которые не имеют цвета, в продукты финальной стадии реакции Майяра (меланоиды), имеющие интенсивное окрашивание. Получаемая интенсивность окрашивания препарата пропорциональна концентрации меланоидов, которая, в свою очередь, пропорциональна концентрации прекурсоров реакции — лактозилированных аминокислот. Перед тепловой обработкой препарат казеина очищают от свободной лактозы. Очистка казеина от свободной лактозы позволяет избежать формирования новых лактозилированных групп аминокислот и провести реакцию формирования меланоидов только из лактозилированных аминокислот, образовавшихся в процессе производства сухого молока. Авторы подтвердили возможность применения аналогичного подхода для оценки содержания продуктов ранней стадии реакции Майяра при разработке колориметрического метода определения интенсивности пастеризации молока [20]. Указанный метод был модифицирован в целях повышения интенсивности окрашивания образцов за счет оптимизации условий реакции формирования меланоидов.

Исследования указывают на сильное влияние концентрации воды в реакционной среде на формирование меланоидов в течение финальной стадии реакции Майяра [24,25]. Неферментативное побурение (формирование меланоидов) является реакцией, ограничиваемой скоростью диффузии (diffusion-limited reaction). Вода выступает в роли растворителя и переносчика прекурсоров реакции. При низком содержании воды происходит снижение скорости диффузии реагирующих молекул, что ведет к замедлению реакции Майяра вплоть до полной остановки [26]. В целях сохранения влаги в препаратах казеина их герметично запечатывали в пакеты из фольги, после чего подвергали тепловой обработке в соответствии с процедурой, описанной в разделе 2.2.4, для формирования меланоидов.

3.2. Визуальная оценка интенсивности окрашивания

Были исследованы показатели окрашивания препаратов казеина, приготовленных в соответствии с планом эксперимента (Таблица 1) из молочных смесей с разной массовой долей восстановленного сухого молока.

Внешний вид образцов препаратов казеина, полученных из молочных смесей с разной массовой долей ВСМ (далее, по тексту, в сокращенной форме — «образцов с разной м. д. ВСМ»), до и после тепловой обработки представлен на Рисунке 1.

При оценке внешнего вида препаратов казеина, представленных на Рисунке 1, видно, что влияние м. д. ВСМ в смеси на интенсивность окрашивания препарата казеина проявляется еще до тепловой обработки. Препараты, изготовленные из молочных смесей с м. д. ВСМ 50 и 100 %, имеют более выраженное желто-бурое окрашивание в сравнении с препаратами, изготовленными из смесей с более низкой м. д. ВСМ. Это связано с тем, что протекающая в сухом молоке при его изготовлении и хранении реакция Майяра приводит к формированию меланоидов, имеющих бурую окраску [7,27]. Однако

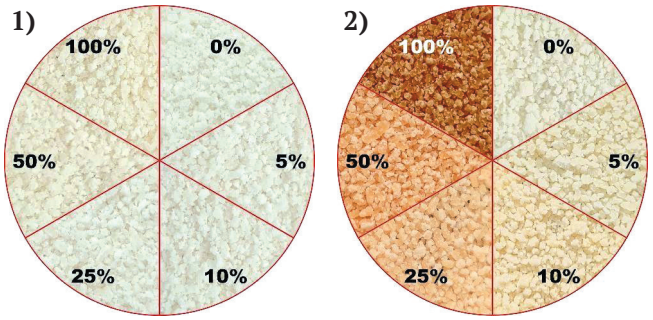


Рисунок 1. **Внешний вид препаратов казеина, полученных из молочных смесей с разной м. д. ВСМ: 1) до тепловой обработки; 2) после тепловой обработки. Внутри секторов указана м. д. ВСМ в смеси в процентах**

Figure 1. **Appearance of the casein preparations obtained from milk mixtures with different mass fraction of reconstituted dry milk (RDM) 1) before heat treatment; 2) after heat treatment. The mass fraction of RDM in the mixture is indicated in percent inside the sectors**

формирующееся в сухом молоке количество меланоидов не высоко, поскольку лимитированное температурное воздействие на стадии производства и хранения ограничивают развитие реакции Майяра. В сухом молоке большая часть продуктов реакции Майяра представлена продуктами начальной и отчасти продвинутой стадии данной реакции, которые не имеют окрашивания [8,27].

В процессе тепловой обработки происходит преобразование продуктов начальной и промежуточной стадии реакции Майяра в продукты завершающей стадии реакции гликирования (advanced glycated end products — AGE). Далее, через реакцию полимеризации AGE превращаются в меланоиды — вещества с высоким молекулярным весом, имеющие выраженное красно-бурое окрашивание [7,24]. Интенсивность окрашивания определяется концентрацией меланоидов, а количество формирующихся меланоидов зависит от концентрации прекурсоров реакции [24,25]. На Рисунке 1.2 видно, что интенсивность окрашивания препаратов казеина после тепловой обработки пропорциональна м. д. ВСМ в молочной смеси — чем выше м. д. ВСМ, тем темнее окраска.

Использование визуальной оценки интенсивности окрашивания не позволяет проводить точную оценку содержания примеси сухого молока в исследуемом образце. Поэтому на следующих этапах исследований проводили оценку уровней окрашивания с помощью колориметра.

3.3. Колориметрическая оценка интенсивности окрашивания по критерию общего цветового отличия

Показатели окрашивания образцов были измерены с помощью колориметра в значениях цветовых координат CIE $L^*a^*b^*$. Измеренные значения цветовых координат L^*, a^*, b^* в отдельности не могут быть использованы для характеристики цвета объекта или оценки величины различий в цвете разных объектов. Для характеристики изменения окрашивания препаратов казеина под действием тепловой обработки были рассчитаны изменения в уровне цветовых координат ΔL^*, Δa^*, Δb^* и показатель общего цветового отличия ΔE_{ab}.

На Рисунке 2 показано влияние доли ВСМ в молочной смеси на изменение отдельных цветовых координат (ΔL^*, Δa^*, Δb^*) и величины общего цветового отличия ΔE_{ab} в препаратах казеинов под действием тепловой обработки.

Из приведенных на Рисунке 2 графиков видно, что имеет место нелинейная зависимость между значениями ΔE_{ab} для препаратов казеинов и м. д. ВСМ в молочной смеси. Причина состоит в разной реакции индексов ΔL^*, Δa^*, Δb^* на рост концентрации ВСМ и, связанное с этим, повышение концентрации меланоидов. Снижающееся значение индекса ΔL^* указывает на потемнение препаратов при повышении м. д. ВСМ в смеси. Индекс ΔL^* показывает практически линейную зависимость от дозы ВСМ, однако из-за значительной вариации данного индекса отсутствуют статистически достоверные отличия по ΔL^* между образцами натурального молока и образцами с добавлением 5 % и 10 % ВСМ ($p < 0{,}05$; тест Тьюки). Индекс Δa^*, указывающий на повышение интенсивности красного оттенка, линейно возрастает при повышении концентрации ВСМ до 25 %, после чего рост индекса несколько замедляется. Индекс Δb^*, указывающий на повышение интенсивности желтого оттенка, реагирует резким ростом на увеличение дозы ВСМ до 25 % включительно, после чего данный показатель практически не реагирует на повышение дозы ВСМ. Подобное поведение ΔL^*, Δa^*, Δb^* приводит к получению нелинейной зависимости рассчитываемого на основе данных индексов индекса ΔE_{ab} от дозы ВСМ.

Полученные данные по изменению индексов ΔL^*, Δa^*, Δb^* (Рисунок 2) совпадают с данными Roux et al. [28], исследовавших формирование продуктов реакции Майяра в модельных смесях для детского питания в процессе высокотемпературной обработки. В указанной работе было установлено, что при повышении интенсивности тепловой обработки происходило повышение содержания продуктов реакции Майяра, сопровождавшееся изменением значений по цветовым координатам L^*, a^*, b^*. Светлота L^* снижалась, происходило потемнение образцов, a^* и b^* возрастали, оттенок цвета образцов становился более красным и желтым. Результатом такого совместного изменения значений L^*, a^* и b^* было формирование бурого цвета.

Roux et al. [28] отмечали линейное изменение индексов ΔL^*, Δa^* и Δb^* от температуры и продолжительности теплового воздействия и связанной с этим скоростью реакции Майяра. В их исследовании линейные изменения ΔL^*, Δa^* и Δb^* наблюдались в диапазонах: ΔL^* — от 0 до минус 10, Δa^* — от 0 до 3, Δb^* — от минус 2 до 10. Аналогичная линейная зависимость этих индексов от массовой доли ВСМ в молочной смеси отмечается и в нашем исследовании (Рисунки 2.1–2.3).

Roider et al. [29] в своих исследованиях по влиянию температуры и продолжительности тепловой обработки на реологические характеристики и скорость реакции Майяра в белом шоколаде выявили возникновение сигмовидного характера зависимости ΔE_{ab} при высоком содержании меланоидов, когда значение ΔE_{ab} превышало 30. Это совпадает с результатами наших исследований. На графике, приведенном на Рисунке 2.4, видно, что при дозах внесения ВСМ выше 25 % и связанным с этим повышением концентрации меланоидных пигментов происходит сигмовидный загиб зависимости ΔE_{ab}.

Нелинейный характер зависимости индексов ΔL^*, Δa^* и Δb^* от интенсивности окрашивания связан с нелинейным масштабом осей цветового пространства CIE $L^*a^*b^*$. Разрешающая способность по осям L^*, a^*, b^* соответствует чувствительности глаза человека к различению отдельных цветов [30,31]. Глаз человека наиболее чувствителен и лучше всего различает цвета в области участка спектра около 560 нм, что лежит на границе между зеленым и желтым цветом [30]. По этой причине мы не вооруженным глазом способны различить образцы казеина из натурального молока и из молока с добавлением 5 % ВСМ (Рисунок 1.2), которые наиболее сильно различаются по интенсивности желтого цвета, т. е. по величине показателя b^* (Рисунок 2). Колориметр, дающий результаты измерений в величинах цветовых координат CIE $L^*a^*b^*$, т. е. адаптированный под цветовое восприятие человека, обладает высокой разрешающей способностью при низких уровнях a^* и b^* и позволяет обнаруживать различия в цвете между образцами без добавления и с добавлением 5 % ВСМ.

В цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$ критерий общее цветовое отличие ΔE_{ab} дает в виде одной цифры меру отличия между двумя объектами, имеющими разный цвет. На практике критерий ΔE_{ab} применяется при промышленном контроле цвета красок, тканей, пластмасс, строительных материалов и т. п. изделий, для установления допустимого предела отклонения цвета от нормируемых значений и выявления брака [31]. Недостатком критерия ΔE_{ab} является то, что он выражает только величину различия, но не качественное различие сравниваемых цветов. Одинаковые различия по ΔE_{ab} между двумя цветами не будут равнозначны визуальным различиям между этими цветами. Это является серьезным ограничением при измерении цвета пищевых продуктов, поскольку интерес представляет не только то, как сильно цвет пищевых продуктов отклоняется от стандарта, но и в какую сторону он изменяется в процессе обработки и хранения [32].

3.4. Колориметрическая оценка интенсивности окрашивания по критериям насыщенности и оттенка цвета

При необходимости детального сравнения цветов CIE рекомендует использовать адаптированную цветовую шкалу CIE $L^*C^*h^*$, по которой цвет измеряется в координатах L^* («светлота»), C^*_{ab} (Chroma, «насыщенность цвета») и h_{ab} (Hue, «оттенок цвета»). В этой системе координат Hue = 0° соответствует красному цвету, Hue = 90° — желтому цвету, Hue = 180° — зеленому, а Hue = 270° — синему цвету. Цветовая модель CIE $L^*C^*h^*$ имеет физический смысл, связанный с зависимостью цвета от концентрации пигмента. Повышение концентрации пигмента до определенного предела приводит к повышению насыщенности цвета (Chroma). Дальнейшее повышение концентрации пигмента сопровождается стабилизацией или даже снижением уровня Chroma. Вместо этого происходит потемнение образца, выражающееся в снижении показателя L^* [32]. Потемнение, вместо ожидаемого повышения насыщенности цвета, происходит из-за особенностей зрения человека и происходящих из этого ограничений, накладываемых на границы варьирования цветовых

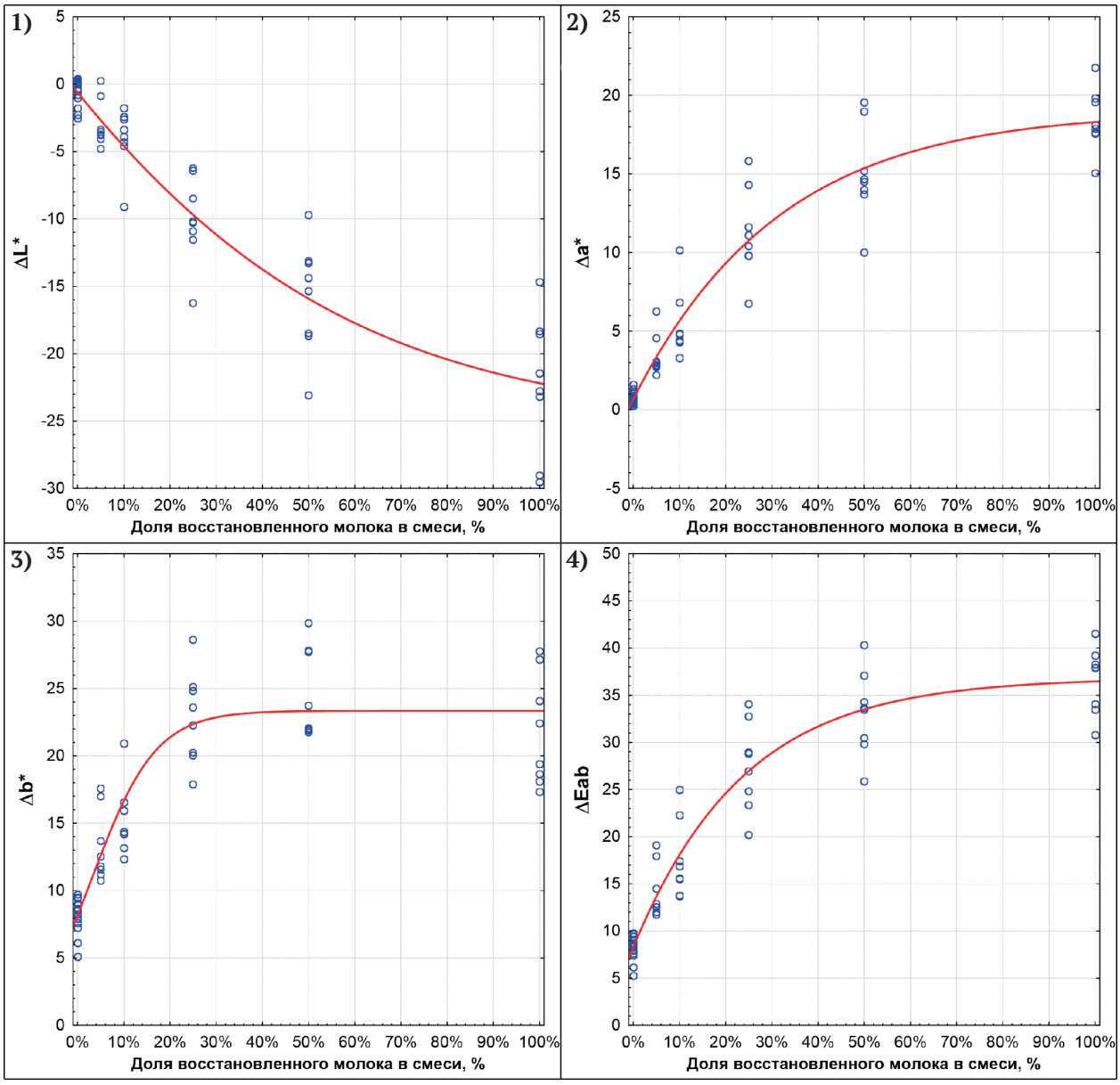


Рисунок 2. **Зависимость изменения отдельных цветовых индексов (ΔL^*, Δa^*, Δb^*) и общего цветового отличия ΔE_{ab} для препаратов казеинов до и после тепловой обработки в зависимости от доли ВСМ в молочной смеси**

Figure 2. **Dependence of changes in certain color indices (ΔL^*, Δa^*, Δb^*) and total color difference ΔE_{ab} for the casein preparations before and after heat treatment depending on the fraction of RDM in the milk mixture**

показателей L^*, a^*, b^* (и рассчитываемых от них ΔE, C^*_{ab} и h_{ab}) в цветовом пространстве CIE L*a*b*, где не все сочетания координат L^*, a^*, b^* возможны [21].

Наибольший практический интерес и наибольшую трудность представляет дифференциация образцов с м. д. ВСМ, равной 0 %, 5 % и 10 %, которые содержат малое количество меланоидных пигментов и слабо различаются между собой. Поскольку между указанными образцами отсутствовали статистически достоверные различия по величине L^* ($p > 0{,}1$, тест Тьюки), сравнение для данных образцов по шкале CIE $L^*C^*h^*$ достаточно будет проводить только по критериям C^*_{ab} и h_{ab}.

Значения цветового угла h_{ab} и насыщенности цвета C^*_{ab} для исследованных образцов с разной м. д. ВСМ после выдерживания при 100 °C в течение 5 ч были вычислены в соответствии со стандартом CIE по формулам (2) и (3). Положение точек, соответствующих образцам с разной м. д. ВСМ на полярных координатах C^*_{ab} и h_{ab}, приведено на Рисунке 3.

Из приведенного на Рисунке 3 графика видно, что выбранные для сравнения образцы хорошо дифференцируются в полярных цветовых координатах по величине C^*_{ab} и h_{ab}.

Математическое доказательство возможности дифференциации образцов с м. д. ВСМ, равной 0 %, 5 % и 10 %, по уровням критериев C^*_{ab} и h_{ab} можно выполнить методом кластерного анализа. Кластерный анализ служит инструментом для разбиения множества исследуемых объектов на однородные группы (кластеры) по набору признаков,

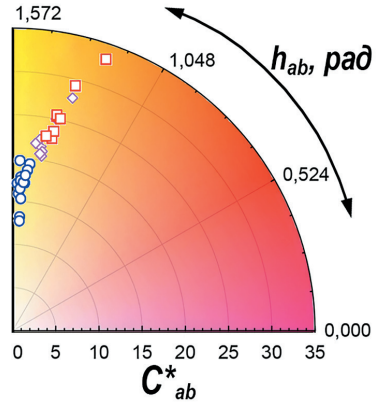


Рисунок 3. **Зависимость цветового угла h_{ab} и насыщенности цвета C^*_{ab} для препаратов казеинов после тепловой обработки в зависимости от м. д. ВСМ в молочной смеси: ○ — 0 % ВСМ (натуральное молоко); ◊ — 5 % ВСМ; □ — 10 % ВСМ**

Figure 3. **Dependence of hue angle h_{ab} and chroma C^*_{ab} for the casein preparations after heat treatment depending on the mass fraction of RDM in the milk mixture: ○ — 0 % RDM (natural milk); ◊ — 5 % RDM; □ — 10 % RDM**

имеющих наибольшее сходство [33]. Выделение из группы образцов с м. д. ВСМ равной 0%, 5% и 10% на основании критериев C^*_{ab} и h_{ab} отдельного кластера, состоящего только из образцов с м. д. 0% ВСМ, будет свидетельствовать о достаточности использования пары данных критериев для дифференциации натурального и восстановленного молока.

В работе Benedetti et al. [34] иерархический метод кластерного анализа был использован для классификации сыров по степени зрелости с использованием набора признаков, включающего цвет сырного теста, выраженный в величине цветового угла (Hue). В нашей работе разделение на кластеры проводилось способом, описанным в работе Benedetti et al. [34]: расстояния между объектами в пространстве параметров рассчитывались по величине квадрата Евклидова расстояния, объединение образцов в кластеры проводилось по методу Уорда.

Диаграмма иерархической классификации образцов с разной м. д. ВСМ по критериям цветового окрашивания C^*_{ab} и h_{ab} приведена на Рисунке 4.

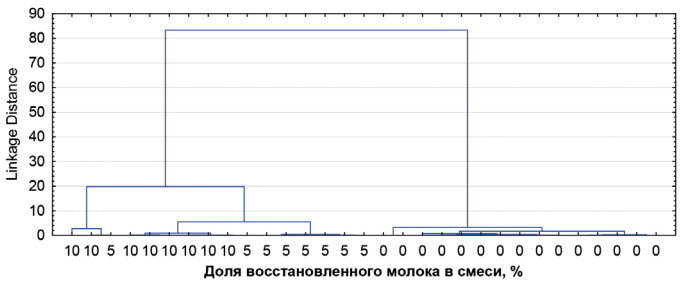


Рисунок 4. **Древовидная диаграмма кластерного анализа для образцов с разной м. д. ВСМ**

Примечание: Linkage distance — расстояние между объектами в пространстве параметров.

Figure 4. **Tree diagram of the cluster analysis for the samples with different mass fraction of RDM**

Note: Linkage distance — is the distance between objects in the space of parameters.

Из представленной на Рисунке 4 диаграммы видно, что разделение образцов на кластер, содержащий образцы с 0% ВСМ, и кластер, содержащий образцы с 5% и 10% ВСМ, происходит на самом верхнем уровне иерархии дерева классификации. Это свидетельствует о значительном сходстве между входящими в кластеры образцами и значительном различии кластеров между собой. Следовательно, кластерный анализ с использованием указанных выше критериев для объединения позволяет достоверно подтвердить дифференциацию образцов по уровню цветовых координат C^*_{ab} и h_{ab} на 2 однородные группы (кластера) — натуральное молоко и смеси с добавлением ВСМ.

3.5. Введение комплексного критерия оценки интенсивности окрашивания для повышения степени дифференциации образцов с разной м. д. ВСМ

Для разрабатываемого метода измерений желательно использование единого критерия для дифференциации между образцами натурального молока и образцами с добавлением ВСМ. Отдельными исследователями предложены собственные критерии оценки цвета пищевых продуктов, рассчитываемые на основе стандартных критериев цветового пространства CIE: L^*, a^*, b^*, C^*_{ab} (Chroma) и h_{ab} (Hue). Признаком пригодности подобных критериев для практического использования служит наличие их более высокой корреляции с физико-химическими, органолептическими и иными показателями исследуемых продуктов в сравнении со стандартными критериями оценки цвета [35].

Для оценки интенсивности окрашивания образцов с разной м. д. ВСМ возможно введение комплексного показателя K_{Ch}, рассчитываемого по формуле:

$$K_{Ch} = C^*_{ab}/h_{ab}. \quad (4)$$

Предлагаемый комплексный показатель K_{Ch} (так же, как общее цветовое отличие ΔE) дает оценку цвета образца в виде одной цифры, но имеет ряд преимуществ над ним.

Соотношение C^*_{ab}/h_{ab} связано с физической природой образцов. Низкая концентрация меланоидных пигментов в образцах без добавления ВСМ приводит к окрашиванию их в желтый цвет низкой насыщенности. Высокая концентрация меланоидных пигментов в образцах, содержащих ВСМ, придает им интенсивный бурый цвет (Рисунок 1). Поэтому для образцов натурального молока без добавления ВСМ типичны более высокие значения цветового угла h_{ab} при более низких значениях C^*_{ab}, чем для образцов молочных смесей с добавлением ВСМ (Рисунок 3).

Использование соотношения C^*_{ab}/h_{ab} позволяет повысить степень дифференциации между образцами с разной м. д. ВСМ. Применительно к натуральному молоку деление низких значений C^*_{ab} на высокие значения h_{ab} ведет к снижению величины показателя K_{Ch}. Для молочных смесей с добавлением ВСМ деление высоких значений C^*_{ab} на низкие значения h_{ab} увеличивает значение K_{Ch}. Также при использовании для оценки критерия K_{Ch}, вместо критерия ΔE_{ab} снижается трудоемкость анализа, т. к. требуется измерять показатели окрашивания только в образцах после тепловой обработки.

3.6. Сравнение эффективности дифференциации образцов натурального молока и молока с добавлением ВСМ с применением разных критериев отличия

Для объективного сравнения эффективности разных критериев цветовой оценки, количество вносимого ВСМ было пересчитано в количество белка сухого молока, внесенного в состав ВСМ. Содержание белка было измерено методом Къельдаля. На Рисунке 5 приведены графики зависимости общего цветового отличия ΔE_{ab} и критерия K_{Ch} от содержания белка сухого молока, выраженного в виде доли от общей м. д. белка в молочной смеси.

Показатели точности описания зависимости интенсивности окрашивания от м. д. белка сухого молока по различным критериям цветового отличия приведены в Таблице 2.

Таблица 2. **Показатели точности аппроксимации для уравнений линейной регрессии**

Table 2. **Indicators of the accuracy of approximation for linear regression equations**

Критерий оценки	R^2	F	p
ΔE_{ab}	0,7375	81,48	<0,0000001
K_{Ch}	0,7550	89,35	<0,0000001

Примечание: R^2– коэффициент детерминации; F — Критерий Фишера; p — уровень значимости.

Как следует из данных, приведенных в Таблице 2, применение разных критериев для описания зависимости интенсивности окрашивания образцов с разной м. д. ВСМ от фактического содержания белка сухого молока характеризуется разной точностью. Исходя из показателей точности аппроксимации R^2 и F, критерий K_{Ch} более точно описывает зависимость между интенсивностью окрашивания образца и м. д. белка сухого молока в смеси. Критерий оценки ΔE_{ab} характеризуется большей вариабельностью, т. к. данная величина рассчитывается от значений L^*, a^* и b^* образцов до и после тепловой обработки. При расчете значения ΔE_{ab}, погрешности измерения образцов складываются.

3.7. Установление границ интервалов интенсивности окрашивания для образцов натурального молока

Описываемый в настоящей работе метод выявления наличия примеси сухого молока в натуральном молоке может быть использован только как качественный метод контроля. Причина этому — существенная неоднородность в группах сырого и восстановленного молока по содержанию продуктов реакции Майяра. Для дифференциации образцов натурального молока и молочных смесей с добавлением ВСМ были вычислены границы доверительных интервалов окрашивания в этих группах по критериям ΔE_{ab} и K_{Ch}. В Таблице 3 приведены граничные значения уровней окрашивания для натурального молока и для образцов, содержащих 5% ВСМ.

Таблица 3. **Границы интервалов окрашивания для групп молока с добавлением и без добавления ВСМ**

Table 3. **Boundaries of intervals of staining for the groups of milk with and without addition of RDM**

Критерий оценки	Для натурального молока			Для молока с м. д. 5% ВСМ		
	n	Max	*P*(+0,95)	*n*	Min	*P*(–0,95)
ΔE_{ab}	15	9,72	8,99	8	11,71	11,75
K_{Ch}	15	13,14	11,94	8	14,47	14,19

Примечание: *n* — количество образцов в выборке; Max, Min — максимальное и минимальное значение по выборке; *P*(+0,95), *P*(–0,95) — верхняя и нижняя границы доверительного интервала для уровня доверительной вероятности *P* = 0,95.

На основании данных, приведенных в Таблице 3, видно, что максимальные значения интенсивности окрашивания для натурального молока, оцениваемые по ΔE_{ab} и K_{ch}, не пересекаются с минимальными значениями для молока с м. д. 5% ВСМ. Для сырого

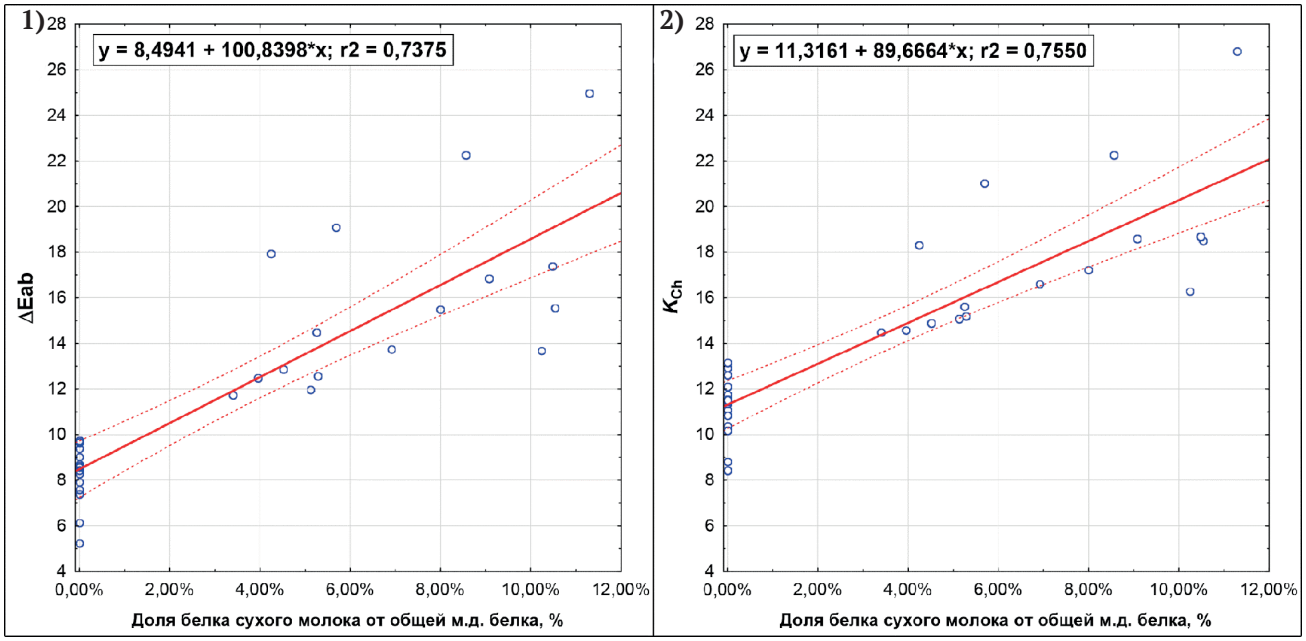


Рисунок 5. **Зависимость значений: 1) общего цветового отличия ΔE_{ab} и 2) критерия K_{Ch} — от доли содержания белка сухого молока от общей м. д. белка в молочной смеси**

Figure 5. **Dependence of the values of total color difference ΔE_{ab} (1) and K_{Ch} criterion (2) on the percent of the dry milk protein content of the total mass fraction of protein in the milk mixture**

молока целесообразно установить границу по наибольшему максимальному фактическому значению: для критерия ΔE_{ab} — на уровне 9,72 (округленно 10 ед.), для критерия K_{ch} — на уровне 13,14 (округленно 14 ед.). Образцы молока, в которых обнаруживаются уровни окрашивания выше указанных значений, следует считать содержащими примесь ВСМ в количестве свыше 5 % (по массе).

На практике, имеет место фальсификация добавлением сухого молока к натуральному молоку, в целях повышения в последнем содержания белка и придания ему более высокого сорта, который дороже оплачивается при покупке переработчиками. При м. д. сухих веществ в ВСМ, равной 10 %, добавление 5 % ВСМ от массы молочной смеси эквивалентно внесению 5 г сухого молока на 1 дм^3 натурального молока. При содержании белка в сухом молоке 33 % это соответствует добавлению ~1,7 г белка на 1 дм^3 натурального молока, что приводит к увеличению содержания белка в нем примерно на 0,17 %. Внесение сухого молока в количестве, превышающем этот порог, достоверно выявляется с помощью разработанного метода.

4. Заключение

На основании полученных данных, можно сделать следующие выводы:

- проблема фальсификации свежего молока добавлением сухого обусловлена, в том числе, сложностью существующих методов контроля и отсутствием достаточно простого и надежного способа выявления такой примеси;
- существует потребность в разработке простого в реализации инструментального метода для выявления наличия примеси сухого молока в свежем натуральном молоке.

Авторами предлагается метод выявления примеси сухого молока, основанный на оценке содержания продуктов начальной стадии реакции Майяра, являющихся маркерным признаком сухого молока. Метод реализуется посредством приготовления из молока препарата высушенного, очищенного от лактозы казеина с содержанием влаги около 6 %. Затем препарат подвергается тепловой обработке при температуре 100 ± 1 °C в течение 5 часов в герметичной упаковке, обеспечивающей сохранение влаги. В процессе тепловой обработки происходит трансформация продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированных аминокислот, не обладающих окрашиванием) в продукты финальной стадии реакции Майяра (меланоиды, имеющие интенсивную окраску). Интенсивность этой окраски можно измерить с помощью колориметра с представлением результатов в координатах цветового пространства CIE $L^*a^*b^*$.

Содержание меланоидных пигментов может быть оценено как с помощью стандартного критерия общего цветового отличия ΔE, так и с применением предлагаемого авторами комплексного критерия K_{Ch}, который рассчитывается как соотношение C^*_{ab}/h_{ab}.

Критерий K_{Ch} более точно описывает зависимость между интенсивностью окрашивания образца и м. д. белка сухого молока в смеси в сравнении со стандартным критерием оценки ΔE_{ab}. Также при использовании для оценки критерия K_{Ch} вместо критерия ΔE_{ab} уменьшается трудоемкость анализа, т. к. требуется измерять показатели окрашивания только в образцах после тепловой обработки.

Были проведены испытания разработанного колориметрического метода на смесях из свежего натурального молока с восстановленным сухим молоком. Установлено, что разработанный колориметрический метод позволяет обнаруживать добавление сухого молока на уровне ~5 г на 1 дм^3 свежего натурального молока.

REFERENSES

1. Poonia, A., Jha, A., Sharma, R., Singh H.-B., Rai, A. K., Sharma, N. (2016). Detection of adulteration in milk: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 70(1), 23–42. https://doi.org/10.1111/1471-0307.12274
2. Nikolaou, P., Deskoulidis, E., Topoglidis, E., Kakoulidou, A. T., Tsopelas, F. (2020). Application of chemometrics for detection and modeling of adulteration of fresh cow milk with reconstituted skim milk powder using voltammetric fingerpriting on a graphite/ SiO2 hybrid electrode. *Talanta,* 206, Article 120223. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120223
3. Ho, J.-H., Chou, M.-Y., Chan, Y.-J., Chow, C.-F., Lee, T.-A., Lu, W.-C. et al. (2024). Discrimination of reconstituted milk from fresh skim milk by using lactulose and furosine as milk quality indicators. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Article 101336. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101336
4. Tan, D., Zhang, X., Su, M., Jia, M., Zhu, D., Kebede, B. et al. (2021). Establishing an untargeted-to-MRM liquid chromatography-mass spectrometry method for discriminating reconstituted milk from ultra-high temperature milk. *Food Chemistry*, 337, Article 127946. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127946
5. Cui, J., Zhu, D., Su, M., Tan, D., Zhang, X., Jia, M. et al. (2021). Lipidomics strategy for the identification of ultra-high temperature and reconstituted milk by UPLC-Q-Exactive orbitrap mass spectrometry. *Food Analytical Methods*, 14, 1064–1073. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01947-5
6. Cui, J., Zhu, D., Su, M., Tan, D., Zhang, X., Jia, M. et al. (2019). The combined use of 1H and 2D NMR-based metabolomics and chemometrics for non-targeted screening of biomarkers and identification of reconstituted milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6455–6461. https://doi.org/10.1002/jsfa.9924
7. Fan, X., Wang, C., Cheng, M., Wei, H., Gao, X., Ma, M. et al. (2023). Markers and Mechanisms of deterioration reactions in dairy products. *Food Engineering Reviews,* 15, 230–241. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9
8. Guyomarc'h, F., Warin, F., D. Muir, D., Leaver, J. (2000). Lactosylation of milk proteins during the manufacture and storage of skim milk powders. *International Dairy Journal*, 10(12), 863–872. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00020-6

9. Resmini, P., Pellegrino, L., Cattaneo, S. (2003). Furosine and other heat-treatment indicators for detecting fraud in milk and milk products. *Italian Journal of Food Science*, 4(15), 473–484.
10. Baptista, J. A. B., Carvalho, R. C. B. (2004). Indirect determination of Amadori compounds in milk-based products by HPLC/ELSD/UV as an index of protein deterioration. *Food Research International*, 37(8), 739–747. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.02.006
11. Sakkas, L., Moutafi, A., Moschopoulou, E., Moatsou, G. (2014). Assessment of heat treatment of various types of milk. *Food Chemistry*, 159, 293–301 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.020
12. Liu, H., Huang, R., Zeng, G., Xu, Z., Sun, Y, Lei, H. et al. (2020). Discrimination of reconstituted milk in China market using the content ratio of lactulose to furosine as a marker determined by LC–MS/MS. *LWT — Food Science and Technology*, 117, Article 108648. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108648
13. Mandal, R., Bag, S.K., Singh, A.P. (2019). Thermal Processing of Milk. Chapter in a book: Recent Technologies in Dairy Science. Today and Tomorrow's Printers and Publishers, New Delhi, 2019
14. He, Y., Cao, X., Ji, K., Yang, A., Chen, X., Chen, C. (2022). Uncertainty evaluation for the determination of furosine in milk by HPLC[J]. *China Dairy*, 9, 71–80. https://doi.org/10.12377/1671-4393.22.09.16 (In Chinese)
15. Tan, D., Zhang, H., Tan, S., Xue, Y., Jia, M, Zhu, X. et al. (2022). Differentiating ultra-high temperature milk and reconstituted milk using an untargeted peptidomic approach with chemometrics. *Food Chemistry*, 394, Article 133528. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133528
16. Du, L., Lu, W., Zhang, Y., Gao, B., Yu, L. (2020). Detection of milk powder in liquid whole milk using hydrolyzed peptide and intact protein mass spectral fingerprints coupled with data fusion technologies. *Food Science and Nutrition*, 8(3), 1471–1479. https://doi.org/10.1002/fsn3.1430
17. Du, L. (2024). New insights into raw milk adulterated with milk powder identification: ATR-FTIR spectroscopic fingerprints combined with machine learning and feature selection approaches. *Journal of Food Composition and Analysis*, 133, Article 106443. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106443
18. Chu, C., Wang, H., Luo, X., Fan, Y., Nan, L., Du, C. et al. (2024). Rapid detection and quantification of melamine, urea, sucrose, water, and milk powder adulteration in pasteurized milk using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy coupled with modern statistical machine learning algorithms. *Heliyon*, 10(12), Article e32720. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32720
19. Jin, B., Zhou, X., Rogers, K. M., Yi, B., Bian, X., Yan, Z. et al. (2022). A stable isotope and chemometric framework to distinguish fresh milk from reconstituted milk powder and detect potential extraneous nitrogen additives. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108, Article 104441. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104441
20. Топникова, Е. В., Мягконосов, Д. С., Абрамов, Д. В., Кашникова, О. Г. (2024). Колориметрический метод оценки интенсивности тепловой нагрузки при пастеризации молока. *Пищевые системы*, 7(3), 481–490. [Topnikova, E. V., Myagkonosov, D. S., Abramov, D. V., Kashnikova, O. G. (2024). Colorimetric method for estimating the intensity of heat load during milk pasteurization. *Food Systems*, 7(3), 481–490. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490
21. Мягконосов, Д. С., Топникова, Е. В., Абрамов, Д. В., Кашникова, О. Г. (2024). Использование турбидиметрии для оценки тепловой нагрузки при пастеризации молока. *Пищевые системы*, 7(1), 105–113. [Myagkonosov, D. S., Topnikova, E. V., Abramov, D. V., Kashnikova, O. G. (2024). Use of turbidimetry for determination of heat treatment intensity applied at pasteurization of milk. *Food Systems*, 7(1), 105–113. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-105-113
22. Stoscheck, C. M. (1990). Quantitation of protein. Chapter in a book: Methods in Enzymology. Academic Press, 1990. https://doi.org/10.1016/0076–6879(90)82008-P
23. Hill, B., Roger, T., Vorhagen, F. W. (1997). Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 16(2), 109–154. https://doi.org/10.1145/248210.248212
24. Croguennec, T. (2016). Non-Enzymatic Browning. Chapter in a book: Handbook of Food Science and Technology 1: Food Alteration and Food Quality. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2916. https://doi.org/10.1002/9781119268659.ch5
25. Nath, P., Pandey, N., Samota, M., Sharma, K., Kale, S., Kannaujia, P. et al. (2022). Browning Reactions in Foods. Chapter in a book: Advances in Food Chemistry. Springer, Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4796-4_4
26. Saltmarch, M., Labuza, T. P. (1982). Nonenzymatic browning via the maillard reaction in foods. *Diabetes*, 31(Suppement_3), 29–36. https://doi.org/10.2337/diab.31.3.S29
27. Phosanam, A., Chandrapala, J., Zisu, B., Adhikari, B. (2021). Storage stability of powdered dairy ingredients: A review. *Drying Technology*, 39(11), 1529–1553. https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1910955
28. Roux, S., Courel, M., Ait-Ameur, L., Birlouez-Aragon, I., Pain, J.-P. (2009). Kinetics of Maillard reactions in model infant formula during UHT treatment using a static batch ohmic heater. *Dairy Science and Technology*, 89, 349–362. https://doi.org/10.1051/dst/2009015
29. Rodier, L. C., Hartel, R. W. (2021) Characterizing Maillard reaction kinetics and rheological changes in white chocolate over extended heating. *Journal of Food Science*, 86(6), 2553–2568. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15772
30. Dawson, P. L., Acton, J. C. (2018). Impact of proteins on food color. Chapter in a book: Proteins in Food Processing. Elsevier Ltd, 2018. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100722-8.00023-1
31. Karma, I. G. M. (2020). Determination and measurement of color dissimilarity. *International Journal of Engineering and Emerging Technology*, 5(1), 67–71.
32. Wrolstad, R. E., Smith, D. E. (2017). Color Analysis. Chapter in a book: Food Analysis, Food Science Text Series. Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_31
33. Афонин, П. Н., Афонин, Д. Н. (2017). Статистический анализ с применением современных программных средств: учебное пособие. СПб.: Интермедия, 2017. [Afonin, P. N., Afonin, D. N. (2017). Statistical analysis using modern software: a tutorial. St. Petersburg: Intermedia, 2017. (In Russian)]
34. Benedetti, S., Sinelli, N., Buratti, S., Riva, M. (2005). Shelf life of crescenza cheese as measured by electronic nose. *Journal of Dairy Science*, 88(9), 3044–3051. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72985-4
35. Pathare, P. B., Opara, U. L., Al-Said, F. A.-J. (2012). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food Bioprocessing Technology*, 6, 36–60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Мягконосов Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель направления исследований по прикладной биохимии и энзимологии, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–915–973–63–13 E-mail: d.myagkonosov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4443-7573 * автор для контактов	**Dmitry S. Myagkonosov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Research Department in Applied Biochemistry and Enzymology, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–915–973–63–13 E-mail: d.myagkonosov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4443-7573 * corresponding author
Топникова Елена Васильевна — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская обл., Углич, Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–910–666–93–93 E-mail: topnikova.l@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0225-6870	**Elena V. Topnikova**, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, 152613, Yaroslavl Region, Uglich, Russia Tel.: +7–910–666–93–93 E-mail: topnikova.l@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0225-6870
Абрамов Дмитрий Васильевич — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель направления биохимических исследований по сыроделию и маслоделию, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–910–970–42–97 E-mail: d.abramov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8326-1932	**Dmitry V. Abramov**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of Biochemical Research in Cheesemaking and Buttermaking, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–910–970–42–97 E-mail: d.abramov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8326-1932
Кашникова Ольга Геннадьевна — младший научный сотрудник, отдел физической химии, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская обл., Углич, Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–962–200–14–15 E-mail: o.kashnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7557-6835	**Olga G. Kashnikova**, Junior researcher, Department of Physical Chemistry, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–962–200–14–15 E-mail: o.kashnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7557-6835
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-306-312

Поступила 06.05.2025
Поступила после рецензирования 24.06.2025
Принята в печать 27.06.2025
© Тарасов А. В., Заворохина Н. В., Чугунова О. В., Вяткин А. В., 2025

https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

КОРРЕЛЯЦИЯ ПЕНООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ НАПИТКОВ НА РАСТИТЕЛЬНОЙ ОСНОВЕ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

Тарасов А. В., Заворохина Н. В.*, Чугунова О. В., Вяткин А. В.
Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
растительные альтернативы молоку, ультрапастеризованное молоко, пена, инъекция пара, механическое перемешивание, жиры, стабилизаторы

АННОТАЦИЯ
Спрос на уникальные вкусы капучино и латте способствовал исследованию пенообразующих свойств напитков на растительной основе, среди которых наибольший потенциал применения на предприятиях общественного питания имеют напитки, предназначенные для профессионального использования бариста. В этой работе исследовались пенообразующие и физико-химические свойства напитков на растительной основе и коровьего молока для капучино с маркировкой Barista. Образцы вспенивали при температурах, характерных для приготовления горячих и холодных кофейных напитков, и оценивали пенообразующую способность (FC) и стабильность пены (FS). При обработке паром (65 °C) и перемешивании при температуре 65 °C и 10 °C растительные напитки демонстрировали FC в интервалах 93–202 %, 15–262 % и 0–196 % соответственно, тогда как у коровьего молока эти показатели составляли 197 %, 258 % и 200 %. Проанализированный кокосовый напиток вспенивался при 65 °C, но не вспенивался при 10 °C предположительно вследствие густой консистенции и повышенной вязкости. С точки зрения количества и стабильности пен все растительные напитки были жизнеспособными альтернативами молоку для капучино в случае впрыскивания пара, но не в случае механического перемешивания. Пенообразующие свойства растительных напитков не коррелировали с содержанием большинства питательных веществ и изученными физико-химическими показателями (pH, плотностью, общими сухими веществами и общим содержанием полифенолов). Однако была обнаружена отрицательная корреляция между содержанием жиров и FC растительных напитков при смешивании ($p < 0,05$), аналогичная тенденция наблюдалась и для инъекции пара ($p = 0,08$). Отсутствие корреляции с содержанием белков подчеркивает сложность контроля характеристик пен в профессиональных растительных напитках и может быть обусловлено синергетическими эффектами между белками и стабилизаторами в пенообразовании. Будущие работы должны стимулировать изучение эффектов камедей, каррагинанов и других стабилизаторов в пенообразовании.

Received 06.05.2025
Accepted in revised 24.06.2025
Accepted for publication 27.06.2025
© Tarasov A. V., Zavorokhina N. V., Chugunova O. V., Vyatkin A. V., 2025

Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

CORRELATION OF FOAMING PROPERTIES OF PLANT-BASED BEVERAGES WITH PHYSICOCHEMICAL COMPOSITION

Aleksey V. Tarasov, Natalia V. Zavorokhina*, Olga V. Chugunova, Anton V. Vyatkin
Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

KEY WORDS:
plant-based milk alternatives, ultra-high-temperature milk, foam, steam injection, mechanical agitation, fats, stabilizers

ABSTRACT
Demand for unique cappuccino and latte flavors has led to research into the foaming properties of plant-based beverages, among which the greatest potential for use in catering organizations are drinks intended for professional use by baristas. This work investigated the foaming and physicochemical properties of plant-based beverages and cow's milk for cappuccino labeled "Barista". Samples were foamed at temperatures simulating the consumption of hot and cold coffee beverages and evaluated for foaming capacity (FC) and foam stability (FS). After steam treatment at 65 °C, agitation at 65 °C and 10 °C, the plant-based drinks showed FC in the ranges of 93–202 %, 15–262 % and 0–196 %, respectively, whereas under similar conditions, the FC of milk was 197, 258 and 200 %. The analyzed coconut drink foamed at 65 °C but did not froth at 10 °C, presumably due to its thick consistency and increased viscosity. In terms of foam quantity and stability, all plant-based drinks were viable alternatives to milk for cappuccino in the case of steam injection, but not in the case of mechanical agitation. Foaming properties of plant-based drinks were not correlated with most nutrients and the studied physicochemical parameters (pH, density, total solids and total polyphenol content). However, a negative correlation of fats with FC of plant-based drinks was found when stirred ($p < 0.05$), a similar trend was observed for steam injection ($p = 0.08$). The lack of correlation with proteins highlights the difficulty of controlling foam characteristics in professional plant-based beverages and may be due to synergistic effects between proteins and stabilizers in foaming. Future works should encourage the study of the effects of gums, carrageenans and other stabilizers on foaming.

1. Введение

По оценкам различных аналитических компаний, мировое потребление напитков типа капучино и латте характеризуется стабильным ростом, что во многом обусловлено усиливающейся урбанизацией, распространением кофейной культуры, современным образом жизни и увеличением располагаемых доходов потребителей. Однако под влиянием потребительских предпочтений эти отрасли испытывают трансформацию. Основным изменением в поведении потребителей стал растущий спрос на уникальные вкусы и более полезные варианты напитков с использованием растительных альтернатив молока [1,2]. Напитки на растительной основе часто обогащаются функциональными компонентами, рекомендуются для веганского питания, а также при некоторых медицинских показаниях, включая аллергию на молочные белки, непереносимость лактозы и гиперхолестеринемию [3,4].

Важным технологическим процессом в приготовлении капучино и латте является вспенивание молока или напитков на растительной основе. Долгое время внимание профессионального сообщества

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Тарасов, А. В., Заворохина Н. В., Чугунова, О. В., Вяткин, А. В.** (2025). Корреляция пенообразующих свойств напитков на растительной основе с физико-химическим составом. *Пищевые системы*, 8(2), 306–312. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-306-312

FOR CITATION: **Tarasov, A. V., Zavorokhina, N. V., Chugunova, O. V., Vyatkin, A. V.** (2025). Correlation of foaming properties of plant-based beverages with physicochemical composition. *Food Systems,* 8(2), 306–312. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-306-312

было сосредоточено на изучении пенообразующих свойств молока и было показано, что качество молочной пены зависит от некоторых композиционных и технологических факторов [5]. Белки являются хорошими пенообразователями. Адсорбируясь на границе раздела воздух–жидкость, они действуют как высокомолекулярные поверхностно-активные вещества и стабилизируют пузырьки пены за счет образования плотной вязкоупругой пленки [6]. Пенообразующие свойства молока могут зависеть от массовой доли белка, размера частиц казеина, соотношения казеина и сывороточных белков и от некоторых других композиционных параметров [5]. Жиры и продукты их распада считаются менее хорошими пенообразователями. Адсорбируясь на границе раздела воздух–жидкость, они действуют как низкомолекулярные поверхностно-активные вещества и образуют тонкую межфазную пленку, стабилизация которой может достигаться за счет т. н. «эффекта Марангони». Механизм последнего заключается в том, что при достаточной концентрации липиды могут диффундировать к самой тонкой области пленки, восстанавливая ее локальную толщину без дестабилизации пузырьков пены [6]. Пенообразующие свойства молока могут зависеть от массовой доли, агрегатного состояния и размера глобул молочного жира [5]. В смешанных пищевых системах белки и липиды могут взаимодействовать между собой и конкурировать за адсорбцию на границе раздела фаз, минеральные соли могут влиять на конформационную стабильность белков, а процессы протеолиза и липолиза могут интенсифицироваться при хранении и обработке. Кумулятивные эффекты этих явлений способны приводить к непредсказуемым результатам в пенообразовании [5,6]. Химический состав молока подвержен сезонным колебаниям, поэтому образцы молока, собранные летом и весной, могут производить пены различного качества [7]. Пенообразующие свойства молока зависят также от способа вспенивания, что обусловлено различиями в температуре, силе сдвига и давлении. В целом, коровье молоко обеспечивает хорошую производительность пены для капучино и латте, однако напитки на растительной основе становятся все более популярными альтернативами.

Некоторые недавние работы изучают пенообразующие свойства коровьего молока и напитков на растительной основе при температурах, характерных для приготовления горячих и холодных кофейных напитков [8–11]. После механического перемешивания при 4 °C и впрыскивания пара при 65 °C пенообразующие свойства водных экстрактов семян кунжута были хуже, чем у коровьего молока, но сопоставимы с пенообразующими свойствами соевого напитка. Предварительное обжаривание семян кунжута и добавление ксантановой камеди привело к улучшению пенообразующих свойств экстрактов, тогда как предварительное бланширование семян кунжута, добавление гуаровой камеди и йота-каррагинана не оказывало существенного влияния на пенообразующие свойства экстрактов, либо ухудшало их [8]. При холодном смешивании образцы молока показали лучшие пенообразующие свойства в сравнении с соевым, кокосовым и овсяным напитками, тогда как при паровой обработке пенообразующие свойства всех образцов были приблизительно схожими. Среди исследованных растительных напитков лучшие пенообразующие свойства продемонстрировал соевый напиток, однако с точки зрения органолептической приемлемости в напитках типа капучино он уступал всем проанализированным образцам [9]. В результате барботирования воздухом при комнатной температуре и при 60 °C пенообразующие свойства растительных напитков варьировались в широких пределах и могли превосходить таковые для коровьего молока. Содержание белков и фитиновой кислоты в растительных напитках было положительно связано с объемом пены при 60 °C, предположительно, вследствие способности фитиновой кислоты связываться с белками и влиять на их растворимость [10]. После механического перемешивания и барботирования воздухом с холодными настройками овсяный, соевый и миндальный напитки превосходили молоко по количеству и стабильности пены, тогда как при горячем смешивании молоко производило больший объем пены в сравнении с овсяным, гороховым и соевым напитками. Среди исследованных образцов овсяный напиток имел самую стабильную пену, а рисовый напиток показал наименьшие количество и устойчивость пены [11]. Различия в пенообразующих свойствах коровьего молока и напитков на растительной основе могут быть обусловлены разницей в размере частиц, профиле нутриентов и вязкости. Известно, что размер молочных белков [12], растительных белков [13] и небелковых умеренно-гидрофобных частиц [14] оказывает влияние на пенообразующие свойства дисперсий, однако в сравнении с коровьим молоком напитки на растительной основе демонстрируют более крупное распределение частиц по размеру [8–10]. Несмотря на присущую вариабельность, напитки на растительной основе являются неэквивалентными коровьему молоку по питательным свойствам. Только соевый напиток считается лучшей альтернативой, поскольку его пищевой профиль ближе к коровьему молоку, однако содержание нутриентов в нем может варьироваться в широких пределах [4]. Помимо количественных различий в содержании питательных веществ, наблюдаются качественные особенности состава. В сравнении с животными белками растительные белки более гидрофобные и агрегированные [15], тогда как в сравнении с животными жирами растительные масла содержат большее количество ненасыщенных жирных кислот [16]. Представленные на рынке растительные напитки изготавливаются с большим количеством дополнительных ингредиентов, из которых камеди, каррагинаны, лецитины и сапонины могут участвовать в пенообразовании [17]. Кроме того, эти стабилизирующие и эмульгирующие добавки могут быть ответственны за более высокую вязкость растительных напитков в сравнении с коровьим молоком [3]. Сообщалось также, что вязкость напитков может зависеть от профиля и количества пищевых волокон [18], тогда как ионы кальция могут связываться с растительными белками и влиять на их свойства [19].

Среди напитков на растительной основе наиболее частое применение на предприятиях общественного питания имеют напитки, предназначенные для профессионального использования баристa [20]. В последние годы были приложены большие усилия по улучшению стабильности [21], функциональности [4], органолептической приемлемости [22] и срока годности [23] растительных альтернатив молока. Предполагается, что новые технические решения внедрялись в производство растительных напитков типа Barista или будут внедряться в производство следующих поколений напитков, достойных профессионального применения. Целью этой работы было определение пенообразующих свойств напитков на растительной основе типа Barista и изучение корреляционных взаимосвязей пенообразующих свойств с содержанием питательных веществ и с физико-химическими показателями.

2. Объекты и методы

В данной работе исследовались напитки на растительной основе и коровье молоко для капучино российского производства, имеющие маркировку Barista или Professional на упаковке. Всего в исследование было включено 10 растительных напитков, из которых пять были изготовлены с использованием одной растительной основы, а другие пять — с использованием смешанных растительных основ. С целью более удобного представления результатов образцы растительных напитков были промаркированы в соответствии с ингредиентами растительных основ. Пищевая и энергетическая ценность растительных напитков определялась по данным, указанным на упаковке (Таблица 1). Содержание пищевых волокон было рассчитано из предположения об их двухкалорийном вкладе в общую энергетическую ценность напитков. Коровье молоко, проанализированное в сравнительных целях, содержало 3,3 г белка, 3,2 г жиров и 4,7 г углеводов на 100 мл. Все напитки были ультрапастеризованными, упакованными в герметичную картонную тару и имели длительный срок хранения (9–12 месяцев для растительных напитков и 4 месяца для образца молока). Все образцы хранили в холодильной камере при температуре 4 °C и перед каждым отбором проб тщательно взбалтывали.

Показатель pH напитков измеряли при комнатной температуре (23 ± 3 °C) при помощи pH-метра «ТА-Ион» (ООО «НПП «Томьаналит», Россия) и комбинированного pH-электрода ЭСК-10603 (ООО «Измерительная техника», Россия), которые предварительно калибровали по трем точкам с использованием эталонных буферных растворов. Плотность растительных напитков и молока измеряли при температуре 20 °C по ГОСТ Р 54758-2011[1] с использованием ареометров типа АОН-1 и АМТ соответственно. Общее содержание сухих веществ в растительных напитках и молоке измеряли термогравиметрическим методом по ГОСТ 33977-2016[2] и ГОСТ Р 54668-2011[3] соответственно. Общее содержание полифенолов (ОСП) измеряли спектрофотометрическим методом Фолина-Чокальтеу с использованием галловой кислоты (ГК) в качестве стандарта [24]: 2,5 мл реагента Фолина-Чокальтеу (0,2 н) смешивали с 0,5 мл разбавленного образца (1:50) и выдерживали в течение 5 минут. Затем добавляли

[1] ГОСТ Р 54758-2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения плотности». М.: Стандартинформ, 2012. —19 с.

[2] ГОСТ 33977-2016 «Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ». М.: Стандартинформ, 2019. — 18 с.

[3] ГОСТ Р 54668–2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения массовой доли влаги и сухого вещества». М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

Таблица 1. **Характеристика исследованных напитков на растительной основе в соответствии с информацией на упаковке**
Table 1. **Characteristics of the studied plant-based beverages according to the information on the packaging**

Образец	Содержание в г/100 г					Энергия, ккал/100 г	Стабилизаторы	Эмульгаторы
	Белки	Жиры	Углеводы	Волокна	Ca			
Соя	2,0	1,0	4,0	1,0	0,12	35	E418	—
Овес	1,0	1,0	9,0	0,5	0,12	50	E418	—
Миндаль	0,4	1,2	3,0	0,3	0,12	25	E418, E412	E322
Фундук	0,5	1,9	4,6	0,25	0	38	E418, E412	–
Кокос	0,6	2,5	3,5	0,05	0	39	—	E322
Соя-миндаль	1,0	2,0	4,5	0	0	40	E412, E418	E471
Рис-фундук	0,7	2,0	5,0	0,1	0	41	E418, E407	E322
Кокос-соя	0,9	1,3	3,9	0,05	0,12	31	E418	—
Соя-банан	2,0	1,0	4,5	0	0	35	E418, E412	—
Рис-конопля	1,0	3,5	6,2	0	0,15	55,3	E412, E418	E322

Примечание: E322 — лецитины; E407 — каррагинаны; E412 — гуаровая камедь; E418 — гелановая камедь; E 471 — моно- и диглицериды жирных кислот; знак «–» означает отсутствие данных на упаковке.
Note: E322 — lecithins; E407 — carrageenans; E412 — guar gum; E418 — gellan gum; E471 — mono- and diglycerides of fatty acids; the «–» sign means no data on the packaging.

2,5 мл раствора карбоната натрия (7,5 %), после чего полученную смесь повторно перемешивали и инкубировали в темноте в течение 2 часов. Поглощение образцов измеряли на спектрофотометре UV-1200 (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd., Китай) при 725 нм с использованием кювет с длиной оптического пути 10 мм. Полученные результаты выражали в миллиграмм-эквивалентов галловой кислоты на 100 миллилитров напитка (мг-экв ГК/100 мл).

Вспенивание напитков проводили с помощью двух распространенных способов вспенивания: впрыскивания пара (65 °C) и механического перемешивания (65 и 10 °C). Паровое вспенивание образцов было выполнено профессиональным бариста при помощи кофемашины 85 Practical E (La San Marco S.p.A., Италия) с откалиброванным давлением в бойлере на уровне 1 бар. Методика парового вспенивания была представлена в работе [25]. Отмеряли 150 мл образца, переносили в питчер из нержавеющей стали, опускали пароотводную трубку кофемашины и запускали процесс подачи пара до тех пор, пока температура образца не достигнет 65 °C (12–15 с). Для механического перемешивания образцов использовали электрический пеновзбиватель CASO Crema & Choco Inox (Braukmann GmbH, Германия) мощностью 500 Вт. Отбирали 150 мл образца и переносили в съемную чашу из нержавеющей стали. Чашу с образцом устанавливали на основание пеновзбивателя, оснащенное нагревательным элементом. В первом случае запускали программу горячего смешивания «Капучино» и перемешивали образец до тех пор, пока его температура не достигнет 65 °C (170–175 с). Во втором случае запускали программу холодного смешивания «Фраппе» и перемешивали образец до завершения программы (120 с). После завершения холодного смешивания конечная температура образцов не превышала 10 °C. Во всех случаях контроль температуры осуществляли с помощью термопары мультиметра Owon B41T (Fujian Lilliput Optoelectronics Technology Co., Ltd., Китай), помещенной непосредственно в емкость со вспениваемым образцом. Вспененные образцы незамедлительно переносили в мерный цилиндр объемом 500 мл и фиксировали начальный и конечный объем пены с учетом синерезиса (за вычетом мигрировавшей жидкой фазы). Пенообразующую способность (FC) образцов характеризовали по нормализованному объему пены, тогда как стабильность пен (FS) оценивали по способности сохранять пенную структуру в течение 15 минут [13,26]:

$$FC(\%) = \frac{V_{F0}}{V_S} \cdot 100\,, \quad (1)$$

$$FS(\%) = \frac{V_{F15}}{V_{F0}} \cdot 100\,, \quad (2)$$

где V_S — объем образца для вспенивания, равный 150 мл; V_{F0} — начальный объем пены в мл, определяемый через 30 с после вспенивания образца; V_{F15} — конечный объем пены в мл, определяемый через 15 минут после вспенивания образца.

Временной интервал для оценивания стабильности пен соответствовал ранее опубликованным исследованиям и был выбран исходя из предположения, что напитки типа капучино и латте употребляются в течение не более 15 минут после приготовления [8,9].

Определение физико-химических показателей и приготовление пен были выполнены в трехкратной повторности (n = 3). Результаты представлены как среднее арифметическое значение с соответствующим стандартным отклонением. Статистическую обработку результатов выполняли в программе Statistica (StatSoft Inc., США). Различия между средними значениями переменных оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа с дополнительным тестом Тьюки. Взаимосвязь между изученными переменными анализировали с помощью парной линейной корреляции Пирсона с дополнительным тестом Стьюдента. Уровень значимости $\alpha = 0{,}05$ использовался для всех статистических расчетов.

3. Результаты и обсуждение

Физико-химические показатели напитков на растительной основе были определены с целью изучения их возможной взаимосвязи с пенообразующими свойствами, тогда как коровье молоко было проанализировано в сравнительных целях (Таблица 2). Известно, что pH влияет на заряд белков и на их конформационную стабильность,

Таблица 2. **Физико-химические показатели напитков на растительной основе и коровьего молока**
Table 2. **Physicochemical parameters of plant-based beverages and cow's milk**

Образец	pH	Плотность, г/л	Массовая доля сухих веществ, %	ОСП, мг-экв ГК/100 мл
Соя	$6{,}91 \pm 0{,}01^{e,f}$	1022 ± 0^{d}	$5{,}88 \pm 0{,}07^{b}$	$61{,}4 \pm 1{,}2^{c}$
Овес	$6{,}94 \pm 0{,}02^{f}$	1030 ± 0^{j}	$10{,}57 \pm 0{,}04^{g}$	$32{,}0 \pm 1{,}5^{a,b}$
Миндаль	$7{,}46 \pm 0{,}01^{j}$	1015 ± 0^{a}	$5{,}31 \pm 0{,}03^{a}$	$27{,}9 \pm 1{,}1^{a}$
Фундук	$6{,}76 \pm 0{,}01^{c}$	1024 ± 0^{e}	$9{,}37 \pm 0{,}04^{f}$	$56{,}8 \pm 2{,}2^{c}$
Кокос	$6{,}69 \pm 0{,}02^{b}$	1018 ± 1^{b}	$11{,}72 \pm 0{,}03^{i}$	$63{,}9 \pm 2{,}7^{c}$
Соя-миндаль	$7{,}07 \pm 0{,}01^{g}$	1019 ± 0^{b}	$6{,}83 \pm 0{,}09^{d}$	$58{,}6 \pm 3{,}0^{c}$
Рис-фундук	$7{,}23 \pm 0{,}01^{h}$	1026 ± 0^{f}	$9{,}20 \pm 0{,}05^{f}$	$73{,}2 \pm 0{,}8^{d}$
Кокос-соя	$7{,}38 \pm 0{,}00^{i}$	1021 ± 0^{c}	$6{,}64 \pm 0{,}12^{c}$	$37{,}8 \pm 2{,}9^{b}$
Соя-банан	$6{,}87 \pm 0{,}01^{d}$	1028 ± 0^{h}	$7{,}85 \pm 0{,}02^{e}$	$36{,}9 \pm 2{,}5^{b}$
Рис-конопля	$6{,}88 \pm 0{,}01^{d,e}$	1027 ± 0^{g}	$10{,}77 \pm 0{,}06^{h}$	$90{,}7 \pm 5{,}5^{e}$
Молоко	$6{,}65 \pm 0{,}01^{a}$	1029 ± 0^{i}	$12{,}01 \pm 0{,}02^{j}$	$101{,}8 \pm 3{,}4^{f}$

Примечание: ОСП — общее содержание полифенолов. Разные и одинаковые буквы указывают на значительные ($p < 0{,}05$) и незначительные ($p \geq 0{,}05$) различия в пределах одного столбца соответственно.
Note: ОСП — total polyphenol content. Different and same letters indicate significant ($p < 0{,}05$) and non-significant ($p \geq 0{,}05$) differences within the same column, respectively.

тем самым воздействуя на пенообразующие свойства растительных [13] и молочных [27] дисперсий. Плотность может коррелировать с общей концентрацией белков и сухих веществ [27], тогда как общее содержание сухих веществ может быть связано с вязкостью и поверхностным натяжением [28]. Полифенольные соединения могут быть синергистами белковых молекул в пенообразовании [29,30]. Растительные напитки продемонстрировали pH в интервале от 6,69 (кокос) до 7,46 (миндаль), что было несколько выше pH молока, равного 6,65. Плотность растительных напитков колебалась в интервале от 1015 г/л (миндаль) до 1030 г/л (овес) против 1029 г/л для образца молока. Массовая доля сухих веществ в растительных напитках варьировалась от 5,31 % (миндаль) до 11,72 % (кокос), что было ниже массовой доли сухих веществ в молоке, равной 12,01 %. Общее содержание полифенолов (ОСП) в растительных напитках находилось в диапазоне от 27,9 мг-экв ГК/100 мл (миндаль) до 90,7 мг-экв ГК/100 мл (рисконопля), тогда как ОСП в молоке составило 101,8 мг-экв ГК/100 мл. Сообщаемые в этой работе значения pH и ОСП для растительных напитков и молока согласуются с литературными данными [31–33]. Близкий к нейтральному уровень pH растительных напитков может быть обусловлен присутствием в составе регуляторов кислотности, а достаточно высокое значение ОСП в молоке может быть связано со способностью реагента Фолина-Чокальтеу окислять некоторые белки. Однако плотности соевого, овсяного и миндального напитков были выше соответствующих литературных значений, тогда как плотность кокосового напитка была ниже сообщаемого в литературе значения [31]. Эти расхождения результатов могут быть обусловлены как различным нутриентным составом растительных напитков, так и разными методами определения плотности. В этом исследовании измерение плотности напитков проводилось с помощью ареометрического метода, тогда как в работе [31] применялась вибрационная плотнометрия.

Результаты оценки пенообразующей способности (FC) исследованных напитков представлены на Рисунке 1. После парового вспенивания при температуре 65 °C напитки на растительной основе продемонстрировали FC в интервале от 93 ± 7 % (соя-миндаль) до 202 ± 8 % (миндаль), тогда как FC коровьего молока составила 197 ± 9 %. В результате смешивания при 65 °C напитки на растительной основе проявили FC в диапазоне от 15 ± 2 % (соя-миндаль) до 262 ± 5 % (кокос-соя) против FC молока, равной 258 ± 4 %. После смешивания при температуре 10 °C напитки на растительной основе показали FC в интервале от 0 ± 0 % (кокос) до 196 ± 2 % (овес) против FC молока, равной 200 ± 2 %. Проанализированный кокосовый напиток не вспенивался путем смешивания при 10 °C, поскольку он имел особую густую консистенцию и, как следствие, повышенную вязкость, которые могут быть ответственны за пенообразование [3]. С повышением температуры до 65 °C вязкость кокосового напитка понижалась, и он становился способным к пенообразованию.

Результаты оценки стабильности пен (FS) исследованных напитков через 15 минут после вспенивания представлены на Рисунке 2. После обработки паром при температуре 65 °C пены растительных напитков сохранили от 37 ± 2 % (овес) до 73 ± 3 % (соя-миндаль) своего первоначального объема, тогда как FS коровьего молока составила 45 ± 4 %. В результате смешивания при 65 °C пены растительных напитков сохранили от 59 ± 1 % (овес) до 87 ± 1 % (соя-миндаль) своего первоначального объема против FS молока, равной 65 ± 3 %. После смешивания при температуре 10 °C пены растительных напитков сохранили от 16 ± 2 % (кокос-соя) до 79 ± 1 % (миндаль) своего первоначального объема против FS молока, равной 0 ± 0 %. Пены растительных напитков могли быть более стабильными после смешивания, при этом низкие пены демонстрировали повышенную устойчивость. О нестабильности молочных пен при низких температурах обработки сообщалось ранее [34]. С точки зрения количества и стабильности пены все растительные напитки были жизнеспособными альтернативами молоку для приготовления капучино в случае впрыскивания пара, но не в случае механического перемешивания.

Соотношение белков и жиров может играть важную роль в пенообразовании [28]. В данной работе наиболее чувствительным к этому параметру оказалось механическое перемешивание при температуре 65 °C (Рисунок 1). Соевый, кокосово-соевый, соево-банановый напитки и молоко, имеющие более высокие соотношения белков к жирам (0,7–2,0), производили достоверно большее количество пены путем смешивания при температуре 65 °C. По-видимому, при достаточно низкой концентрации жиров пены стабилизируются преимущественно белками, при этом гидрофобные белки наиболее активны в стабилизации пен в сравнении с гидрофильными белками [35,36]. Однако гидрофобным белкам требуется некоторое время, чтобы они смогли перестроиться и найти «подходящую» конформацию для присоединения к интерфейсу [37]. Вероятно, более длительное перемешивание обеспечивает улучшенную адсорбцию и самоорганизацию гидрофобных белков на границе раздела по сравнению с кратковременной обработкой паром при той же температуре. Более низкие пены в случае смешивания при температуре 10 °C могут быть связаны с тем, что при пониженных температурах (менее 40 °C) жиры находятся в частично кристаллизованном состоянии и могут повреждать тонкую пленку пузырьков при физическом контакте [34]. Отличительное поведение овсяного напитка, также имеющего высокое соотношение белков к жирам (равное единице), может быть обусловлено высокой концентрацией углеводов, количество и профиль которых могут влиять на пенообразование [38]. Напротив, соево-миндальный, рисово-фундуковый и рисово-конопляный напитки, имеющие более низкие соотношения белков к жирам (0,3–0,5), производили достоверно меньшее количество пены путем смешивания при температуре 65 °C. Вероятно, эта тенденция наблюдалась бы и в случае кокосового напитка (белки/жиры ≈ 0,2), если бы густая консистенция не ограничила его вспенивание при 10 °C. По-видимому, при достаточной концентрации жиры начинают участвовать в пенообразовании. При паровой обработке пены могут стабилизироваться гидрофильными белками и жидкими

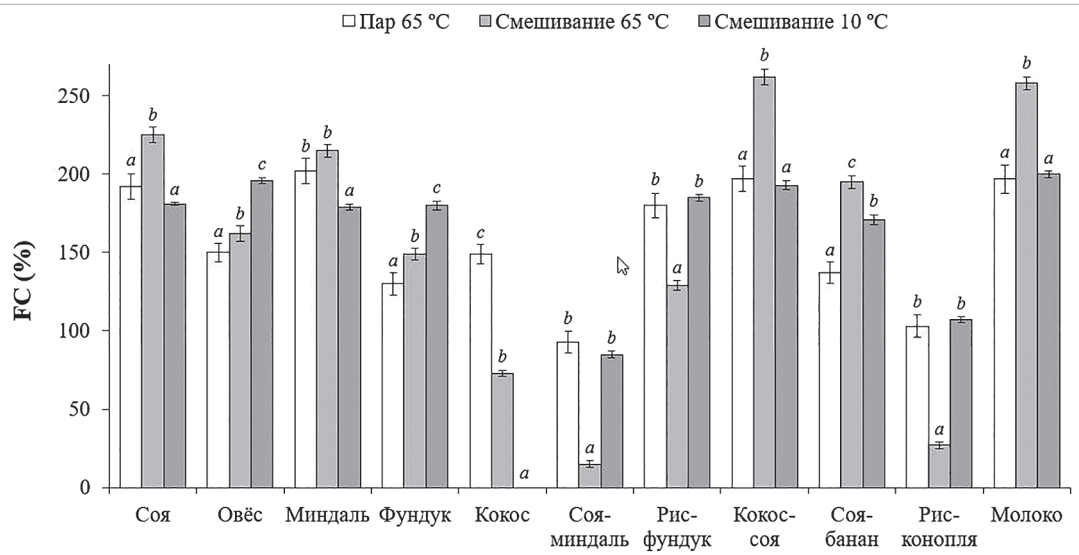


Рисунок 1. **Пенообразующая способность (FC) напитков на растительной основе и коровьего молока. Планки указывают на границы стандартного отклонения. Разные и одинаковые буквы указывают на значительные ($p < 0,05$) и незначительные ($p \geq 0,05$) различия в пределах одного напитка соответственно.**

Figure 1. **Foaming capacity (FC) of plant-based beverages and cow's milk. The bars indicate the standard deviation boundaries. Different and same letters indicate significant ($p < 0,05$) and non-significant ($p \geq 0,05$) differences within the same beverage, respectively**

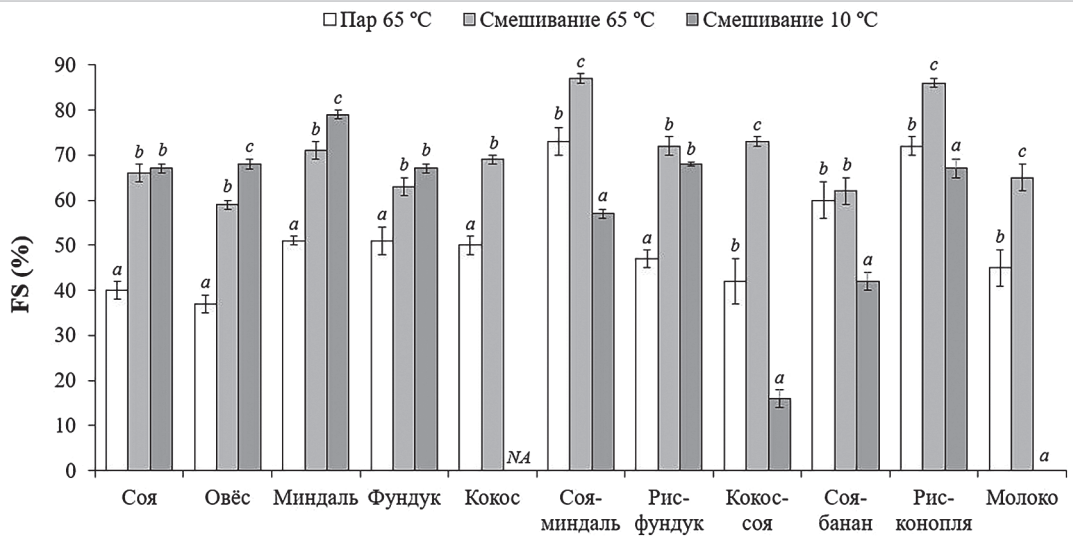


Рисунок 2. **Стабильность пен (FS) напитков на растительной основе и коровьего молока. Планки указывают на границы стандартного отклонения. Разные и одинаковые буквы указывают на значительные ($p < 0,05$) и незначительные ($p \geq 0,05$) различия в пределах одного напитка соответственно**

Figure 2. **Foam stability (FS) of plant-based beverages and cow's milk. The bars indicate the standard deviation boundaries. Different and same letters indicate significant ($p < 0,05$) and non-significant ($p \geq 0,05$) differences within the same beverage, respectively**

жирами, поскольку первые не нуждаются в самоорганизации, а вторые достаточно активны с точки зрения адсорбции на границе раздела. Низкая пенообразуемость растительных напитков в результате смешивания при 65 °C может быть связана с конкурентной адсорбцией белков и жидких жиров на границе раздела. В случае смешивания при 10 °C стабилизация пен белками, вероятно, преобладает над дестабилизацией пен кристаллизованными жирами [5,6,34–37]. Специфическое поведение миндального и фундукового напитков, также имеющих низкие соотношения белков к жирам (около 0,3), может быть обусловлено присутствием стабилизаторов и эмульгаторов (в данном случае неизвестной концентрации), которые могут участвовать в образовании пены [17].

Данные для растительных напитков (исключая молоко) были использованы в корреляционном анализе, результаты которого представлены в Таблице 3. Пенообразующие свойства растительных напитков не коррелировали с содержанием большинства питательных веществ (белками, соотношением белков к жирам, углеводами, пищевыми волокнами и кальцием), а также с изученными физико-химическими показателями (pH, плотностью, общими сухими веществами и ОСП). Однако была обнаружена отрицательная корреляция жиров с FC растительных напитков после смешивания при температуре 65 °C ($r = -0,81$, $p = 0,005$) и 10 °C ($r = -0,64$, $p = 0,047$), аналогичная тенденция наблюдалась и в случае инъекции пара при 65 °C ($r = -0,58$, $p = 0,080$). Концентрация жиров была также положительно связана с FS растительных напитков после смешивания при температуре 65 °C ($r = 0,67$, $p = 0,034$). Среди нецелевых корреляций следует отметить положительную связь концентрации углеводов с плотностью (r = 0,79, $p = 0,007$) и концентрации жиров с ОСП ($r = 0,84$, $p = 0,002$), о которых сообщалось в ранее опубликованных исследованиях [31,33]. Вопреки данным предыдущего исследования [10], мы не выявили корреляции между содержанием белков и пенообразующими свойствами растительных напитков при всех протестированных способах вспенивания, что, по-видимому, связано с отличиями в составе исследуемой выборки. В этой работе анализировались напитки на растительной основе типа «Barista», содержащие в составе стабилизаторы и эмульгаторы природного происхождения (Таблица 1).

Таблица 3. **Корреляционная матрица**

Table 3. **Correlation matrix**

Параметры	Белки	Жиры	Белки / жиры	Углеводы	Волокна	Ca	pH	Плотность	Сухие вещества	ОСП	FC-1	FC-2	FC-3	FS-1	FS-2	FS-3
Белки	1	−0,38	**0,95**	0,07	0,38	0,09	−0,27	0,39	−0,27	−0,03	−0,03	0,25	0,20	0,01	−0,20	−0,27
Жиры		1	**−0,64**	0,04	−0,51	−0,06	−0,32	0,01	0,60	**0,84**	−0,58	**−0,81**	**−0,64**	0,62	**0,67**	0,20
Белки / жиры			1	0,06	0,52	0,10	−0,18	0,34	−0,37	−0,30	0,19	0,49	0,37	−0,24	−0,46	−0,24
Углеводы				1	0,12	0,27	−0,25	**0,79**	0,52	0,03	−0,34	−0,21	0,23	−0,11	−0,17	0,19
Волокна					1	0,42	−0,08	0,02	−0,31	−0,16	0,46	0,46	0,40	−0,61	−0,46	0,38
Ca						1	0,34	0,04	−0,21	−0,11	0,33	0,32	0,33	−0,23	0,10	0,05
pH							1	−0,37	**−0,65**	−0,40	0,58	0,43	0,47	−0,16	0,24	−0,19
Плотность								1	0,47	0,15	−0,30	−0,04	0,38	−0,06	−0,31	−0,04
Сухие вещества									1	0,45	−0,47	−0,55	−0,46	0,07	−0,08	0,19
ОСП										1	−0,44	−0,59	−0,45	0,45	0,56	0,25
FC-1											1	**0,83**	0,49	**−0,78**	−0,43	−0,09
FC-2												1	**0,73**	**−0,73**	**−0,64**	−0,35
FC-3													1	−0,48	−0,44	−0,10
FS-1														1	**0,75**	0,05
FS-2															1	−0,03
FS-3																1

Примечание: ОСП — общее содержание полифенолов; FC-1, FC-2 и FC-3 — пенообразующая способность после впрыскивания пара при температуре 65 °C, механического перемешивания при температуре 65 °C и 10 °C соответственно; FS-1, FS-2 и FS-3 — стабильность пены после впрыскивания пара при температуре 65 °C, механического перемешивания при температуре 65 °C и 10 °C соответственно. Жирным шрифтом выделены статистически значимые ($p < 0,05$) значения коэффициента линейной корреляции Пирсона.

Note: ОСП — total polyphenol content; FC-1, FC-2 and FC-3 — foaming capacity after steam injection at a temperature of 65 °C, mechanical agitation at a temperature of 65 °C and 10 °C, respectively; FS-1, FS-2 and FS-3 — foam stability after steam injection at a temperature of 65 °C, mechanical agitation at a temperature of 65 °C and 10 °C, respectively. Bold type indicates statistically significant ($p < 0.05$) values of the Pearson linear correlation coefficient.

Помимо придания текстуры эти пищевые добавки обеспечивают коллоидную стабильность растительных напитков [21], в том числе при добавлении в растворы горячего кофе [39,40]. Однако текущие исследования указывают на то, что камеди и каррагинаны могут стабилизировать пены по механизму высокомолекулярных поверхностно-активных веществ наряду с белками, тогда как лецитины и сапонины могут стабилизировать пены по механизму низкомолекулярных поверхностно-активных веществ наряду с жирами [17]. Сообщалось, что в оптимизированных условиях (pH, вязкость, поверхностное натяжение, соотношение белок/стабилизатор и т. д.) камеди и каррагинаны могут быть синергистами белковых молекул в пенообразовании [41,42]. По-видимому, в исследуемых растительных напитках стабилизаторы выступают синергистами белков в пенообразовании, что обусловливает отсутствие корреляции между содержанием белков и пенообразующими свойствами. Стабилизирующие эффекты эмульгаторов, вероятно, выражены достаточно слабо, что обуславливает наличие корреляции между содержанием жиров и пенообразующими свойствами растительных напитков.

4. Выводы

В этой работе исследовались физико-химические и пенообразующие свойства напитков на растительной основе и коровьего молока для приготовления капучино, имеющих маркировку Barista на упаковке. Вспенивание образцов проводили методами впрыска пара (65 °C) и механического перемешивания (65 °C и 10 °C), моделирующих условия приготовления горячих и холодных кофейных напитков. Полученные пены анализировали по показателям пенообразующей способности (FC) и стабильности (FS). Проанализированный кокосовый напиток вспенивался при температуре 65 °C, но не вспенивался при 10 °C, предположительно, вследствие густоты консистенции и повышенной вязкости. С точки зрения количества и стабильности пен все растительные напитки были жизнеспособными альтернативами молоку для приготовления капучино в случае впрыскивания пара, но не в случае механического перемешивания. Пенообразующие свойства растительных напитков не коррелировали с содержанием большинства питательных веществ (белками, соотношением белков к жирам, углеводами, пищевыми волокнами, кальцием) и с изученными физико-химическими показателями (pH, плотностью, общими сухими веществами и общим содержанием полифенолов). Однако была обнаружена отрицательная корреляция между содержанием жиров и FC растительных напитков при смешивании ($p < 0,05$), аналогичная тенденция наблюдалась и в случае инъекции пара ($p = 0,08$). Отсутствие связи между содержанием белков и характеристиками пены подчеркивает сложность контроля последних в профессиональных растительных напитках и, вероятно, обусловлено синергизмом белков и стабилизаторов в пенообразовании. Результаты этой работы могут быть полезны академическому и индустриальному сообществам. Будущие исследования должны стимулировать изучение эффектов камедей, каррагинанов и других высокомолекулярных стабилизаторов природного происхождения в пенообразовании. Производителям может быть рекомендовано контролировать пенообразующие свойства растительных напитков при температурах, характерных для приготовления холодных кофейных напитков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Market Research Intellect. (2025). Cappuccino / Cafe Latte Market. Retrieved from https://www.marketresearchintellect.com/product/global-cappuccino-sales-market/ / https://www.marketresearchintellect.com/product/global-cafe-latte-coffee-market-size-and-forecast/. Accessed April 30, 2025.
2. Dataintelo. (2025). Cappuccino / Cafe Latte Market. Retrieved from https://dataintelo.com/report/global-cappuccino-market / https://dataintelo.com/report/cafe-latte-coffee-market. Accessed April 30, 2025.
3. McClements, D. J., Newman, E., McClements, I. F. (2019). Plant-based milks: A review of the science underpinning their design, fabrication, and performance. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 2047–2067. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12505
4. Paul, A. A., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R. (2020). Milk analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(18), 3005–3023. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1674243
5. Ho, T. M., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2022). Functionality of bovine milk proteins and other factors in foaming properties of milk: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4800–4820. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1879002
6. Nylander, T., Arnebrant, T., Bos, M., Wilde, P. (2008). Protein/emulsifier interactions. Chapter in a book: Food Emulsifiers and Their Applications. New York (NY): Springer-Verlag. 2008. https://doi.org/10.1007/978-0-387-75284-6_5
7. Ho, T. M., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2024). Foaming properties of milk samples collected at various processing stages in a dairy processing factory across two seasons. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1470–1478. https://doi.org/10.1002/jsfa.13031
8. Zakidou, P., Paraskevopoulou, A. (2021). Aqueous sesame seed extracts: Study of their foaming potential for the preparation of cappuccino-type coffee beverages. *LWT*, 135, Article 110258. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110258
9. Zakidou, P., Varka, E.-M., Paraskevopoulou, A. (2022). Foaming properties and sensory acceptance of plant-based beverages as alternatives in the preparation of cappuccino style beverages. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30, Article 100623. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100623
10. Kopf-Bolanz, K. A., Villarreal Cruz, M. C., Walther, B., Denkel, C., Guggisberg, D. (2023). Comparison of physicochemical properties of commercial UHT-treated plant-based beverages and cow's milk. *Agrarforschung Schweiz*, 14, 43–56. https://doi.org/10.34776/afs14-43e
11. Hassan, L., Reynoso, M., Xu, C., Al Zahabi, K., Maldonado, R., Nicholson, R. A. et al. (2024). The bubbly life and death of animal and plant milk foams. *Soft Matter*, 20(41), 8215–8229. https://doi.org/10.1039/D4SM00518J
12. Chen, M., Bleeker, R., Sala, G., Meinders, M. B. J., van Valenberg, H. J. F., van Hooijdonk, A. C. M. et al. (2016). Particle size determines foam stability of casein micelle dispersions. *International Dairy Journal*, 56, 151–158. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.01.020
13. Moll, P., Salminen, H., Griesshaber, E., Schmitt, C., Weiss, J. (2022). Homogenization improves foaming properties of insoluble pea proteins. *Journal of Food Science*, 87(10), 4622–4635. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16320
14. Rüegg, R., Schmid, T., Hollenstein, L., Müller, N. (2022). Effect of particle characteristics and foaming parameters on resulting foam quality and stability. *LWT*, 167, Article 113859. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113859
15. Day, L., Cakebread, J. A., Loveday, S. M. (2022). Food proteins from animals and plants: Differences in the nutritional and functional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 119, 428–442. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.020
16. Schwingshackl, L., Heseker, H., Kiesswetter, E., Koletzko, B. (2022). Reprint of: Dietary fat and fatty foods in the prevention of non-communicable diseases: A review of the evidence. *Trends in Food Science and Technology*, 130, 20–31. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.10.011
17. Hu, X., Meng, Z. (2024). An overview of edible foams in food and modern cuisine: Destabilization and stabilization mechanisms and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), Article e13284. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13284
18. Dikeman, C. L., Fahey Jr., G. C. (2006). Viscosity as related to dietary fiber: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(8), 649–663. https://doi.org/10.1080/10408390500511862
19. Silva, J. V. C., Balakrishnan, G., Schmitt, C., Chassenieux, C., Nicolai, T. (2018). Heat-induced gelation of aqueous micellar casein suspensions as affected by globular protein addition. *Food Hydrocolloids*, 82, 258–267. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.002
20. Gupta, A., Keast, R., Liem, D. G., Jadhav, S. R., Mahato, D. K., Gamlath, S. (2025). Barista-quality plant-based milk for coffee: A comprehensive review of sensory and physicochemical characteristics. *Beverages*, 11(1), Article 24. https://doi.org/10.3390/beverages11010024
21. Dhankhar, J., Kundu, P. (2021). Stability aspects of non-dairy milk alternatives. Chapter in a book: Milk Substitutes — Selected Aspects. London: IntechOpen. 2021. https://doi.org/10.5772/intechopen.96376
22. Pua, A., Tang, V. C. Y., Goh, R. M. V., Sun, J., Lassabliere, B., Liu, S. Q. (2022). Ingredients, processing, and fermentation: Addressing the organoleptic boundaries of plant-based dairy analogues. *Foods*, 11(6), Article 875. https://doi.org/10.3390/foods11060875
23. Arshad, M., Sharma, N., Maibam, B. D., Sharma, M. (2024). Review on effect of innovative technologies on shelf-life extension of non-dairy sources from plant matrices. *Food Chemistry Advances*, 5, Article 100781. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100781
24. Taesuk, N., Wang, A., Srikaew, M., Chumroenphat, T., Barile, D., Siriamornpun, S. et al. (2025). Phytochemical profiling of Thai plant-based milk alternatives: Insights into bioactive compounds, antioxidant activities, prebiotics, and amino acid abundance. *Food Chemistry: X*, 27, Article 102402. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102402
25. Ho, T. M., Le, T. H. A., Yan, A., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2019). Foaming properties and foam structure of milk during storage. *Food Research International*, 116, 379–386. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.051
26. Roy, S., Rathod, G., Amamcharla, J. (2025). Foaming capacity and stability. Chapter in a book: Plant-Based Proteins. Production, Physicochemical, Functional, and Sensory Properties. New York (NY): Humana. 2024. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4272-6_25
27. Иванова, С. А. (2018). Пенообразующие свойства концентрата белков обезжиренного молока. *Техника и технология пищевых производств*, 48(4), 12–21. [Ivanova, S. A. (2018). The foaming properties of skim milk protein concentrate. *Food Processing: Techniques and Technology*, 48(4), 12–21. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-12-21
28. Ho, T. M., Xiong, X., Bhandari, B. R., Bansal, N. (2024). Foaming properties and foam structure of milk determined by its protein content and protein to fat ratio. *Food and Bioprocess Technology*, 17, 4665–4678. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03407-y
29. Ye, J., Deng, L., Wang, Y., McClements, D. J., Luo, S., Liu, C. (2021). Impact of rutin on the foaming properties of soybean protein: Formation and characterization of flavonoid-protein complexes. *Food Chemistry*, 362, Article 130238. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130238

30. Wen, H., Zhang, D., Ning, Z., Li, Z., Zhang, Y., Liu, J., Zhang, T. (2023). How do the hydroxyl group number and position of polyphenols affect the foaming properties of ovalbumin? *Food Hydrocolloids*, 140, Article 108629. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108629
31. Daszkiewicz, T., Florek, M., Murawska, D., Jabłońska, A. (2024). A comparison of the quality of ultra-high-temperature milk and its plant-based analogs. *Journal of Dairy Science*, 107(12), 10299–10309. https://doi.org/10.3168/jds.2024-25098
32. Kasapidou, E., Basdagianni, Z., Papatzimos, G., Papadopoulos, V., Tsiftsi, E., Neki, I. et al. (2023). Chemical composition, antioxidant profile and physicochemical properties of commercial non-cocoa- and cocoa-flavoured plant-based milk alternatives. *European Food Research and Technology*, 249, 3011–3026. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04345-3
33. Ertan, K., Bayana, D., Gokce, O., Alatossava, T., Yilmaz, Y., Gursoy, O. (2017). Total antioxidant capacity and phenolic content of pasteurized and UHT-treated cow milk samples marketed in Turkey. *Akademik Gıda*, 15(2), 103–108. https://doi.org/10.24323/akademik-gida.333630
34. Kamath, S., Huppertz, T., Houlihan, A. V., Deeth, H. C. (2008). The influence of temperature on the foaming of milk. *International Dairy Journal*, 18(10–11), 994–1002. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.05.001
35. Delahaije, R. J. B. M., Wierenga, P. A. (2022). Hydrophobicity enhances the formation of protein-stabilized foams. *Molecules*, 27(7), Article 2358. https://doi.org/10.3390/molecules27072358
36. Zhang, X., Liu, Z., Ma, X., Zheng, Y., Hu, H., Jiao, B. et al. (2025). Interfacial and foaming properties of plant and microbial proteins: Comparison of structure-function behavior of different proteins. *Food Chemistry*, 463(Part 4), Article 141431. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141431
37. Martin, A. H., Grolle, K., Bos, M. A., Stuart, M. A. C., van Vliet, T. (2002). Network forming properties of various proteins adsorbed at the air/water interface in relation to foam stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 254(1), 175–183. https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8592
38. Farrag, A. F. (2008). Emulsifying and foaming properties of whey protein concentrates in the presence of some carbohydrates. *International Journal of Dairy Science*, 3(1), 20–28. https://doi.org/10.3923/ijds.2008.20.28
39. Chung, C., Koo, C. K.W., Sher, A., Fu, J.-T. R., Rousset, P., McClements, D. J. (2019). Modulation of caseinate-stabilized model oil-in-water emulsions with soy lecithin. *Food Research International*, 122, 361–370. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.032
40. Koo, C. K.W., Chung, C., Fu, J.-T. R., Sher, A., Rousset, P., McClements, D. J. (2019). Impact of sodium caseinate, soy lecithin and carrageenan on functionality of oil-in-water emulsions. *Food Research International*, 123, 779–789. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.05.043
41. Mohanan, A., Nickerson, M. T., Ghosh, S. (2020). Utilization of pulse protein-xanthan gum complexes for foam stabilization: The effect of protein concentrate and isolate at various pH. *Food Chemistry*, 316, Article 126282. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126282
42. Proaño, J. L., Pérez, A. A., Drago, S. R. (2023). Foaming properties are improved by interactions between brewer's spent grain proteins and carrageenans in aqueous solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(5), 2585–2592. https://doi.org/10.1002/jsfa.12291

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Тарасов Алексей Валерьевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-инновационный центр сенсорных технологий, Уральский государственный экономический университет 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45 Тел.: +7–343–283–11–65 E-mail: tarasov_a.v@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7642-6532	**Aleksey V. Tarasov**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Scientific and Innovative Center for Sensor Technologies, Ural State University of Economics 62/45, 8 Marta/Narodnoy Voli str., 620144, Yekaterinburg, Russia Tel.: +7–343–283–11–65 E-mail: tarasov_a.v@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7642-6532
Заворохина Наталия Валерьевна — доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра технологии питания, Уральский государственный экономический университет 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45 Тел.: +7–343–283–12–72 E-mail: degustator@olympus.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5458-8565 * автор для контактов	**Natalia V. Zavorokhina**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Food Technology Department, Ural State University of Economics 62/45, 8 Marta/Narodnoy Voli str., 620144, Yekaterinburg, Russia Tel.: +7–343–283–12–72 E-mail: degustator@olympus.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5458-8565 * corresponding author
Чугунова Ольга Викторовна — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой технологии питания, Уральский государственный экономический университет 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45 Тел.: +7–343–283–12–72 E-mail: chugun.ova@yndex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7039-4047	**Olga V. Chugunova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Food Technology Department, Ural State University of Economics 62/45, 8 Marta/Narodnoy Voli str., 620144, Yekaterinburg, Russia Tel.: +7–343–283–12–72 E-mail: chugun.ova@yndex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7039-4047
Вяткин Антон Владимирович — кандидат технических наук, доцент, кафедра туристического бизнеса и гостеприимства, Уральский государственный экономический университет 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45 Тел.: +7–343–283–12–01 E-mail: 3dognight2009@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0214-2398	**Anton V. Vyatkin**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Tourism Business and Hospitality Department, Ural State University of Economics 62/45, 8 Marta/Narodnoy Voli str., 620144, Yekaterinburg, Russia Tel.: +7–343–283–12–01 E-mail: 3dognight2009@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0214-2398

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The authors are equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.