Volume 7, Issue 3, 2024

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 30.09.2024.
Дата выхода в свет 02.10.2024.
Тираж 300 экз. Заказ № 558.

16+

© ФНЦПС, 2024
© Авторы, 2024

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 30.09.2024.
Released from press 02.10.2024.
Circulation — 300 copies. Order № 558.

16+

© FNCPS, 2024
© Authors, 2024

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

Колпакова В. В., Бызов В. А.
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ. ОБЗОР 324

Полубесова М. А., Мечтаева Е. В., Чернов А. Д., Ситнов В. Ю., Журавлева А. З.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛКА В РАЦИОНАХ ПЕРЕПЕЛОВ: ОБЗОР 336

Черных В. Я., Алексеенко Е. В., Сметанин Д. О., Балуян Х. А., Печникова Ю. Ю.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЯКИША ПШЕНИЧНОГО ХЛЕБА 345

Ушкалова А. А., Чжан Т., Баочэнь Л.
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИГИДРОКВЕРЦЕТИНА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 355

Sayed S. Smuda, Reda M. Mohamed, Tarek G. Abedelmaksoud
DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE PASTA WITH CHICKPEAS AS A WHEAT FLOUR SUBSTITUTE AND FORTIFIED WITH CAROB, BEETROOT, AND SPINACH 363

Беляева Л. И., Пружин М. К., Остапенко А. В., Власенко А. С.
ДИОКСИД СЕРЫ В БЕЛОМ САХАРЕ: ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ, РЕФЕРЕНТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ 368

Ситникова П. Б., Казакова Н. В.
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПАРТИКУЛЯТОВ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОРОЖЕНОГО И ДРУГИХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ 375

Абрамова Л. С., Козин А. В., Гусева Е. С.
НОВЫЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА: РИСКИ ПРИ МИГРАЦИИ ЛОСОСЕВЫХ ВИДОВ РЫБ. ОБЗОР 384

Мяленко Д. М.
МИКРОПЛАСТИКИ: ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ (ПРЕДМЕТНЫЙ ОБЗОР) 394

Царин С. А., Столярчук Н. М., Кузнецов А. В.
АЛЛЕРГИЯ НА ВОДНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ КАК ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ 403

Сорокина Н. П., Кучеренко И. В., Бруцкая А. Л.
ЛАКТОБАЦИЛЛЫ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КУЛЬТУРЫ В СЫРОДЕЛИИ 410

Баскаков А. В., Зайцева Л. В., Мистенева С. Ю., Рубан Н. В.
МИРОВАЯ ПРАКТИКА КЛАССИФИКАЦИИ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ 420

Посокина Н. Е., Бессараб О. В., Карастоянова О. В., Коровкина Н. В.
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МАРКЁРОВ КАЧЕСТВА ШАМПИНЬОНОВ (*AGARICUS BISPORUS*) 427

Abdalla S. M. Ammar, Youssef M. Riyad, Azza A. A. Ebrahiem
UTILIZATION OF ARTICHOKE (*CYNARA SCOLYMUS* L.) BY-PRODUCTS FOR ENHANCING THE NUTRITIONAL VALUE AND PHYTOCHEMICAL CONTENT OF COOKIES 438

Мелешкина Е. П., Ванина Л. В., Витол И. С.
АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ О ЗЕРНЕ. ОБЗОР 444

Голуб О. В., Мотовилов О. К., Мотовилова Н. В., Давыденко Н. И.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЯГОД КРЫЖОВНИКА 454

Е. С. Семенова, Е. С. Симоненко, С. В. Симоненко, С. Н. Зорин, В. К. Мазо
ГИДРОЛИЗАТЫ БЕЛКОВ КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА. ИММУНОХИМИЧЕСКАЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА 466

Макаров В. Н., Садыков А. Р., Четверикова Д. К.
ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ МЯСА В ПЕЛЬМЕНЯХ НА ВРЕМЯ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ 473

Топникова Е. В., Мягконосов Д. С., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г.
КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА 481

Nawal K. Z. AlFadhly, Anfal Alwan Al-Temimi, Zina T. Alkanan, Ammar B. Altemimi, Mohamed Ibrahim Younis, Angelo Maria Giuffrè, Tarek Gamal Abedelmaksoud
SUSTAINABLE AGRICULTURE DEVELOPMENT FOR FOOD SAFETY AND NUTRITION 491

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335

Поступила 02.04.2024
Поступила после рецензирования 09.07.2024
Принята в печать 15.07.2024
© Колпакова В. В., Бызов В. А., 2024

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

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ. ОБЗОР

Колпакова В. В.*, Бызов В. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, Красково, Московская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *бобовые, зерновые, масличные, полипептиды, физико-химические показатели, функциональные свойства, биологические свойства, взаимосвязь, регулирование*

АННОТАЦИЯ

Белковые препараты из растительного сырья широко применяются в пищевой промышленности в качестве улучшителей, заменителей или обогатителей продуктов. Однако их функциональные свойства, как правило, менее выражены, чем у белков животного происхождения. Цель обзора заключалась в анализе и обобщении результатов исследований, посвященных изучению и характеристике основных функциональных свойств растительных белков (гидратация, растворимость, водо-, жиросвязывающая и гелеобразующая способности, стабильность эмульсий, пен, реологические свойства, текстурирование) и их модификации. Объектом исследования служили научные публикации, большинство из которых опубликовано в 2017–2024 годах. Проводилась характеристика функциональных свойств белков, выявлялась их зависимость от природы и сорта культуры, от методов выделения, от технологических факторов обработки и от способов модификации. Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, PubMed. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением. Особое внимание уделено химическим, физическим, физико-химическим и ферментативным способам модификаций свойств белков, их достоинствам, недостаткам, а также взаимосвязи структурных и физико-химических особенностей белков с их функциональными свойствами. Выявлены основные закономерности влияния способов модификации на вторичную, третичную структуру белков, на поверхностную гидрофобность, на соотношение из фракций, на агрегацию, на денатурацию и на биологическую активность, полученные современными методами исследования (ИК-спектроскопия, флуоресцентная микроскопия, SDS–ПААГ, круговой дихроизм, спектрофотометрия и т. д.). Сделан вывод о том, что в связи с расширением производства белковых препаратов из альтернативного сырья (горох, нут, подсолнечник, фасоль, рис и т. д.) необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение взаимосвязи молекулярно-структурных особенностей белков с показателями функциональности и с закономерностями их поведения в пищевых системах. На основе выявленных и вновь получаемых теоретических сведений возможна целенаправленная модификация и регуляция свойств белковых ингредиентов для производства пищевых продуктов высокого качества.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках задания FGGM-2022-00006 ВНИИК — филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А. Г. Лорха» «Разработать научно-практические основы технологии производства новых углеводных и белковых компонентов их крахмалосодержащего сырья на основе системного анализа их состава и свойств для глубокой переработки картофеля, зернового и зернобобового сырья».

Received 02.04.2024
Accepted in revised 09.07.2024
Accepted for publication 15.07.2024
© Kolpakova V. V., Byzov V. A., 2024

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

FUNCTIONAL CHARACTERISTICS AND MOLECULAR STRUCTURAL MODIFICATION OF PLANT PROTEINS. REVIEW

Valentina V. Kolpakova*, Vasily A. Byzov

All-Russian Research Institute of Starch and Starch — containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia

KEY WORDS: *hydrocolloids, visco-elastic characteristics, structure, air phase, ice crystals*

ABSTRACT

Protein preparations from plant raw materials are widely used in the food industry as improvers, replacers or enrichers for products. However, their functional properties, as a rule, are less pronounced than those of proteins of animal origin. The aim of the review is to analyze and summarize the results of investigations dedicated to studying and characterizing the main functional properties of plant proteins (hydration, solubility, water binding capacity, fat binding capacity and gel-forming capacity, stability of emulsions, foams, rheological properties, texturization) and their modification. The objects of the research were scientific publications, most of which were published in 2017–2024. Functional properties of proteins were characterized; their dependence on the nature and variety of crop, methods of extraction, technological factors of processing and methods of modification was revealed. The search and selection of papers were carried out in the bibliographic databases eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, and PubMed. Data analysis was performed with their systematization, generalization, intermediate conclusions and general conclusion. The special attention was paid to chemical, physical, physico-chemical and enzymatic methods for modification of protein properties, their advantages and disadvantages, as well as the interrelation of structural and physico-chemical features of proteins with their functional properties. The main regularities were revealed for an effect of modification methods on the secondary and tertiary structures of proteins, surface hydrophobicity, the ratio from fractions, aggregation, denaturation and biological activity obtained by the modern methods of investigations (IR-spectroscopy, fluorescent microscopy, SDS-PAGE, circular dichroism, spectrophotometry and so on). It has been concluded that it is necessary to carry out further investigations aimed to studying interrelation of molecular

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Колпакова, В. В., Бызов, В. А.** (2024). Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 324–335. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335

FOR CITATION: **Kolpakova, V. V., Byzov, V. A.** (2024). Functional characteristics and molecular structural modification of plant proteins. Review. *Food Systems*, 7(3), 324–335. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335

structural features of proteins with indicators of functionality and regularities of their behavior in food systems due to an increase in the production of protein preparations from alternative raw materials (pea, chickpea, sunflower, kidney bean, rice and others). Based on the revealed and newly obtained theoretical information, the targeted modification and regulation of properties of protein ingredients for production of high-quality foods are possible.

FUNDING: The research was carried out within the framework of assignment FGGM-2022–00006 VNIIK — a branch of the Federal State Budgetary Institution "Financial Research Center for Potatoes named after A. G. Lorkha" "To develop scientific and practical foundations for the production technology of new carbohydrate and protein components of their starch-containing raw materials based on a systematic analysis of their composition and properties for deep processing of potatoes, grain and leguminous raw materials".

1. Введение

Белки — один из важнейших и обязательных компонентов здорового и полноценного питания. Их недостаток может привести к негативным последствиям для здоровья, таким как снижение иммунитета, развитие сахарного диабета, сердечно-сосудистых заболеваний, нарушение функции почек, возникновение аллергических реакций, задержка роста и т. д. [1]. Пищевой растительный белок способен повышать биологическую ценность продуктов питания за счет обязательных аминокислот, заменять дорогостоящие и дефицитные животные белковые продукты с одновременным улучшением технологических показателей качества изделий. Использование растительных белков в производстве продуктов питания возможно только благодаря их уникальным функциональным свойствам, особенностям и способности взаимодействовать с различными факторами пищевых систем [2]. Поэтому сведения относительно физико-химических характеристик белков, способов модификаций в соответствии с особенностями их структуры необходимы для обеспечения внешнего вида и консистенции пищевых продуктов при разработке конкурентоспособных рецептур для их эффективного сбыта.

Цель обзора — анализ и обобщение исследований, направленных на изучение функциональных свойств пищевых белковых препаратов из различного вида растительного сырья. Также в работе представлена характеристика этих препаратов, включая описание взаимосвязи их свойств с физико-химическими и структурными особенностями белков, а также с различными способами модификаций.

Задачи обзора — осуществить сбор литературных данных в соответствии с целью обзора, отобрать цитируемые и достоверные источники; охарактеризовать наиболее значимые функциональные свойства белковых препаратов для пищевых систем, их зависимость от структуры белков, от технологических факторов и от способов модификаций, а также обобщить результаты по перспективам использования для регулирования и улучшения значений функциональных свойств.

2. Материалы и методы

В качестве материала для исследования использованы научные публикации, отбираемые по следующим критериям: год издания (2019–2024), география изданий, цитируемость, достоверность результатов относительно характеристик функциональных свойств растительных белковых препаратов, влияния на них различных факторов и модификаций.

Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, PubMed, после чего был выполнен анализ полученных результатов с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Виды белковых препаратов

В зависимости от содержания белка белковые препараты подразделяются на три группы: мука, концентраты, изоляты. С использованием этих групп организовано производство и маркетинг текстурированных, модифицированных и специализированных белковых препаратов [2]. Мука и крупа производятся путем измельчения семян до определенного размера частиц с последующим их просеиванием на мельничном оборудовании (молотковые дробилки, вихревые мельницы, классификаторы). Гранулометрический состав контролируется воздушной сепарацией и определенными номерами сит. В муке (крупе) содержится 40–50% белка (N × 6,25) от массы продукта. Все виды отличаются по содержанию жира (обезжиренная, необезжиренная), по размеру частиц, по степени тепловой обработки, по коэффициентам растворимости азота (КРА) и по диспергируемости белка (КДБ) [3]. Продукты, например, из сои отличаются по активности липоксигеназы, уреазы, ингибиторов протеаз. Тостированная мука представляет собой продукт, обработанный паром при небольшом давлении, а иногда и, нагреванием. Экструдированная мука является продуктом, подвергнутым сдвиговым деформациям в экструдерах разной конформации с последующей варкой и охлаждением. Обезжиренные белковые продукты вырабатываются из семян путем отделения от них оболочки с последующей обработкой гексаном [3].

Белковые концентраты содержат 60–75% белка на сухое вещество (N × 6,5) [2]. Отличительной особенностью состава является присутствие углеводов, например, полисахаридов или олигосахаридов в количестве не более 8%. Технологии концентратов предусматривают очистку белков: промывку, например, кислотой при pH 4,5 или 20–80%-ным раствором этанола, денатурацию их влаготепловой обработкой с последующей экстракцией водой [3]. Функциональные свойства белков улучшают обработкой паром или гомогенизацией. В последние годы для технологий концентратов, помимо традиционной сои, используют нетрадиционное растительное сырье (амарант, лен, подсолнечник и т. д.), а также биокатализ с преимуществами безопасности и функциональных свойств препаратов.

Изоляты являются наиболее очищенной формой белковых препаратов, так как содержат не менее 90% белка на сухое вещество. Белки обычно экстрагируются слабощелочным раствором (pH 8–11), осаждаются в изоэлектрической точке (4,2–4,5), отделяются от углеводов и других соединений в виде творожистой массы, промываются, нейтрализуются до pH 6,8 и сушатся [2,3]. Эффективно использование мембранных технологий для очистки и выделения белков.

Текстурированные продукты придают пищевым изделиям волокнистую или многослойную (кускообразную) структуру [3]. После гидратации препараты по структуре напоминают мясо, птицу, морские продукты и используются для производства аналогов традиционных продуктов. Под влиянием температуры, увлажнения и механического воздействия при термопластической экструзии молекулы белка формируют многослойную массу с новыми поперечными связями.

Модифицированные белки получают из белковых продуктов с протеолитическими или иными ферментными препаратами микробиологического, растительного (папаин, бромелайн), животного происхождения (пепсин, химотрипсин, химозин) или кислотного гидролиза. Они используются как функциональные и вкусовые добавки к пище.

Сухая пшеничная клейковина (СПК) получается водной экстракцией небелковых и растворимых белковых компонентов из зерна пшеницы на специализированных предприятиях или заводах крахмального производства. Известно около 15 схем процесса получения СПК, различающихся по виду исходного сырья (зерно, мука), по методу отделения белка от крахмала (механический, ферментативный, химический), по качеству продукта (денатурированная, неденатурированная СПК) и по способу его получения (из теста, мучной болтушки). Предусматривается отделение крахмала и сушка продукта (кольцевые или пневматические сушилки типа «Ультра-ротор»). Типичный химический состав СПК,% на сухое вещество: влажность 8, белок 77, зола 0,7, растворимые вещества 0,5, клетчатка 0,4, крахмал 18 [2].

3.2. Характеристика функциональных свойств белковых препаратов

Под функциональными свойствами белковых препаратов понимают такие физико-химические характеристики белков, которые определяют их поведение при переработке в пищевые продукты, обеспечивая определенные технологические и потребительские свойства [3]. При этом часть белков замещается или дополняется вводимыми белками в технологических процессах производства. Выражаются функциональные свойства как в численных значениях, так и в профилях зависимостей от технологических факторов (температура, pH среды, время обработки и т. д.) [3]. Данный подход к оценке функциональных свойств нашел отражение в таких терминах, как «функционально-технологические» (ФТС) [4] или «техно-функциональные» [5,6], описывающих особенности процессов производства, хранения и потребления пищевых продуктов. Гидрофильные и гидрофобные группировки в белковых цепях обеспе-

чивают их взаимодействие с водой, жиром, углеводами и с другими соединениями, что приводит к образованию стабильных эмульсий, вязких, пенных, текстурированных и других видов пищевых систем. Наличие в одной полимерной цепи полярных и неполярных, заряженных и незаряженных группировок позволяет белкам вступать в реакции с различными видами соединений и тем самым влиять на качество пищевых изделий.

Наиболее важными ФТС являются: гидратация, растворимость, водосвязывающая способность (ВСС), жиросвязывающая (ЖСС), гелеобразующая (ГОС), пенообразующая способность (ПОС), жироэмульгирующая способность (ЖЭС), стабилизация дисперсных систем (эмульсии, пены, суспензии), адгезионные, реологические свойства (вязкость, эластичность), способность к прядению и текстурированию (образование фибрилл, листов, слоев) [3]. Свойства белков обуславливаются последовательностью аминокислотных остатков в полипептидных цепях, зависящей от их природы (соя, пшеница, горох, рис и т. д.), соотношением гидрофобных/гидрофильных групп, количеством спирализованных вторичной структуры участков, присутствием фенольных соединений, углеводов, липидов и т. д., различной температурой, pH среды и видом обработки сырья (влаготепловая, давление, замораживание, сушка, ультразвук, экструзия, ферменты и т. д.) [7–11]. Так, белковые изоляты нута проявляли различия в функциональных свойствах, имея разный заряд и структуру [7]. Для изолятов всех исследуемых сортов была характерна вторичная структура β-листа. Лучшие ЖЭС свойства демонстрировали изоляты из сортов Hisar и Erzincan, лучшие ПОС – из черного нута и сорта Hisar. Изолят из сорта Yasa с высоким содержанием гидрофобных аминокислот проявлял наибольшую гелеобразующую способность, изоляты из сортов Yasa и Hisar хорошо растворялись в кислой среде, что благоприятно для приготовления напитков. Совместная экструзионно-ферментативно-гидролизная обработка соевых белков изменяла как конформационные, так и функциональные свойства [8]. Менялись молекулярные массы, гидрофобность, увеличивалось количество дисульфидных связей, уменьшалось число –SH групп и поэтому изменялись ЖЭС, ПОС и растворимость. Увеличение эмульгирующей активности и способности к пенообразованию сопровождалось снижением стабильности пены. На примере конских бобов [9] показано, что ультразвуковая обработка при 20 кГц, амплитуде 50–75% и 15–30 минутах воздействия увеличивала ЖСС и ПОС белков. Другими авторами [10] обнаружено, что способы сушки влияли на свойства белковых препаратов. Растворимость, ЖСС и стабильность пены у лиофилизированных нутовых изолятов была выше, чем у образцов, высушенных рефракционной оконной сушкой. Последние, наоборот, имели более высокие ВСС и стабильность эмульсии. У белковой композиции, полученной «сшиванием» из амарантового концентрата и сухой пшеничной клейковины с использованием фермента трансглютаминазы, по сравнению с исходными белками, ВСС повышалась в 1,2–2 раза, ЖСС — в 1,1–1,4 раза, ЖЭС — в 1,15–2 раза, пенообразующие свойства — в 1,1–1,5 раза [11]. Изучение влияния гомогенизации под высоким давлением (ГВД), ультразвуковой обработки (УЗО) и их комбинации повлияло на структуру и на функции горохового изолята. ГВД и УЗО превращали нерастворимые белки в однородную дисперсию с меньшим размером частиц, с развернутой пространственной структурой и с открытыми остатками аминокислот [12]. Структурные изменения приводили к повышению растворимости, ПОС и ЖЭС белков.

Функциональные свойства растительных белковых препаратов из различных видов культур также различаются из-за особенностей структуры белков и их физико-химических свойств. Значения, например, ВСС у концентратов из различных видов и сортов зернобобовых культур (горох, фасоль, чечевица, нут) находились в пределах 0,6–4,9 г/г продукта, при этом белки гороха и нута характеризовались самой высокой ВСС и растворимостью [13]. ЖСС белковых изолятов из фасоли, полевого гороха и вигны варьировалась от 4,7–6,9 г/г, 5,5–7,2 г/г и 1,4–2,0 г/г соответственно. Белковые изоляты, приготовленные из различных линий фасоли (КВ) и полевого гороха (FP), также различались по свойствам [14]. Белки КВ характеризовались большей β-структурой (38,6%) и меньшей α-спиралью (22,8%) по сравнению с белками FP (30,0% и 28,0% соответственно). Молекулярная масса белков КВ была выше, чем у белков FP (~ 330 и ~155 кДа против ~150 кДа). Вследствие этих различий белки КВ обладали более высокой температурой гелеобразования и денатурации. Растворимость, стабильность эмульсии и ПОС зависели от заряда белков, а точка гелеобразования — от количества β-структуры [14]. В работе [15] показано, что изоляты, полученные изоэлектрическим осаждением, имели более высокий поверхностный заряд и растворимость и, как следствие, более высокую эмульгирующую активность по сравнению с изолятами, экстрагированными солью. При этом гороховый изолят имел самую низкую ЖЭС и стабильность эмульсии, что объяснялось высокой гидрофобностью, низкой растворимостью и зарядом. Нутовый и чечевичный изоляты лучше растворялись, они образовывали активные и стабильные эмульсии, что позволило считать их альтернативой соевым изолятам. Различия в функциональных свойствах обнаружены и для белков концентратов из белого и коричневого риса [16]. Установлено, что ЖСС, ВСС и растворимость белков концентратов (БК) из белого риса была на 10–15% выше, чем аналогичные свойства БК из коричневого риса; ПОС была выше почти в 5–6 раз, стабильность пены у БК из коричневого риса отсутствовала. Аналогичные закономерности отмечены и для ферментативных гидролизатов рисовых БК. Объяснением тому служили различия по элементам вторичной структуры, по содержанию фенилкарбоновых кислот, по гидрофобным свойствам, по молекулярным массам компонентов [16].

Одним из самых информативных ФТС белковых препаратов является гидратация [17–19], включающая растворимость и ВСС. Растворимость является важнейшим параметром функциональности белка, поскольку такие процессы, как денатурация и агрегация белка, напрямую связаны с этим свойством. Обезвоженные белки уже при 4–10%- ной относительной влажности связывают молекулы воды в мономерный слой, а при влажности 20–65% образуют два или более гидратных слоя. Между ВСС белков и их растворимостью прямая связь часто отсутствует. Слабо- и нерастворимые белки подвергаются набуханию с удерживанием воды, хорошо растворимые образуют коллоидные системы. Растворимость характеризуется коэффициентами КРА (коэффициент растворимости азота) и КДБ (коэффициент дисперсности белка). Первый коэффициент отражает количество азота, второй — количество белка, перешедшее в раствор, в процентах от общего содержания в продукте.

Растворимость растительных белков изменяется от 1–3% до 86–96% и более (Таблица 1).

При pH 2 показатель может достигать 76,0–83,9%, а при pH 5,0 он снижается с 5,3% до 9,6% [27]. Изменения растворимости отражаются на значениях других свойств. Так, самая низкая ЖЭС наблюдалась при pH 5,8, минимальная ПОС – при pH 5,0; максимальная ЖЭС отмечалась при pH 8,0, а наибольшая ПОС – при pH 7,0. Любая обработка, повышающая растворимость, может приводить к улучшению поверхностной активности, реологических и гидродинамических свойств [28]. Низкая растворимость часто взаимосвязана с природой белков, с температурной денатурацией или с агрегацией, иногда температурная обработка даже повышает их растворимость [23].

Гидрофобные участки на поверхности белков, как правило, препятствуют растворимости, гидрофильные, как и их заряд (дзета-потенциал), наоборот, ее повышают [15]. Гидрофобные группы белков могут освобождаться при растворении и осаждении, что приводит к усилению взаимодействий и к уменьшению значения данного показателя. Кроме поверхностного заряда, на растворимость белков влияют pH, вид и концентрация солей. Растворимость в кислых и щелочных средах повышается, а около изоэлектрической точки она понижается (pH 4–5) [20,29]. Исследования, например, пяти бобовых культур (горох, нут, соя фасоль, чечевица,) показали более высокую растворимость белков, полученных щелочной обработкой (85,9%), по сравнению с теми, которые получали с солью (61,5%). При щелочном выделении самую низкую растворимость имел изолят фасоли (61,4%), самую высокую — изолят сои (96,5%), а изоляты гороха, чечевицы, нута занимали промежуточное положение (более 90,0%) [30]. Исследование изолятов проводилось с использованием

Таблица 1. **Растворимость белковых препаратов,% от общего количества белков**

Table 1. **Solubility of protein preparations,% of the total amount of proteins**

Концентраты из пшеничных отрубей (N × 5,7) [20]	Концентраты рисовые (N × 5,95) [21]	Концентрат картофельный (N × 6,25) [22]	Изоляты соевые (N × 6,25) [23,24]	Клейковина пшеничная (N × 5,7) [25]	Концентраты гороховые (N × 6,25) [26]	Концентраты нутовые (N × 6,25) [26]
14,0–52,7	8,1–40,2	28,2	> 70,0	1,15 ± 0,10	12,35 ± 0,20	12,20 ± 0,50

трех различных сортов гороха, полученных щелочной экстракцией с изоэлектрическим осаждением, солевой экстракцией с диализом (СД) и мицеллярным осаждением (МО). Также проводилась оценка поверхностного заряда, гидрофобности и функциональных свойств, включая растворимость [31]. Было установлено, что изоляты СД имели самую высокую растворимость белка (~ 89%), изоляты МО – самую низкую (~ 46%) при наименьшей ВСС (0,3–2,6 г /г) и высокой ЖСС (5,3 г/г). При этом различия в функциональности между сортами при одном и том же методе экстракции были минимальными. У белков подсолнечного шрота больше всего растворимость белков наблюдалась в растворах гидроксида натрия, по сравнению с растворами солей, карбонатов, бикарбоната натрия, при этом корреляции между молярностью гидроксида натрия и увеличением растворимости не наблюдалось [32]. Максимальная растворимость белков данного концентрата проявлялась в диапазоне pH 8–12, минимальная — при pH 5,0–6,0 [33], другие концентраты хорошо растворялись и при pH 2 [34]. Максимальная растворимость составляла 80% против 100% у белков сои, гороха и коричневого риса [33]. Снижение растворимости белков шрота подсолнечника отмечено под влиянием фенолов, в частности, хлорогеновой кислоты [35], однако и после удаления таких соединений растворимость не увеличивалась, а понижалась [36], таким образом, вопрос однозначного влияния подобного рода соединений на растворимость белков остается до сих пор не выясненным и возможно это связано с их природой.

При жестких условиях обработки (распылительная сушка, отбеливание спиртом, экструзия) изоляты, например, из гороха, маша, киноа имели низкую растворимость [10,37,38]. Данный показатель, как и другие свойства белков и их смесей, повышался при обработке их паром. Предположительно, причиной тому могло быть изменение соотношения S–S связи/SH– группы и синтез «сшитых» композитных белков. Перегруппировка связей между белками или внутри белков могла отразиться на аминокислотном составе и на свойствах белков, что не противоречит данным на примере других белков [25]. Регулирование pH в сочетании с тепловой обработкой и охлаждением «разворачивало» белковые молекулы и также их модифицировало. Обработку паром под высоким давлением с изменением pH, высокое давление с действием ультразвука использовали и другие авторы для создания белков и их композитов с улучшенными функциональными свойствами, включая и растворимость [16,39].

Водосвязывающая (ВСС) и жиросвязывающая (ЖСС) способности — это способности белков связываться с водой и жиром. Эти Свойства необходимы для обеспечения текстуры, органолептических характеристик, срока годности. ВСС белковых продуктов обуславливается обычно гидрофильными полярными и заряженными боковыми цепями белков, как и наличием углеводов, имеющих сродство к молекулам воды [15]. Неспособность белка взаимодействовать с водой может привести к хрупкости и к сухости продукта [30]. Значения ВСС для белковых концентратов, полученных из различных зернобобовых, зерновых и из других видов культур (горох, фасоль, чечевица, нут, пшеница, овес), находятся обычно в диапазоне 1,6–6,8 г/г продукта [12,27,40], при этом вид культуры (соя > нут > гороха > чечевица > пшеничная клейковина), как и способ ее переработки, оказывали влияние на способность белков связывать воду [41,42,43]. Белки гороха и нута характеризовались наиболее высокой ВСС, как и их растворимостью в воде [8,44].

При изменении pH в щелочную сторону и при влиянии его на ВСС изолята белков маша наблюдалось образование гибких и растянутых структур на уровне их вторичной структуры [45]. Повышенная гибкость и новые межмолекулярные связи между остатками аминокислот, вызванные щелочным сдвигом при pH 12, улучшали ВСС белков и способствовали образованию гелей при наименьшей их концентрации. ВСС изолята увеличилась с 1,56 г/г до 4,81 г/г, точка гелеобразования снизилась с 22% до 15%. На основании того, что между белками образовывались прочные и эластичные термо-индуцированные гели, авторы заключили о возможности использования белков маша в производстве широкого спектра пищевых продуктов, включая растительное мясо [45].

ЖСС обусловлена взаимодействием неполярных боковых цепей аминокислот с алифатическими цепями масел/жиров [15]. Данное свойство зависит от вида, сорта и метода обработки культуры, находится оно обычно в пределах 1,0–3,96 г/г продукта [30]. При исследовании ЖСС белков из двух сортов нута, полученных щелочной, спиртовой и солевой экстракцией, установлено, что меньшая способность связывать масло при большей ВСС отмечалась у изолятов, выделенных с использованием соли [46]. Значения ЖСС и ВСС увеличивались с повышением содержания белка в препаратах, но в большей степени это увеличение проявлялось у ВСС.

Растительные белки, адсорбируясь на поверхности раздела фаз, образуют эластичные слои вокруг капель жира, снижая межфазное натяжение и предотвращая его коалесценцию. Благодаря этому, они обладают жироэмульгирующей способностью (ЖЭС). Эмульсия, характеризующаяся как дисперсия/суспензия несмешивающихся жидкостей (масло/жир и вода), обычно термодинамически неустойчива из-за повышенного межфазного поверхностного натяжения.

За счет увеличения вязкости непрерывной фазы и снижения скорости в системе движения капель масло/жир белки стабилизируют эмульсии (СЭ). Доказана связь между поверхностной гидрофобностью, межфазным натяжением и эмульгирующими свойствами белков, например, гороха [15]. Гидрофобность и заряд на поверхности белков оказывают влияние на адсорбцию белков на поверхности раздела фаз. При этом отмечается высокий заряд для противодействия силам притяжения при стабилизации электростатических сил отталкивания между каплями масла. В изоэлектрической точке белки имеют суммарный нулевой заряд и не увеличивают ЖЭС.

Состав, молекулярная гибкость и другие физико-химические свойства белков у различных бобовых, зерновых, масличных культур разные. Установлено, что из-за большой растворимости и гидрофобности высокой ЖЭС обладали вицилины гороха [15]. Стабилизирующие свойства данной фракции белков в составе нестабильных эмульсий объясняли образованием вязкоупругой пленки вокруг капель масла. Свойства эмульсии, как и растворимость белков, зависели от их природы (горох, нут, фасоль, соя, чечевица), от метода обработки (щелочная, ультрафильтрация) [14,47] и от методов оценки ЖЭС и ЭС. Различные исследователи, как правило, используют разные методики [40], что привело к разбросу значений ЖЭС изолятов горохового белка от 21% до 76% [41,42]. Разница между соевыми и другими видами белковых продуктов в ЖЭС при этом была не существенной. Так, изоляты белков чечевицы и вигны, как и белки гороха, в зависимости от вида используемого метода оценки, также имели высокую СЭ (68–69%) и эмульгирующую активность (от 4,6 $м^2$/г до 42,9 $м^2$/г).

Среди различных форм белковых продуктов наименьшую ЖЭС при значениях pH, близких к изоэлектрической точке, имели изоляты. Значение ЖЭС повышалось при pH выше 7 [48] и достигалось 38–46% при стабильности эмульсии, равной 43–100%. На ЖЭС оказывало влияло как изоэлектрическое осаждение, так и солевая обработка с изменением соотношений фракций глобулин/альбумин или легумин/вицилин [14]. На зависимость величины ЖЭС от фракционного состава белков указывали и данные, полученные при исследовании белков подсолнечника [32]. Альбумин его белков был более эффективным, чем, например, гелиантинин, а СЭ была выше у нерастворимых белков, чем у растворимых. Другие авторы указали на то, что ЖЭС альбуминов подсолнечника ниже, чем у соевых белков при аналогичной СЭ [33]. При ультразвуковом воздействии на эмульсию из масла чиа с гороховым белком стабильность эмульсий повышалась (до 7 дней) при одновременном в них торможении процессов окисления [49]. Исследованиями свойств белковых концентратов, приготовленных из ячменной муки (*Hordeum vulgare L.*) с щелочной и ферментативной обработкой, показано, что более мягкие условия с такими энзимами, как амилаза и глюканаза, обеспечили ЖЭС, сопоставимую с ЖЭС изолята сывороточных белков [50].

Пенообразующая способность (ПОС) — это способность белков образовывать пену. Как и эмульсии, пены имеют две несмешивающиеся фазы: водную и газовую. Белки в растворе, адсорбируясь на границе раздела газ–жидкость, образуют вязкоупругую пленку, помогающую противостоять разрыву и слиянию пузырьков. Выявлена положительная связь ПОС с величиной дзета-потенциала и растворимостью для белковых изолятов из различных сортов гороха [15]. Чем сильнее был заряд на поверхности белков, тем выше их ПОС за счет ослабления гидрофобных взаимодействий, а также ввиду повышения растворимости и гибкости белков. В результате белки быстрее растекались и инкапсулировали частицы воздуха на поверхности раздела фаз. Альбумины бобовых имели при этом большую ПОС и стабильность пены (СП), чем глобулины с пониженной способностью ориентироваться на границе раздела двух фаз.

Как и растворимость, белки зернобобовых культур (фасоль, горох, нут) имеют более высокое пенообразование при кислом и щелочном значении pH и менее высокое — около изоэлектрической точки. Для захвата пузырьков воздуха и капель масла белки должны хорошо растворяться, чтобы они могли быстрее мигрировать к границе раздела фаз и перестраиваться для образования эластичной пленки [15]. При исследовании ПОС белковых продуктов из гороха и нута, полученных с ультрафильтрацией и щелочной обработкой, было обнаружено, что способность образовывать пену у концентрата гороха не зависела от метода обработки [10,51]. Но концентрат нута, экстра-

гированный с использованием щелочи, имел более низкую стабильность пены. При этом ПОС изолята гороха была выше, чем у сухого обезжиренного молока, пшеничной муки, соевого изолята [52], поэтому сделан вывод о целесообразности его использования в качестве стабилизатора в таких пенных системах, как безе, взбитые десерты, муссы [53]. На ПОС концентрата белков из рисовых отрубей оказывало влияние pH: ПОС и стабильность пены при pH 8 равнялись 42% и 31,5 мин соответственно, тогда как при pH 10 – 54% и 43,5 мин. Эти значения находились в пределах обычных величин и для других белков (40–90% и 30–90 мин) [54]. Важно отметить, что способы и условия выделения белков влияют не только на их функциональные свойства, но и на усвояемость [55]. Изоляты белка, полученные из гороха, чечевицы, нута и фасоли соле-мембранной технологией, демонстрировали более высокую растворимость, ПОС и эмульсионную активность по сравнению с изолятами, полученными изоэлектрическим осаждением. Однако их усвояемость *in vitro* была ниже, что необходимо учитывать при использовании таких белковых изолятов в пищевых продуктах различного назначения.

Растительные белки при концентрации 15–25% имеют тенденцию к образованию вязких растворов и к формированию гелей, поэтому в эмульсиях, например, из-за склонности к данному свойству, массовую долю белков обычно ограничивают 10% [56]. Гелеобразование — это процесс межмолекулярного взаимодействия белков с образованием трехмерной сети структур в системах белок–вода, белок–жир, белок–белок. Процесс гелеобразования зависит от концентрации, pH, температуры, ионной силы среды, присутствия добавок, эндогенных, экзогенных ферментов. Сорт культуры, состав белков и методы обработки оказывают влияние на их гелеобразующие свойства. Показано, что температура гелеобразования белков зависела от термической стабильности, при этом она была выше температуры термической денатурации [15]. Так, у изолятов, полученных из различных сортов фасоли и гороха, температура гелеобразования находилась в диапазоне 87,4–94,5 °C и 84,0–93,1 °C, а температура денатурации — в диапазоне 85,7–93,3 °C и 82,7–85,5 °C соответственно. Повышенная температура гелеобразования у изолятов фасоли была взаимосвязана с более высоким количеством β-структур, с большей площадью поверхности и с более сильными межмолекулярными взаимодействиями. Температура денатурации дисульфид-связанных кислых и основных субъединиц легумина гороха, в зависимости от их соотношения, равнялась 69–77 °C, тогда как температура денатурации совместно с агрегацией — 75–85 °C. Причина различий была взаимосвязана с диссоциацией и перегруппировкой олигомеров легумина за счет гидрофобных взаимодействий и реакции обмена сульфгидрильные/дисульфидные связи [57]. Скорость нагревания горохового изолята не влияла на гелеобразование, а скорость охлаждения, наоборот, оказывала влияние [58]. Щелочная обработка горохового изолята понижала гелеобразование, по сравнению с методом концентрирования белков [59], а использование раствора 0,3 M NaCl при pH 4,0, наоборот, усиливало получение плотного геля [15]. Таким образом, на свойства растительных белков образовывать гели, как и на все описанные выше свойства, оказывали влияние различные факторы воздействия.

3.3. Модификация структуры и функциональных свойств белков

Белки зернобобовых, зерновых и масличных культур содержат реакционноспособные группы остатков аминокислот, поэтому для них, как для полипептидов, характерны реакции химической, физической, физико-химической и ферментативной модификации. Из химических методов наиболее известны реакции ацилирования аминогрупп янтарным (сукцинилирование) и уксусным (ацетилирование) ангидридами, дезамидирования (удаление амидных групп глютамина, аспарагина) и фосфорилирования [2,60].

Реакции ацилирования приводят к повышению суммарного отрицательного заряда молекул из-за ковалентного присоединения остатков янтарной/уксусной кислот к ε-группам остатков лизина. Степень ацилирования возрастает за счет реакций с участием гидроксильных групп серина, треонина, тирозина. Электростатическое отталкивание одноименно заряженных групп приводит к структурным изменениям в белках и даже к их распаду. Примером такого распада является образование субъединиц из 11S гороховых белков с одновременным развертыванием их глобулярной структуры [60]. Благодаря изменению пространственной структуры белков и заряда на молекулах, усиливались гидрофобные свойства, улучшались ЖЭС, ПОС, изменялись растворимость и гелеобразующая способность. Сукцинированные и ацетилированные легумины бобовых образовывали высокоустойчивые эмульсии «масло в воде» [60]. Полипептиды способны формировать гели при меньших значениях концентрации, pH и температуры, по сравнению с нативными белковыми глобулами. Стабилизация структуры геля происходила за счет ковалентных сшивок модифицированных белков, при этом с возрастанием степени модификации прочность гелей уменьшалась, поэтому для ацетилированных белков рекомендована ее средняя степень.

Дезамидирование белков осуществляется с помощью реакций, при которых из молекул амидная группа аспарагина и глутамина удаляется с образованием аммиака. Продукты химического дезамидирования зависят от pH, температуры и последовательности аминокислотных остатков в белках [61]. При щелочных и нейтральных значениях pH чаще происходит дезамидирование аспарагина. В кислых условиях оно протекает с гидролизом остатков аспарагина и глютамина до соответствующих кислот. Превращение амидных групп в кислотные частично расщепляет белки, в результате чего образуются амфифильные молекулы, которые выполняют роль поверхностно-активного вещества при образовании пен и эмульсий. Гороховый белок, например, полностью подвергался дезамидированию обработкой 2 моль/л HCl при 121 °C в течение 3 часов с усилением его поверхностной гидрофобности и с улучшением функциональных свойств [62]. В организме же человека дезамидирование может вызывать структурные изменения белков матрикса и клеток нейронов, что приведет к нарушению их функций [63], поэтому в технологических процессах модификацию целесообразнее осуществлять с помощью ферментативных реакций из-за меньшей опасности последних.

Фосфорилирование — процесс улучшения функциональных свойств белков при участии реакционных групп, присущих природным фосфопротеинам, таким, как казеин [64]. Влияние фосфорилирования оксихлоридом фосфора на конформацию белков, например, крециферина семян рапса, изучено с помощью SDS-PAGE, ВЭЖХ, ультра-центрифугирования, вискозиметрии, гидрофобности. Обнаружено, что фосфорные группы после реакции при pH 8 почти в равной степени присоединялись к NH_2– и OH– группам, тогда как фосфорилирование при pH 10–11 вызывало преобладающее протекание реакции O–фосфорилирования. Компонент с молекулярной массой (ММ) 50 кДа был продуктом ковалентного сшивания полипептидных цепей, а фракция 2,5S оказалась основным продуктом диссоциации, протекающей уже после модификации. Чем выше степень фосфорилирования, тем больше образовывалось продуктов с повышенной гидрофобностью. Фосфорилирование горохового изолята по –OH-группам серина и треонина при pH 12, при температуре 70 °C и 7,0% трифосфата натрия повышало его растворимость, ЖЭС, ЖСС, ПОС и СЭ [65]. При этом структура модифицированных белков, по данным сканирующей электронной и инфракрасной спектроскопии, имела однородную ламеллярную структуру с повышенным содержанием α-спирали, β-структуры, но с меньшим количеством β-изгибов и нерегулярных спиралей. Результаты отразились на 20% снижении количества сливок при изготовлении тортов с данным изолятом совместно с 0,4% ксантановой камедью [65].

Физическая модификация растительных белков распространена достаточно широко [66]. К ней относится, прежде всего, их термическая обработка. Мягкие режимы способствовали разворачиванию соевых белков и расширению функциональности, жесткие режимы необратимо изменяли структуру с денатурацией и агрегацией при участии дисульфидных, гидрофобных связей и электростатических сил с ухудшением таких свойств. Нагрев соевых белков повышал их термическую стабильность [67], у рисовых глютелинов увеличивалась ПОС [68], у альбумина из псевдозлаковых – гелеобразующие свойства [69], у белков фасоли – ВСС [70]. Улучшение свойств наблюдалось и с применением радиочастотного и микроволнового нагрева, но при низкой скорости и с тремя частотами: 13,6, 27,1 и 40,7 МГц, разрешенными для использования в США [71]. На эффективность нагрева соевых белков влияли диэлектрические свойства, pH, концентрация и температура. Структура белков при этом изменялась за счет разрыва дисульфидных связей и увеличения гидрофобных свойств [72]. После радиочастотной обработки белков рисовых отрубей в их вторичной структуре увеличилось количество случайных клубков, уменьшилось содержание β-листов и α-спиралей. Третичная структура также изменялась, о чем свидетельствует снижение флуоресценции триптофана и усиление гидрофобности. Эти изменения привели к увеличению ЖЭС белков при температуре 80 °C [73]. Радиочастотное излучение являлось эффективным и для улучшения ЖСС и ЖЭС кукурузных белков [74]. Гомогенизация гороховых белков под давлением и микрофлюидизацией понижала размер частиц, в результате до 86% повышались растворимость [75] и стабильность эмульсии [76]. Функциональные свойства белков моринги масличной (*Moringa oleifera*), полученных из обезжиренного порошка семян

после обработки ультразвуком с оптимизацией процесса [77], где факторами были амплитуда, продолжительность обработки, гидромодуль, также были улучшены. Растворимость, ЖЭС и ПОС были увеличены на 42, 33 и 73% соответственно по сравнению с необработанным концентратом. Изменения в свойствах сопровождались структурной модификацией во вторичной и третичной структурах белков, что подтверждено инфракрасной спектроскопией и спектральной флуоресценцией [78]. При изучении влияния γ-технологии облучения рисового белка на физико-химические и функциональные свойства было выявлено увеличение растворимости белков до 69,18 ± 1,07%, ЖСС до 3,45 ± 0,04 г/г, стабильности эмульсии – до 45,65 ± 1,26 мин, эмульгирующей активности – до 208,33 ± 4,79 м^2/г [78]. Изменение свойств авторы объяснили уменьшением размера частиц. При этом содержание ß-структур составляло не менее 31,16 ± 0,16%, неупорядоченной структуры – не более 14,56 ± 0,06%, а поверхностная гидрофобность усиливалась.

Обработка гороховых белков этанолом при низкой температуре улучшала реологическую стабильность эмульсий, особенно при высоких концентрациях, что делает ее перспективной для использования белковых добавок в пищевой промышленности [79]. Текстурирование белков с низким содержанием влаги считается также перспективной технологией с получением волокнистой структуры из растительных белков, подобной мясу животных [80,81]. Соевые ингредиенты наиболее часто используются в аналогах мяса из-за их характерных функциональных свойств, таких как ВСС, ЖСС, гелеобразующая способность и ЖЭС [82]. Так, для изучения влияния свойств концентратов соевого белка на качество текстуратов авторы работы [81] использовали 12 коммерческих образцов и показали различия в степени текстурирования, в свойствах и в сенсорной оценке продуктов. Статистический корреляционный анализ показал, что на качество продуктов оказывали влияние индекс растворимости азота, ВСС, ЖЭС, ПОС, прочность геля и содержание –SH групп в сырье. Добавление 5% 7S или 5% 11S субъединиц соевого белка повышало ВСС изолята до 9,04%, скорость регидратации – до 25,71% [83]. Белки 7S обеспечивали более высокую скорость регидратации при более низкой температуре (30 и 45 °C) по сравнению с белками фракции 11S. После экструзии содержание свободных, общих –SH групп и –S–S– связей в белках снижалось, а количество нерастворимых полимеров увеличивалось. Соотношение различных компонентов соевого белка в изоляте изменяло текстуру, ВСС и регидратационные характеристики, что могло бы обеспечить появление нового метода с использованием данного показателя оценки качества текстуратов. Текстурирование изолятов гороха с высоким содержанием незаменимых аминокислот, как и текстурирование изолятов сои, маша, арахиса, а также клейковины, повышало ВСС, ЖСС, ЖЭС белков и делало их приемлемыми для получения аналогов мяса [84]. Соевый белок и клейковина, как известно, обладают ограничениями, связанными с пищевой аллергией и дисбалансом незаменимых аминокислот. Поэтому для рецептур были выбраны гороховые текстураты. Текстураты на основе гороха, сои и клейковины имели высокие свойства, тогда как текстураты из белков маша и арахиса обладали низкой регидратацией и текстурными свойствами. Таким образом, следует подчеркнуть, что природа белков является важнейшим фактором, влияющим на функциональные свойства растительных препаратов, включая свойства текстуратов.

Эффективным подходом к улучшению растворимости, термостабильности и других свойств белков является образование их комплексов с полисахаридами на основе электростатических сил [85] или других механизмов. Образование комплексов было подтверждено исследованиями с гуммиарабиком [86], альгинатами [87], пектином со степенью этерификации более 50% [88], каррагинаном, ксантановой, геллановой камедью, хитозаном [89,90]. Ионные полисахариды улучшили функциональные свойства соевых и гороховых белков за счет изменения их вторичной структуры. Гели с геллановой камедью и ионами калия были более жесткими и меньше теряли воду в результате синерезиса, чем с натрием. Камеди структурировали сетку гелей с 10–15% горохового белка и приближали их к продуктам животного происхождения. При использовании гидролизатов соевых белков в комплексе с галактоманнанами при контроле их концентрации и ММ также наблюдалось улучшение их функциональных свойств для применения в рецептурах пищевых продуктов [91]. Фазовые переходы в концентрированных белковых системах при взаимодействии белок–белок, белок–полисахарид, белок–липиды и белок–вода существенно влияли на текстуру и на общее вкусовое качество мясных аналогов. Отмечено, что не только липиды, полисахариды, вид и концентрация белков, но и параметры их обработки (влажность, температура, pH) оказывали влияние на регулирование поведения белковой фазы в процессе реструктуризации при производстве аналогов из говяжьего, куриного и другого вида мяса [92]. Взаимосвязь «структура–функция–процесс» продолжает оставаться востребованной и для дальнейших исследований.

Установлено, что текстурированные гороховые и соевые белки могут быть использованы в качестве модификаторов свойств гидрогелей инулина при концентрации 6 г/100 г [93]. Структура гидрогелей становилась более когезивной и в 7–10 раз более прочной, но менее зернистой и текучей по сравнению с контрольным образцом за счет уменьшения скорости движения частиц компонентов. Комбинация горохового белка с данным полисахаридом понижала генную активность белка, участвующего в распаде мышц крыс, и повышала активность ферментов митохондрий при выработке в них энергии (цитратсинтаза, 3-гидроксиацил-КоА-дегидрогеназа) [94]. Доказательством взаимодействия белков с инулином служат данные, полученные при экстракции последнего из клубней артишока. Выход инулина повышался с 67,6% против 57,3%, если его экстрагировали первым, а не после предварительного удаления белков [95]. Важно отметить, что влияние инулина на свойства растительных белков сегодня изучено недостаточно, тогда как получение их комплексов с пребиотиком перспективно, чтобы использовать в пищевых системах функционального назначения.

Гликозилирование белков — модификация, представляющая собой присоединение линейных или разветвленных олигосахаридных цепей к белку с получением гликопротеинов. Так как данный процесс затрагивает аспарагиновые остатки, обозначаемые как N–остатки, то он называется N–гликозилированием. Реакция без участия ферментов включает образование шиффовых оснований и продуктов Амадори, образование карбонильных соединений и конечных продуктов. Так как олигосахариды имеют гидрофильную природу, то ковалентное включение N-связанных гликозидов в состав растительных белков приводит к усилению полярности и к увеличению растворимости [96]. Простое смешивание соевых белков с мальтодекстрином увеличивало поверхностную гидрофобность, снижая растворимость, но повышая ВСС и прочность геля. Однако гликозилирование, наоборот, приводя к менее компактной третичной структуре молекул, увеличивало растворимость и уменьшало ВСС и прочность геля [97].

Функциональные свойства белков могут быть улучшены с помощью биотехнологических модификаций, таких как ограниченный протеолиз с ферментами животного (трипсин, химозин, химотрипсин, пепсин), растительного (папаин) или микробиологического (алкалаза, флавозим, протацид и т. д.) происхождения, дезамидирование и другие виды [66]. Процессы протекают с учетом особенностей действия различных энзимов [98]. Гидролиз белков с участием ферментов предпочтительнее, по сравнению с химическим распадом, из-за мягких условий, отсутствия побочных реакций, безопасности и ввиду субстратной специфичности энзимов. Свойства гидролизатов зависят от степени гидролиза, от вида ферментов (эндо-, экзопротеазы) и от природы субстрата. Результатом гидролиза является уменьшение молекулярных масс (ММ), увеличение ионизированных групп или гидрофобных участков, что при определенной глубине гидролиза положительно отражается на растворимости и на других функциональных свойствах [66]. Трипсин, расщепляя пептидные связи с участием лизина и аргинина и повышая тем самым межфазовые свойства горохового [99] и овсяного белка [100], улучшал ЖЭС и ПОС. Реакция гидролиза гороховых белков с трипсином приводила к частичному развертыванию молекул, к расщеплению пептидных связей α-цепей, к понижению ММ белка с 340 до 240 кДа и к появлению гидрофобных групп, взаимодействующих с каплями масла [101]. Молекулы белков становились более компактными, сферическими, термодинамически стабильными и улучшали ЖЭС и ПОС, проявляя при этом антиоксидантные свойства [101]. С данными гидролизатами снижалось окисление липидов рапсового масла в эмульсиях при хранении, предназначенных для микрокапсулирования. Химотрипсин, подобно пепсину, гидролизовал связи, образованные гидрофобными аминокислотами (триптофан, фенилаланин), хотя и в меньшей степени, чем другие ферменты [102]. При этом он эффективнее других ферментов улучшал показатели ПОС и ЖЭС белков конских бобов [103]. Ферментный препарат химозин, сходный по специфичности с пепсином А, также был использован для улучшения ПОС, растворимости и ЖЭС изолята гороховых белков [104]. Между растворимостью и ЖЭС наблюдали умеренную корреляцию (r = 0,74). Другие авторы [105] также установили улучшение растворимости горохового изолята с данным ферментом при pH 2,0–5,0 после гидролиза в течение 10–30 минут. Из люпина получены пептиды с улучшенными функциональными свойствами, антиоксидант-

ной, иммуномодулирующей, гипотензивной, гипогликемической и гиполипидемической активностями [106], а из овсяных отрубей с папаином — пептиды с антиоксидантными и металлохелатирующими свойствами [107]. С папаином получены гидролизаты с высокой растворимостью и биологической ценностью из изолятов белков арахиса [108] и люпина [109], а с бромелайном (степень гидролиза до 16%) – пептиды из белков люпина с повышенной прочностью геля и эмульгирующей активностью, но с более низкой стабильностью эмульсии [109].

Гидролиз растительных белков с микробными протеазами из-за их широкой специфичности и сроков производства имеет преимущества по сравнению с ферментами животного происхождения [110]. Однако многие белковые гидролизаты приобретают горький вкус из-за высвобождения пролина и гидрофобных аминокислот. Поэтому важно уменьшить или полностью исключить горечь, например, с помощью специфических пролилэндопептидаз из группы сериновых протеиназ. Они способны к ограниченному протеолизу по пролиллейциновым пептидным связям и остаткам гидрофобных аминокислот [110]. Из бактериальных препаратов с эндопротеазами наиболее широко известны алкалаза, нейтраза, протамекс, из грибных с эндопротеазами – дистицим протацид экстра, а также флавоpзим, содержащий экзопептидазы амино- и карбоксипептидазного типов. Исследование гидролиза сухой пшеничной клейковины (СПК) различного качества экзо- и эндопротеиназами показало: чем крепче клейковина, тем глубже протекал ее гидролиз под действием эндопротеиназ (Neutrase 1,5; Protamex). В то же время для более слабой клейковины эффективнее оказывалось действие комплекса эндопротеаз и экзопептидаз препарата Flavourzyme 500 [111]. Изменение ММ полипептидов зависело от дозировки ферментов и от реологических свойств клейковины. В работе [112] отмечен потенциал ферментативных гидролизатов нутового изолята под действием дипептидилпептидазы-IV, ангиотензинпревращающего фермента и алкалазы для регулирования эмульгирующих и биоактивных свойств (переваривание, антиоксидантная активность) белков. При этом предпочтение отдано времени гидролиза 10 минут вместо 210 минут.

Для улучшения растворимости, ЖЭС, ПОС и других функциональных свойств растительных белков использовались ферментативные методы дезамидирования с трансглютаминазой, протеазами и протеинглутаминазой (ПРглю) [113]. Последняя, для определения активности которой разработан новый метод с моделированием в среде высокого давления [114], наиболее часто используется для обеспечения соответствия растительных аналогов по вкусу и текстуре животным белковым продуктам. Растворимость изолята соевого белка с ним повышалась на 55,74%. Впервые фермент получили из бактерии *Chryseobacterium proteolyticum* [115] и установили, что он реагирует с остатками глутамина в белках и не реагирует с остатками аспарагина и со свободным глутамином. ПРглю считают идеальным ферментом для дезамидирования белков [116]. Данная реакция модификации клейковины после обработки ферментом, наряду с повышением ЖЭС, ПОС и растворимости, улучшала и ее гелеобразующие свойства [117]. Кроме того, дезамидирование глиадина как основного аллергенного белка клейковины при использовании карбоксилированной катионообменной смолы снижало его реактивность по отношению к сыворотке пациентов с положительной реакцией на кишечную проницаемость, а также уровни аллергена и гистамина. Белки из зерновых, бобовых, масличных семян были использованы и для получения пищевых коллоидов, включая комплексы с белками, металлами и углеводами для улучшения пищеварения и биодоступности биологически активных веществ [118].

Для улучшения свойств белков и продукции в основном животного происхождения (куриный бургер, продукты из говядины, свинины, йогурты) используется микробная трансглутаминаза (мТГ), катализирующая ковалентное сшивание белков с участием изопептидных связей между остатками глутамина и лизина. В меньшей степени фермент применяется в тофу, хлебобулочных изделиях и макаронах [119]. При использовании мТГ при различных концентрациях с улучшенным процессом гелеобразования соевого изолята в аналогах мяса и/или морепродуктах методом SDS-PAGE электрофореза показано, что под ее влиянием при концентрации 5 и 7 ед/г происходила полимеризация белков вицилина и легумина с повышенным содержанием агрегатов β-листов. Белки усиливали гибкость, стабильность и прочность гелевых сеток. Данные подтверждены и на примере изолята белков нута, которые получали солевой экстракцией с последующей ультрафильтрацией и действием мТГ [120]. Межмолекулярные β-листовые и β-витковые структуры обеспечили высокую прочность геля, при этом нутовый изолят имел меньшую величину ЖЭС по сравнению с гороховым. Для гороховых белков обработка их мТГ являлась благоприятной для улучшения текстуры и реологических свойств гелей и эмульсий при хранении [121]. мТГ использовалась и для экструзионного текстурирования изолятов, концентратов соевых, гороховых, арахисовых, рисовых белков и пшеничной клейковины для получения заменителей мяса [122]. Из компактных структур белки превращались в более растянутые и случайные спиральные структуры. Интенсивнее этот процесс протекал у клейковинных и рисовых белковых изолятов, что приводило к получению рыхлой текстуры в отличие от более агрегированных глобулиновых 11S белков сои и гороха. Действие фермента зависело от природы растительного белка, что подтвердилось и на примере хлеба [123]. Белки риса и киноа являлись подходящими субстратами для мТГ в составе закваски, в отличие белков овса и нута. Добавление мТГ в состав закваски из киноа, коричневого и белого риса повышало удельный объем хлеба, сжимаемость мякиша и газоудерживающую способность теста. Из-за чрезмерного сшивания белков с мТГ тесту требовалось больше воды. В других исследованиях фермент использовался для улучшения биологической ценности белковых композиций из различных видов растительных культур [11].

Особый интерес для использования белков в практических целях представляют реакции ферментативного их синтеза из пептидов (пластеиновый синтез) различной химической природы с целью улучшения растворимости, поверхностно-активных свойств и биологической ценности [2], однако реакции мало изучены и нуждаются в дальнейшем исследовании.

3.4. Взаимосвязь молекулярной структуры белков с их физико-химическими показателями

Для регулирования функциональных свойств белковых препаратов в целях обеспечения качества пищевых продуктов наиболее важными остаются сведения о взаимосвязи особенностей молекулярной структуры белков с их физико-химическими показателями [25,124]. Так, были изучены физико-химические и структурные особенности белков альбумина (АЛ), глобулина (ГЛ) и целого изолята, полученных из голубиного горошка (*Cajanus cajan)* при значениях pH от 8 до 11 [125]. ГЛ имел характеристики белковых агрегатов и полипептидов субъединиц 7S вицилина (150–180 кДа), в то время как АЛ — полипептидов с более низкой молекулярной массой. Исследования конформационных характеристик флуоресцентной спектроскопией и дифференциальной калориметрией, а также стабильности белка измерением теплообмена с денатурированием молекул при нагревании с постоянной скоростью показали, что ГЛ имел большую конформационную стабильность и более компактную, но менее гибкую структуру с высокой долей β-нитей, по сравнению с фракцией АЛ. У нефракционированного изолята наблюдалось самое высокое извлечение белка из-за большего присутствия белковых агрегатов с наименьшей долей β-нитей. По мере увеличения pH экстракции процент раскрученного белка и взаимодействие гидрофобных остатков с растворителем увеличивались, что положительно отражалось на свойстве растворимости. Сделан вывод, что изменение pH для экстракции белков является простым и малозатратным методом получения изолятов с физико-химическими и структурными особенностями, определяющими функциональные свойства для целенаправленного использования их в качестве пищевых ингредиентов [125]. При доказательстве комплексообразования изолята соевого белка (БИ) с β-глюканом (Г) и мирицетином (М) с использованием методов кругового дихроизма, 3D-флуоресцентного анализа, УФ-спектроскопии и гель-хроматографии установлено, что в комплексе изменялась структура белков [126]. β-слой уменьшался до 29%, хаотичная спираль увеличилась до 35%, а молекулярная масса повышалась с $6{,}68\times10^5$ до $1{,}17\times10^6$ г/моль. Глицинин (11S) обладал лучшим сродством к модификаторам, чем β-конглицинин (7S), за счет взаимодействия с участием водородных связей. Данные получены для рыночного продвижения соевых продуктов в качестве функциональных ингредиентов. Для улучшения функциональных свойств изолята соевого белка (ИСБ) в его состав была введена карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) в среде с низким значением pH (4,0 и 5,0) [127]. КМЦ адсорбировалась на поверхности ИСБ при участии электростатических и водородных связей. Индекс активности и индекс стабильности эмульсий при этом были более высокими, чем у эмульсий с ИСБ. Формирование стабильных межфазовых слоев в эмульсиях с комплексом белок–полисахарид доказано с помощью изображений, полученных на микроскопе.

При исследовании различий в физико-химических свойствах, таких как выход, молекулярные массы, Z-потенциал, гидрофобные аминокислоты, у белков нута и их фракций (альбумины – АЛ, глобулины – ГЛ и глютелины — ГЛ), по сравнению с овальбумином

яйца (ОВ), выявлена корреляция между вторичной структурой белков и значениями ЖЭС и ПОС. Более высокие поверхностные свойства белков нута, по сравнению с ОВ, свидетельствовали об их потенциале для использования в качестве стабилизаторов пен и эмульсий [128]. Индекс поверхностной гидрофобности, измеренный флюоресценцией с 1-анилинонафталин-8-сульфоновой кислотой, поверхностное натяжение, определенное на оптическом тензиометре, выявленные химические группировки и расположение связей ИК-спектроскопией с преобразованием Фурье показали, что лучшей фракцией по исследуемым свойствам была фракция ГЛ. Однако для замены ОВ на белки нута рекомендована более дешевая общая фракция белков, также с хорошими функциональными свойствами и с меньшей аллергенностью. Методами щелочной экстракции с изоэлектрическим осаждением и солевой экстракцией из зеленого горошка и нута были выделены глобулины и их фракции – легумин (ЛЕ) и вицилин (ВИ) [129] и установлено, что ЛЕ имел более высокую СП, СЭ и термическую стабильность, по сравнению с ВИ. Это было связано с большим содержанием в них серосодержащих аминокислот, SH– и S–S–групп и большей ММ белков. Тем не менее ВИ больше растворялся в воде и имел более высокую ПОС и ЖЭС, по сравнению с ЛЕ, из-за более низкой ММ и менее жесткой структуры. ПОС белков ВИ составляла 183,33%, тогда как ЛЕ – всего 36,33%, эти белки содержали и наименьшее количество ароматических соединений. Данные явились важнейшей информацией для выведения новых сортов бобовых, в том числе и тех, в которых могли бы отсутствовать нежелательные запахи.

Исследованиями структурных особенностей гороховых белков показаны различия не только в растворимости, но и в перевариваемости, в зависимости от методов их экстракции [130]. Растворимость белка в фосфатном буфере была ниже для белков, выделенных щелочной экстракцией и изоэлектрическим осаждением (ЩЭ) (27%), по сравнению с белками изолята, полученными солевой экстракцией СЭ (77%). Изменения энтальпии, связанные с денатурацией белка, были выше для ЩЭ, по сравнению с СЭ, то есть белки СЭ были более нативными, чем белки ЩЭ. Для ЩЭ обнаружено больше межбелковых гидрофобных взаимодействий, чем для СЭ, что также объясняло их более низкую растворимость, как и константу скорости протеолиза и переваривания in vitro из-за их денатурации.

Оценка влияния полифенолов на белки концентрата риса также исследована методами исследования молекулярно-структурных характеристик их комплексов [131]. Доказано ковалентное взаимодействие кофейной и кумаровой кислот фасоли с концентратом рисовых белков. Конъюгация сопровождалась уменьшением размеров до 178,4 нм, появлением отрицательных зарядов, амидов I, II, III с полосами колебаний при 3784,92, 1631,07 и 1234 $см^{-1}$ соответственно, уменьшением кристалличности и степени непрерывности поверхности. Последняя определена сканирующей электронной микроскопией. Термогравиметрический анализ выявил высокую термическую стабильность комплекса, который со своими положительными характеристиками в составе фруктового смузи улучшал текстуру, консистенцию и вкус, по сравнению с контрольным продуктом [131].

Для разработки способов регулирования функциональных свойств сухой пшеничной клейковины (СПК) предназначались данные об их зависимости от реологических показателей качества и аминокислотного состава белков [25]. Растворимость коррелировала с суммой неполярных аминокислот целой клейковины и имела отрицательную корреляцию с суммой аминокислот глиадина. Для ВСС СПК была найдена обратная зависимость от суммы полярных аминокислот двух фракций глютенина (r = –0,67 и –0,98), для ЖСС — прямая зависимость от суммы полярных аминокислот глиадина (r = 0,78) и целого комплекса СПК (r = 0,95) и обратная зависимость — от суммы неполярных аминокислот растворимого и нерастворимого глютенина (r = 0,86 и 0,92). ЖЭС положительно коррелировала с суммой неполярных аминокислот целой СПК (r = 0,70) и глиадиновой фракции (r = 0,86), отрицательно – с суммой полярных аминокислот СПК ((r = –0,62). ПОС была взаимосвязана с суммой неполярных аминокислот глиадина (r = 0,79) и обеих фракций нерастворимого глютенина (r = 0,95). Функциональные свойства СПК возможно предсказать, исходя и из ее гидратации и деформации сжатия (упругость) ($Н_{деф}$), обычно используемых для оценки хлебопекарных свойств муки. Наибольшей ПОС обладала СПК с гидратацией 190–200%, наибольшей ЖЭС — СПК со значением 140–150%. В целях обеспечения большей ПОС целесообразно использовать СПК с $Н_{деф}$. 70–80 ед. приб.; для повышения ЖЭС и ЖСС — СПК со значениями $Н_{деф}$. 60–80 ед. приб.; а для повышнеуия ВСС — с $Н_{деф}$. 50–70 ед. приб. Полученные результаты показывают, что СПК можно использовать не только в хлебопечении, но и в других пищевых системах, таких как кондитерские изделия, эмульсии, пены и т. д.

Несмотря на значительный прогресс в изучении связи между молекулярно-структурными и функциональными свойствами растительных белков, требуется дальнейшее исследование с использованием современных методов. Это позволит получить новые знания, которые производители смогут использовать для обеспечения необходимого качества пищевых продуктов.

4. Заключение

В последние годы к растительным белкам обращено особенно пристальное внимание научного сообщества, производителей, потребителей, поскольку их сырье широко распространено в природе, они имеют относительно низкую стоимость и обладают рядом преимуществ по сравнению с белками животного происхождения. Препараты растительных белков (изоляты, концентраты) ограниченно используются из-за относительно низкой функциональности, плохой растворимости и сложной структуры. К тому же, для белков характерно взаимодействие с клетчаткой, лигнином, гемицеллюлозами, что понижает их биодоступность и усвояемость. Наряду с традиционными соевыми белками и пшеничной клейковиной все больше начинают использоваться белки из альтернативных источников, таких как горох, нут, подсолнечник, чечевица и т. д. В обзоре освещены характеристики основных функциональных свойств белков, таких как водо- и жиросвязывающая способности, растворимость, жироэмульгирующие, пенообразующие, гелеобразующие свойства, способность их к текстурированию. Описаны факторы, влияющие на функциональные свойства растительных белков, включая природу и сорт культуры, методы экстракции, тепловую обработку и способы выделения из растворов. Современные знания о взаимосвязи между физико-химическими свойствами и структурно-молекулярными особенностями белков позволяют модифицировать их функциональные свойства. Это открывает возможности для улучшения и практического использования белков, а также для изменения их биологических и физиологических свойств, таких как усвояемость, иммунномоделирующая активность, антиоксидантная и антиаллергенная активности. Выбор способов модификации с учетом их достоинств и недостатков зависит от природы белков, от технологических факторов производства и от особенностей агрегатного состояния пищевых систем, в которых они используются. Химические, физические, физико-химические и ферментативные методы модификации растительных белков предназначаются для улучшения физико-химических показателей качества пищевых изделий, а также их органолептических свойств (запах, вкус, текстура и т. д.) и биологической ценности. На основе выявленных теоретических сведений по зависимости свойств и структурных особенностей белков от фенотипических и генотипических факторов возможна их модификация и регулирование для обеспечения надлежащих показателей качества белоксодержащих пищевых продуктов из различного вида растительного сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCE

1. Мартинчик, А. Н., Маев, И. В., Янушевич, О. О. (2005). Общая нутрициология. М.: МЕДпресс-информ, 2005. [Martinchik, A. N., Maev, I. V., Yanushevich, O. O. (1985). General nutrition. Moscow: MEDpress-inform, 2005. (In Russian)]
2. Нечаев, А. П., Кочеткова, А. А., Колпакова, В. В., Траубенберг, С. Е., Витол, И. С., Кобелева, И. Б. и др. (2024). Пищевая химия. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2024. [Nechaev, A. P., Kochetkova, A. A., Kolpakova, V. V., Traubenberg, S. E., Vitol, I. S., Kobeleva, I. B. et al. (2024). Food chemistry. St. Petersburg: GIORD, 2024. (In Russian)]
3. Толстогузов, В. Б. (1987). Новые формы белковой пищи. М.: Агропромиздат, 1987. [Tolstoguzov V. B. (1987). New forms of protein food. Moscow: Agropromizdat, 1987. (In Russian)]
4. Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Arabova, L. I., Lukin, D. N, Topunov, A. F, Titov, E. I. (2016). Functional technological properties and electrophoretic composition of modified wheat gluten. *Foods and Raw Materials*, 4(2), 48–57. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-48-57
5. Moll, P., Grossmann, L., Kutzli, I., Weiss, J. (2019). Influence of energy density and viscosity on foam stability — A study with pea protein (*Pisum Sativum* L.). *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(12), 1789–1796. https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1635028
6. Jakobson, K., Kaleda, A., Adra, K., Tammik, M. L., Vaikma, H., Kriščiunaite, T. et al. (2023). Techno-functional and sensory characterization of commercial plant protein powders. *Foods*, 12(14), Article 2895. https://doi.org/10.3390/foods12142805

7. Onder, S., Karaca, A. C., Ozcelik, B., Alamri, A. S., Ibrahim, S. A., Galanakis, C. M. (2023). Exploring the amino-acid composition, secondary structure, and physicochemical and functional properties of chickpea protein isolates. *ACS Omega*, 8(1), 1486–1495. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06912
8. Ma, W., Qi, B., Sami, R., Jiang, L., Li, Y., Wang, H. (2018). Conformational and functional properties of soybean proteins produced by extrusion-hydrolysis approach. *International Journal of Analitical Chemistry*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2018/9182508
9. Martinez-Velasco, A., Lobato-Calleros, C., Hernandez-Rodriguez, B. E., Roman-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J. High intensity ultrasound treatment of faba bean (Vicia faba L.) protein: Effect on surface properties, foaming ability and structural changes. *Ultrasonics — Sonochemistry*, 44, 97–105. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007
10. Tontul, İ., Kasimoglu, Z., Asik, S., Atbakan, T., Topuz, A. (2017). Functional properties of chickpea protein isolates dried by refractance window drying. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 1253–1259. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.135
11. Kolpakova, V., Gaivoronskaya I., Gulakova V., Sarjveladze A. (July 2–8, 2018). *Composition on the basis of plantbased proteins with the use of transgutaminase.* 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Albena, Bulgaria, 2018. https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.2
12. Yan, J., Zhao, S., Xu, X., Liu, F. (2023). Enhancing pea protein isolate functionality: A comparative study of high-pressure homogenization, ultrasonic treatment, and combined processing techniques. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8, Article 100653. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.1006512
13. 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(6), 2787–2798. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03723-8
14. 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
15. Karaca, A. C., Low, N., Nickerson, M. (2011). Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction. *Food Research International,* 44(9), 2742–2750. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.012
16. Колпакова, В. В., Фан, Ч. К., 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
17. Flory, J., Alavi, S. (2024). Use of hydration properties of proteins to understand their functionality and tailor texture of extruded plant-based meat analogues. *Journal of Food Science,* 89(1), 245–258. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16804
18. Колпакова, В. В., Студенникова, О. Ю. (2009). Гидратационная способность и физико-химические свойства белков пшеничной клейковины. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(308–309), 5–8. [Kolpakova, V. V., Studennikova, O. Yu. (2009). Hydration capacity and physico-chemical properties of wheat gluten proteins. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3 (308–309), 5–8. (In Russian)]
19. Ванин, С. В., Колпакова, В. В. (2007). Функциональные свойства сухой пшеничной клейковины разного качества. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 1(296), 21–24. [Vanin, S. V., Kolpakova, V. V. (2007). Functional properties of dry wheat gluten of different quality. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 1(296), 21–24. (In Russian)]
20. Колпакова, В. В., Зайцева, Л. В., Мартынова, И. В., Осипов Е. А. (2007). Белок из пшеничных отрубей: повышение выхода и функциональные свойства. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2, 23–25. [Kolpakova, V. V., Zaytseva, L. V., Martynova, I. V., Osipov Ye. A. (2007). Protein from wheaten bran: Increase of output and functional properties. *Storage and Processing of Farm Products,* 2, 23–25. (In Russian)]
21. Колпакова, В. В., Чумикина, Л. В., Арабова, Л. И. (2019). Модификация функциональных свойств белковых концентратов из белого и коричневого риса. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(1), 181–189. [Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Arabova, L. I. (2019). Modification of functional properties of white and brown rice protein concentrates. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(1), 181–189. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-181-189
22. Колпакова, В. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Уланова, Р. В. (2023). Комплексная модификация картофельного сока с получением белковых препаратов. *Пищевая промышленность*, 9, 74–79. [Kolpakova, V. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Ulanova, R. V. (2023). Obtaining protein preparations by complex modification of potato juice. *Food Industry*, 9, 74–79. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.9.9.013
23. O'Flynn, T. D., Hogan, S. A., Daly, D. F. M., O'Mahony, J. A., McCarthy, N. A. (2021). Rheological and solubility properties of soy protein isolate. *Molecules,* 26(10), Article 3015. https://doi.org/10.3390/molecules26103015
24. Lei, D., Li, J., Zhang, C., Li, S., Zhu, Z., Wang, F. et al. (2022). Complexation of soybean protein isolate with β-glucan and myricetin: Different affinity on 7S and 11S globulin by QCM-D and molecular simulation analysis. *Food Chemistry:* X, 15, Article 100426. https://doi.org/ 10.1016/j.fochx.2022.100426
25. Kolpakova, V. V., Lukin, N. D., Gaivoronskaya, I. S. (2018). Interrelation of functional properties of protein products from wheat with the composition and physicochemical characteristics of their proteins. Chapter in a book: Global Wheat Production. London: IntechOpen, 2018. http://doi.org/10.5772/intechopen.75803
26. Колпакова, В. В., Уланова, Р. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Семёнов, 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., Shevyakova, L. V. (2022). Pea and chickpea protein concentrates: Quality indicators. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 650–664. (In Russian)] http://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394
27. Rashwan, A. K., Osman, A. I., Abdelshafy, A. M., Mo, J., Chen, W. (2023). Plant-based proteins: Advanced extraction technologies, interactions, physicochemical and functional properties, food and related applications, and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–28. http://doi.org/10.1080/10408398.2023.2279696
28. Huang, L., Ding, X., Dai, C., Ma, H. (2017). Changes in the structure and dissociation of soybean protein isolate induced by ultrasound-assisted acid pretreatment. *Food Chemistry*, 232, 727–732. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.077
29. 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. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2593–2605. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248
30. Singhal, A., Karaca. A. C., Tyler, R., Nickerson, M. (2016). Pulse Proteins: From processing to structure-function relationships. Chapter in a book: Grain Legumes. London: IntechOpen, 2016. https://doi.org/10.5772/64020
31. Stone, A. K., Karalash, A., Tyler, R. T., Warkentin, T. D., Nickerson, M. T. (2015). Functional attributes of pea protein isolates prepared using different extraction methods and cultivars. *Food Research International*, 76, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.017
32. Gültekin Subaşı, B., Vahapoğlu, B., Capanoglu, E., Mohammadifar, M. A. (2022). A review on protein extracts from sunflower cake: Techno-functional properties and promising modification methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(24), 6682–6697. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1904821
33. Le Priol, L., Dagmey, A., Morandat, S., Saleh, K., El Kirat, K., Nesterenko, A. (2019). Comparative study of plant protein extracts aswall materials for the improvement of the oxidative stability of sunflower oil by microencapsulation. *Food Hydrocolloids*, 95(2), 105–115. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.026
34. Albe Slabi, S., Mathe, C., Basselin, M., Framboisier, X., Ndiaye, M., Galet, O. et al. (2020). Multi-objective optimization of solid/liquid extraction of total sunflower proteins from cold press meal. *Food Chemistry,* 317, Article 126423. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126423
35. Malik, M. A., Saini, C. S. (2017). Polyphenol removal from sunflower seed and kernel: Effect on functional and rheological properties of protein isolates. *Food Hydrocolloids*, 63, 705–715. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.026
36. Alexandrino, T. D., Ferrari, R. A., de Oliveira, L. M., de Cássia, S. C. Ormenese, R., Pacheco, M. T. B. (2017). Fractioning of the sunflower flour components: Physical, chemical and nutritional evaluation of the fractions. *LWT*, 84, 426–432. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.062
37. Shen, Y., Tang, X., Li, Y. (2021). Drying methods affect physicochemical and functional properties of quinoa protein isolate. *Food Chemistry*, 339, Article 127823. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127823
38. Osen, R., Toelstede, S., Wild, F., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2014). High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. *Journal of Food Engineering*, 127, 67–74. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.023
39. Pietrysiak, E., Smith, D. M., Smith, B. M., Ganjyal, G. M. (2018). Enhanced functionality of pea-rice protein isolate blends through direct steam injection processing. *Food Chemistry*, 243, 338–344. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.132
40. Ma, K. K., Greis, M., Lu, J., Nolden, A. A., McClements, D. I., Kinchla, A. J. (2022). Functional performance of plant proteins. *Foods*, 11(4), Article 594. https://doi.org/10.3390/foods11040594
41. Lafarga, T., Álvarez, C., Villaró, S., Bobo, G., Aguiló-Aguayo, I. (2019). Potential of pulse-derived proteins for developing novel vegan edible foams and emulsions. *International Journal of Food Science and Technology,* 55(2), 475–481. https://doi.org/10.1111/ijfs.14286
42. Gundogan, R., Can Karaca, A. (2020). Physicochemical and functional properties of proteins isolated from local beans of Turkey. *LWT*, 130, Article 109609. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109609
43. Keskin, S. O., Ali, T. M., Ahmed, J., Shaikh, M., Siddiq, M., Uebersax, M. A. (2021). Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber–A review. *Legume Science*, 4(1), Article e117. https://doi.org/10.1002/leg3.117
44. Pasupuleti, V. K., Braun, S. (2010). State of the art manufacturing of protein hydrolysates. Chapter in a book: Protein Hydrolysates in Biotechnology. Springer Dordrecht, 2010. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6674-0_2
45. 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
46. Ramani, A., Kushwaha, R., Malaviya, R., Kumar, R., Yadav, N. (2021). Molecular, functional and nutritional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolates prepared by modified solubilization methods. *Journal of Food Measurement and Characterization,* 15(3), 2352–2368. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00778-6
47. Brayden, M., L. Xu, G., Barbay, G., Koros, W. (March 26–30, 2017*). Impact of impurities on carbon molecular sieve membranes for applications in olefins units.* Spring Meeting and 13th Global Congress on Process Safety. Henry Gonzalez Convention Center, San Antonio, 2017.
48. Adebiyi, A. P., Aluko, R. E. (2011). Functional properties of protein fractions obtained from commercial yellow field pea (Pisum sativum L.) seed protein isolate. *Food Chemistry*, 128(4), 902–908. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.116
49. Vélez-Erazo, E. M., Silva, I. L., Comunian, T., Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D. (2021). Effect of chia oil and pea protein content on stability of emulsions obtained by ultrasound and powder production by spray drying. *Journal of Food Science and Technology*, 58(10), 3765–3779. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04834-3

50. Houde, M., Khodaei, N., Benkerroum, N., Karboune, S. (2018). Barley protein concentrates: Extraction, structural and functional properties. *Food Chemistry*, 254, 367–376. https://doi.org/ 10.1016/j.foodchem.2018.01.156
51. Olagunju, A. I., Omoba, O. S., Enujiugha, V. N., Alashi, A. M., Aluko, R. E. (2018). Antioxidant properties, ACE/renin inhibitory activities of pigeon pea hydrolysates and effects on systolic blood pressure of spontaneously hypertensive rats. *Food Science and Nutrition,* 6(7), 1879–1889. https://doi.org/10.1002/fsn3.740
52. 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
53. Lobanov, V. G., Slepokurova, Y. I., Zharkova, I. M., Koleva, T. N., Roslyakov, Y. F., Krasteva, A. P. (2018). Economic effect of innovative flour-based functional foods production. *Foods and Raw Materials,* 6(2), 474–482. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-2-474-482
54. Akter, D., Begum, R., Rahman, Md. N., Talukder, N., Alam, J. (2020). Optimization of extraction process parameter for rice bran protein concentrate and its utilization in high protein biscuit formulation. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8(2), 596–608. https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.2.25
55. Higa, F., House, J. D., Nickerson, M. T. (2023). Functionality and nutritional properties of yellow pea, green lentil, chickpea, and navy bean proteins extracted by different methods. *European Food Research and Technology,* 250(1), 273–286. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04385-9
56. Bajaj, P. R., Bhunia, K., Kleiner, L., Joyner (Melito), H. S., Smith, D., Ganjyal, G. et al. (2017). Improving functional properties of pea protein isolate for microencapsulation of flaxseed oil. *Journal of Microencapsulation*, 34(2), 218–230. https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1317045
57. Mession, J.-L., Chihi, M. L., Sok N., Saurel, R. (2015). Effect of globular pea proteins fractionation on their heat-induced aggregation and acid cold-set gelation. *Food Hydrocolloids*, 46, 233–243. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.025
58. Sun, X. D., Arntfield, S. D. (2011). Gelation properties of salt-extracted pea protein isolate induced by heat treatment: Effect of heating and cooling rate. *Food Chemistry*, 124(3), 1011–1016. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.063
59. Moreno, H. M., Domínguez-Timón, F., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M., Borderías, A. J., Tovar, C. A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolate: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 99(4), Article 105375. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105375
60. Knopfe, C., Shwenke, K. D., Mothes, R., Mikheeva, L. M., Grinberg, V., Görnitz, E. et al. (1998). Acetilation and succinylated of faba bean legumin: Modification of hydrophobicity and conformation. *Food/Nahrung*, 42(03–04), 194–196.
61. Shih, F. F., Hamada, J. S., Marshall, W. E. (1999). Deamidation and phosphorylation to improve protein functionality in foods. Chapter in a book: Molecular aapproaches to improving food quality and safety. Springer New York, NY, 1999. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8070-2_2
62. Fang, L., Xiang, H., Sun-Waterhouse, D., Cui, C., Lin, J. (2020). Enhancing the usability of pea protein isolate in food applications through modifying its structural and sensory properties via deamidation by glutaminase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 68 (6), 1691–1697. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06046
63. Gallart-Palau, X., Serra A., Sze, S. K. (2015). Uncovering neurodegenerative protein modifications via proteomic profiling. Chapter in a book: International Review of Neurobiology. Academic Press, 2015. https://doi.org/10.1016/bs.irn.2015.06.002
64. Schwenke, K. D., Mothes, R., Dudek, S., Görnitz, E. (2000). Phosphorylation of the 12S globulin from rapeseed (Brassica napus L.) by phosphorous oxychloride: Chemical and conformational aspects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 48(3), 708–715. https://doi.org/10.1021/jf9907900
65. Liu, Y., Wang, D., Wang, J., Yang, Y., Zhang, L., Li, J., et al. (2019). Functional properties and structural characteristics of phosphorylated pea protein isolate. *International Journal of Food Science and Technology*. https://doi.org/10.1111/ijfs.14391
66. Nikbakht Nasrabadi, M., Sedaghat Doost, A., 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
67. Ma, W., Wang, T., Wang, J., Wu, D., Wu, C., Du, M. (2020). Enhancing the thermal stability of soy proteins by preheat treatment at lower protein concentration. *Food chemistry*, 306, Article 125593. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125593
68. Zhao, M., Xiong, W., Chen, B., Zhu, J., Wang, L. (2020). Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH12: Insight into protein structure. *Food Hydrocolloids*, 103. Article 105626. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105626
69. Mir, N. A., Riar, C. S., Singh, S. (2020). Ctructural modification in album (Chenopodium album) protein isolates due to controlled thermal modification and its relationship with protein digestibility and its relationship with protein digestibility and functionality. *Food Hydrocolloids*, 103, Article 105708. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105708
70. Bühler, J. M., Dekkers, B. L., Bruins, M. E., van der Goot, A. J. (2020). Modifying faba bean protein concentrate using dry heat to increase water holding capacity. *Foods*, 9(8), Article 1077. https://doi.org/10.3390/foods9081077
71. Ling, B., Cheng, T., Wang, S. (2019). Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2622–2642. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651690
72. Guo, C., Wang, X., Wang, Y. (2018). Dielectric properties of soy protein isolate dispersion and its temperature profile during radio frequency heating. *Journal of Food Processing and Preservation,* 42(7), Article e13659. https://doi.org/10.1111/jfpp.13659
73. Ling, B., Ouyang, S., Wang, S. (2019). Effect of radio frequency treatment on functional, structural and thermal behaviors of protein isolates in rice bran. *Food Chemistry,* 289, 537–544. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.072
74. Hassan, A. B., von Hoersten, D., Mohamed Ahmed, I. A. (2019). Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain. *Food Chemistry,* 271, 142–147. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.190
75. Moll, P., Salminen, H., Schmitt, C., Weiss, J. (2021). Impact of microfluidization on colloidal properties of insoluble pea protein fractions. *European Food Research and Technology*, 247(3), 545–554. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03629-2
76. Vall-llosera, M., Jessen, F., Henriet, P., Marie, R., Jahromi, M., Sloth, J. J. (2021). Physical stability and interfacial properties of oil in water emulsion stabilized with pea protein and fish skin gelatin. *Food Biophysics*, 16(1), 139–151. https://doi.org/10.1007/s11483-020-09655-7
77. Asif, M. N., Imran, M., Ahmad, M. H., Khan M. K., Hailu, G. G. (2024). Physicochemical and functional properties of *Moringa* seed potein treated with ultrasound. *ACS Omega,* 9(3), 4102–4110. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09323
78. Yao, G., Guo, Y., Cheng, T., Wang, Z., Li, B., Xia, C. et al. (2022). Effect of γ-irradiation on the physicochemical and functional properties of rice protein. *Food Science and Technology (Campinas),* 42(1), Article e12422. http://dx.doi.org/10.1590/fst.12422
79. Helmick, H., Rodriguez, N., Kokini, J. L. (2023). Utilization of creep ringing and bioinformatic modelling in study of cold denatured pea protein emulsions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 88, Article 103420. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103420
80. Zhang, Z., Zhang, L., He, S., Li, X., Jin, R., Liu, Q. et al. (2023). High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review. *Food Reviews International*, 39(8), 4873–4908. http://doi.org/10.1080/87559129.2021.2024223
81. Meng, X.-Y., Zhu, X.-Q., An, H.-Z., Yang, J.-F., Dai, H.-H. (2023). Study on the relationship between raw material characteristics of soybean protein concentrate and textured vegetable protein quality. *Food Science Technology (Campinas)*, 43(2), Article e121822. https://doi.org/10.1590/fst.121822
82. Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., van der Goot, A. J. (2019). Plant-based meat analogues. Chapter in a book: Sustainable Meat Production and Processing, Cambridge: Academic Press, 2019. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7
83. Liu, Y., Huang, Z.-H., Hu, Z.-X., Yu, Z., An, H.-Z. (2022). Texture and rehydration properties of texturised soy protein: analysis based on soybean 7S and 11S proteins. *International Journal of Food Science and Technology,* 58(1), 323–333. https://doi.org/10.1111/ijfs.15787
84. Samard, S., Ryu, G.-H. (2019). Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs. *Journal of Food Processing and Preservation,* 43(2), Article 14123. https://doi.org/10.1111/jfpp.14123
85. Semenova, M. (2017). Protein-polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 28, 15–21. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.12.003
86. Liu, S., Low, N. H., Nickerson, M. T. (2009). Effect of pH, salt, and biopolymer ratio on the formation of pea protein isolate-gum Arabic complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1521–1506. https://doi.org/10.1021/jf802643n
87. Klemmer, K. J., Waldner, L., Stone, A., Low, N. H., Nickerson, M. T. T. (2012). Complex coacervation of pea protein isolate and alginate polysaccharides. *Food Chemistry*, 130(3), 710–715. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.114
88. Lan, Y., Chen, B., Rao, J. (2018). Pea protein isolate–high methoxyl pectin soluble complexes for improving pea protein functionality: Effect of pH, biopolymer ratio and concentrations. *Food Hydrocolloids*, 80, 245–253. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.021
89. Yekta, R., Assadpour, E., Hosseini, H., Jafari, S. M. (2023). The influence of ionic polysaccharides on the physicochemical and techno-functional properties of soy proteins; a comprehensive review. *Carbohydrate Polymers,* 319, Article 21191. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121191
90. Silva, F. G., Passerini, A. B. S., Ozorio, L., Picone, C. S. F., Perrechil, F. A. (2024). Interactions between pea protein and gellan gum for the development of plant-based structures. *International Journal of Biological Macromolecules*, 255, Article 128113. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128113
91. Lopes-da-Silva, J. A., Monteiro, S. R. (2019). Gelling and emulsifying properties of soy protein hydrolysates in the presence of a neutral polysaccharide. *Food Chemistry,* 294, 216–223. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.039
92. Beniwal, A. S., Singh, J., Kaur, L., Hardacre, A., Singh, H. (2021). Meat analogs: Protein restructuring during thermomechanical processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,* 20(2), 1221–1249. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12721
93. Florowska, A., Hilal, A., Florowski, T., Wroniak, M. (2020). Addition of selected plant-derived proteins as modifiers of inulin hydrogels properties. *Foods*, 9(7), Article 845. https://doi.org/10.3390/foods9070845
94. Salles, J., Gueugneau, M., Patrac, V., Malnero-Fernandez, C., Guillet, C., Le Bacquer, O. et al. (2023). Associating inulin with a pea protein improves fast-twitch skeletal muscle mass and muscle mitochondrial activities in old rats. *Nutrients*, 15(17), Article 3766. https://doi.org/10.3390/nu15173766
95. Maumela, P., van Rensbur., E., Chimphango, A. F. A., Görgens, J. F. (2020). Sequential extraction of protein and inulin from the tubers of *Jerusalem artichoke* (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 775–786. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04110-z
96. Strasser, R. (2016). Plant protein glycosylation. *Glycobiology*, 26(9), 926–939. https://doi.org/10.1093/glycob/cww023
97. Zhao, C., Yin, H., Yan, J., Qi, B., Liu, J. (2020). Structural and physicochemical properties of soya bean protein isolate/maltodextrin mixture and glycosylation conjugates. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 3315–3326. https://doi.org/10.1111/ijfs.14595
98. Abe, R., Matsukaze, N., Kobayashi, H., Yamaguchi, Y., Uto-Kondo, H., Kumagai, H. et al. (2020). Allergenicity of deamidated and/or peptide-bond-hydrolyzed wheat gliadin by transdermal administration. *Foods,* 9(5), Article 635. https://doi.org/10.3390/foods9050635
99. Klost, M., Drusch, S. (2019). Functionalisation of pea protein by tryptic hydrolysis — characterisation of interfacial and functional properties. *Food Hydrocolloids,* 86(1), 134–140. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.013

100. Brückner-Gühmann, M., Heiden-Hecht, T., Sözer, N., Drusch, S. (2018). Foaming characteristics of oat protein and modification by partial hydrolysis. *European Food Research and Technology,* 244(12), 2095–2106. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3118-0
101. Tamm, F., Herbst, S., Brodkorb, A., Drusch S. (2016). Functional properties of pea protein hydrolysates in emulsions and spray-dried microcapsules. *Food Hydrocolloids,* 58, 204–214. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.032
102. García Arteaga, V., Apéstegui Guardia, M., Muranyi, I., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2020). Effect of enzymatic hydrolysis on molecular weight distribution, techno-functional properties and sensory perception of pea protein isolates. *Innovative Food Science and Emerging Technologies,* 65, Article 102449. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102449
103. Eckert, E., Han, J., Swallow, K., Tian, Z., Jarpa-Parra, M., Chen, L. (2019). Effects of enzymatic hydrolysis and ultrafiltration on physicochemical and functional properties of faba bean protein. *Cereal Chemistry,* 96(4), 725–741. https://doi.org/10.1002/cche.10169
104. Barać, M., Čabrilo, S., Pešić, M., Stanojević, S., Pavlićević, M., Maćej, O. et al. (2011). Functional properties of pea (Pisum sativum, L.) protein isolates modified with chymosin. *International Journal of Molecular Sciences,* 12(12), 8372–8387. https://doi.org/10.3390/ijms12128372
105. Лозовский, И. В. Орлова, Т. В. (13–15 июля 2022). *Модификация функциональных свойств белков гороха (Pisum sativum l.).* Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов». Курск, 2022. [Lozovsky, I. V. Orlova, T. V. (June 13–15, 2022). *Modification of functional properties of pea (Pisum sativum l.) proteins.* Proceedings of the 4th International scientific-practical conference "Problems and prospects of scientific innovative provision of the agro-industrial complex of regions". Kursk, 2022. (In Russian)]
106. Cruz-Chamorro, I., Santos-Sánchez, G., Álvarez-López, A. I., Pedroche, J., Lardone, P. J., Arnoldi, A. et al. (2023). Pleiotropic biological effects of *Lupinus* spp. protein hydrolysates. *Trends in Food Science and Technology.* 133, 244–266 https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.011
107. Esfandi, R., Willmore, W. G., Tsopmo, A. (2019). Peptidomic analysis of hydrolyzed oat bran proteins and their in vitro antioxidant and metal chelating properties. *Food Chemistry,* 279, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.110
108. Chen, L., Chen, J., Yu, L., Wu, K., Zhao, M. (2018). Emulsification performance and interfacial properties of enzymically hydrolyzed peanut protein isolate pretreated by extrusion cooking. *Food Hydrocolloids,* 77, 607–616. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.002
109. Schlegel, K., Leidigkeit, A., Eisner, P., Schweiggert–Weisz, U. (2019). Techno-functional and sensory properties of fermented lupin protein isolates. *Foods,* 8(12), Article 678. https://doi.org/10.3390/foods8120678
110. Балабан, Н. П., Шарипова, М. Р. (2011). Практическое применение бациллярных протеаз. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 153(2), 29–40. [Balaban, N. P., Sharipova, M. R. (2011). Practical application of bacilli proteases. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series,* 153(2), 29–40. (In Russian)]
111. Колпакова, В. В., Чумикина, Л. В., Васильев, А. В., Арабова, Л. И., Топунов, А. Ф. (2011). Особенности действия эндо- и экзопротеиназных ферментных препаратов на белки пшеничной клейковины. *Биотехнология*, 3, 63–73. [Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Vasiliev, A. V., Arabova, L. I., Topunov, A. F. (2011). A special effect of endo- and exoproteinase enzyme preparations on wheat gluten proteins. *Biotekhnologiya*, 3, 63–73. (In Russian)]
112. Felix, M., Cermeño, M., FitzGerald, R. J. (2020). Influence of hydrolysis on the bioactive properties and stability of chickpea–protein–based o/w emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(37), 10118–10127. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02427
113. Liu, X., Wang, C., Zhang, X., Zhang, G., Zhou, J., Chen, J. (2022). Application prospect of protein-glutaminase in the development of plant-based protein. *Foods*, 11(3), Article 440. https://doi.org/10.3390/foods11030440
114. Zheng, N., Long, M., Zhang, Z., Zan. Q., Osire, T., Zhou, H. et al. (2022). Protein-glutaminase engineering based on isothermal compressibility perturbation for enhanced modification of soy protein usolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(43), 13969–13978. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06063
115. Qu, R., Zhu, X., Tian, M., Liu, Y., Yan, W., Ye, J. et al. (2018). Complete genome sequence and characterization of a protein–glutaminase producing strain, *Chryseobacterium proteolyticum* QSH1265. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1975. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01975
116. Amobonye, A., Singh, S., Pillai, S. (2019). Recent advances in microbial glutaminase production and applications–a concise review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(7), 944–963. https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1640659
117. Kumagai, H., Urade, R. (2019). Deamidation of gluten proteins as a tool for improving the properties of bread. Chapter in a book: Flour and breads and their fortification in health and disease prevention. Academic Press, 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814639-2.00001-0
118. Chen, X., Fu, W., Luo, Y., Cui, C., Suppavorasatit, I., Liang, L. (2021). Protein deamidation to produce processable ingredients and engineered colloids for emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3788–3817. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12759
119. Moreno, H. M., Tovar, C. A., Domínguez-Timón, F., Cano-Báez, J., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M. et al. (2020). Gelation of commercial pea protein isolate: Effect of microbial transglutaminase and thermal processing. *Food Science and Technology (Campinas)*, 40(4), 800–809. http://dx.doi.org/10.1590/fst.19519
120. Yaputri, B. P., Feyzi, S., Ismail, B. P. (2023). Transglutaminase-induced polymerization of pea and chickpea protein to enhance functionality. *Gels*, 10(1), Article 11. http://dx.doi.org/10.3390/gels10010011
121. Masiá, C., Ong, L., Logan, A., Stockmann, R., Gambetta, J., Jensen, P. et al. (2023). Enhancing the textural and rheological properties of fermentation-induced pea protein emulsion gels with transglutaminase. *Soft Matter*, 20(1), 133–143. https://doi.org/10.1039/D3SM01001E
122. Zhang, J., Li, T., Chen, Q., Liu, H., Kaplan, D. L., Wang, Q. (2023). Application of transglutaminase modifications for improving protein fibrous structures from different sources by high-moisture extruding. *Food Research International,* 166(2), Article 112623. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112623
123. Redd, A. J., Pike, O. A., Ahlborn, G. J. (2023). Effects of microbial transglutaminase on gluten-free sourdough bread structure and loaf characteristics. *Journal of Cereal Science*, 115(10), Article 103833. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103833
124. Shen, Y., Hong, S., Li, Y. (2022). Pea protein composition, functionality, modification, and food applications: A review. *Advances in Food and Nutrition Research,* 101, 71–127. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.02.002
125. 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(1), 37–45. https://doi.org/10.1007/s11130-020-00871-7
126. Lei, D., Li, J., Zhang, C., Li, S., Zhu, Z., Wang, F. et al. (2022). Complexation of soybean protein isolate with β-glucan and myricetin: Different affinity on 7S and 11S globulin by QCM-D and molecular simulation analysis. *Food Chemistry: X,* 15(3), Article 100426. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100426
127. Feng, X., Wu, X., Gao, T., Geng, M., Teng, F., Li, Y. (2024). Revealing the interaction mechanism and emulsion properties of carboxymethyl cellulose on soy protein isolate at different pH. *Food Hydrocolloids*, 150(4), Article 109739. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109739
128. Soto–Madrid, D., Pérez, N., Gutiérrez-Cutiño, M., Matiacevich, S., Zúñiga, R. N. (2023). 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*, 1(15), Article 110. https://doi.org/10.3390/polym15010110
129. Chang, L., Lan, Y., Bandillo, N., Ohm, J.-B., Chen, B., Rao, J. (2021). Plant proteins from green pea and chickpea: Extraction, fractionation, structural characterization and functional properties. *Food Hydrocolloids,* 123(20), Article 107165. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107165
130. Verkempinck, S. H. E., Duijsens, D., Mukherjee, A., Wilde, P. J. (2024). Pea protein extraction method impacts the protein (micro)structural organisation and *in vitro* digestion kinetics. *Food and Function*, 15(20), 953–966. https://doi.org/10.1039/D3FO04225A
131. GopikaJayaprakash, Chawla, P., Sridhar, K., Bains, A. (2023). Interactions of legume phenols-rice protein concentrate towards improving vegan food quality: Development of a protein–phenols enriched fruit smoothie. *Food Research International,* 171(1), Article 113075. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113075

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Колпакова Валентина Васильевна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом биотехнологии комплексной переработки крахмалсодержащего сырья, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 Тел.: + 7–915–285–84–50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * автор для контактов	**Valentina V. Kolpakova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Biotechnology for the Complex Processing of Starch-Containing Raw Materials, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia Tel.: + 7–915–285–84–50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * corresponding author
Бызов Василий Аркадьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 Тел.: + 7–977–714–64–80 E-mail: byzov1966@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1918-4455	**Vasily A Byzov**, Candidate of Agricultural Sciences, Director, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia Tel.: + 7–915–285–84–50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-336-344

Поступила 09.04.2024
Поступила после рецензирования 17.07.2024
Принята в печать 22.07.2024
© Полубесова М. А., Мечтаева Е. В., Чернов А. Д., Ситнов В. Ю., Журавлева А. З., 2024

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛКА В РАЦИОНАХ ПЕРЕПЕЛОВ: ОБЗОР

Полубесова М. А.[1]*, Мечтаева Е. В.[1], Чернов А. Д.[2], Ситнов В. Ю.[1], Журавлева А. З.[1]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок, Санкт-Петербург, Россия

[2] Федеральный центр охраны здоровья животных, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
альтернативные белки, перепела, растения, насекомые, водоросли, грибы

АННОТАЦИЯ

Рост населения Земли и стремление людей к здоровому образу жизни приводят к увеличению мирового спроса на белковую пищу. Перепела являются ценным источником белка, который, как считается, снижает риск развития ожирения и сердечно-сосудистых заболеваний. Включение альтернативных источников белка в состав кормов для перепелов является ответом на экологические проблемы, связанные с использованием традиционных источников белка. Среди наиболее часто упоминаемых альтернативных источников белка в научных исследованиях можно выделить растения, насекомые, водоросли и грибы. Целью данного обзора является анализ научной литературы, посвященной использованию растений, насекомых, водорослей и грибов как альтернативных источников белка в кормах для перепелов. Растительные источники белка, такие как соя и кукуруза, успешно используются в кормопроизводстве. Однако исследования показали, что добавление в корма других источников, в том числе побочных продуктов растениеводства, позволит повысить экологичность и снизить зависимость отрасли от традиционного сырья. Мука из личинок черной львинки (*Hermetia illucens*) является перспективным и наиболее широко изученным источником белка среди насекомых и способна положительно влиять на продуктивность и здоровье перепелов. Среди водорослей следует выделить спирулину *(Spirulina platensis* и *Arthrospira platensis)*, при добавлении 4% порошка из которой у птиц улучшились показатели продуктивности. Грибы описываются как перспективный источник белка в кормах, также способный обеспечить повышение продуктивности и качества мяса птиц, однако на данный момент проведено мало исследований по этому направлению. Проведение дальнейших исследований использования альтернативных источников белка в рационах перепелов рекомендуется сосредоточить на вопросах безопасности их применения и на более подробном изучении экономической целесообразности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2024-0010 и № FGUS-2022-0018 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 09.04.2024
Accepted in revised 17.07.2024
Accepted for publication 22.07.2024
© Polubesova M. A., Mechtaeva E. V., Chernov A. D., Sitnov V. Yu., Zhuravleva A. Z., 2024

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

THE USE OF ALTERNATIVE PROTEIN SOURCES IN QUAIL DIETS: A REVIEW

Mariia A. Polubesova[1]*, Elizaveta V. Mechtaeva[1], Aleksandr D. Chernov[2], Veniamin Yu. Sitnov[1], Aigul Z. Zhuravleva[1]

[1] All-Russia Research Institute for Food Additives, Saint Petersburg, Russia

[2] Federal Centre for Animal Health, Saint Petersburg, Russia

KEY WORDS:
alternative proteins, quail, plants, insects, algae, mushrooms

ABSTRACT

The growth of the Earth's population and people's striving for healthy life style lead to an increase in the global demand for protein food. Quails are a valuable source of protein, which is thought to reduce the risk of obesity and cardiovascular diseases. Inclusion of alternative protein sources into the composition of feeds for quails is an answer to ecological problems associated with the use of traditional protein sources. Plants, insects, algae and mushrooms are among alternative protein sources that are mentioned most frequently in scientific studies. The aim of this review is analysis of scientific literature dedicated to the use of plants, insects, algae and mushrooms as alternative protein sources in feedstuff for quails. Plant sources of protein, such as soya and maize, are successfully used in feedstuff production. However, studies have shown that addition of other sources, including by-products of crop husbandry, will allow increasing sustainability and reducing the dependence of the industry on traditional raw materials. Flour from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae is the promising and most widely studied source of protein among insects and can positively affect productivity and health of quails. Among algae, it is necessary to mention spirulina *(Spirulina platensis* and *Arthrospira platensis)*. Upon addition of 4% of the spirullina powder, productivity parameters in poultry increased. Mushrooms are described as a promising protein source in feedstuff that is also capable of ensuring an increase in productivity and quality of poultry meat. Today, however, there are few studies on this subject. It is recommended to focus further studies of the application of alternative protein sources in quail diets on questions of safety of their use and more detailed analysis of economic feasibility.

FUNDING: This article was published as part of the research topic No. FGUS-2024-0010 and No. FGUS-2022-0018 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Полубесова, М. А., Мечтаева, Е. В., Чернов, А. Д., Ситнов, В. Ю., Журавлева, А. З.** (2024). Использование альтернативных источников белка в рационах перепелов: обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 336–344. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-336-344

FOR CITATION: **Polubesova, M. A., Mechtaeva, E. V., Chernov, A. D., Sitnov, V. Yu., Zhuravleva, A. Z.** (2024). The use of alternative protein sources in quail diets: A review. *Food Systems,* 7(3), 336–344. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-336-344

1. Введение

Мировой спрос на продукты, богатые белком, продолжает увеличиваться, что обусловлено ростом населения планеты и растущим стремлением людей придерживаться здорового питания. Мясо птицы — животный источник белка, который связывают со снижением риска развития избыточного веса и ожирения, сердечно-сосудистых заболеваний и сахарного диабета 2 типа [1]. Исходя из прогноза Организации экономического сотрудничества и развития [2], к 2032 году мировое потребление мяса птицы вырастет до 156 237 тыс тонн, что на 12% выше по сравнению с аналогичным показателем в 2023 году.

Перепел — небольшая птица с коротким производственным циклом, представляющая интерес как источник животного белка для удовлетворения растущих потребностей населения мира. Выращивание перепелов имеет ряд преимуществ, таких как высокое качество мяса, ранняя половая зрелость и быстрый рост птицы, короткий интервал между поколениями, высокая яйценоскость, а также ограниченное количество корма и требуемое пространство на одну птицу [3].

В состав кормов для перепелов входят классические источники белка, такие как рыбная мука, соя и кукуруза. Однако экологические проблемы, связанные с данными источниками, например, чрезмерные вырубки лесов и неустойчивое рыболовство, приводят мировое научное сообщество к поиску альтернативных источников белка. Включение перспективных альтернативных белковых ингредиентов в корма для перепелов может смягчить воздействие интенсивного производства животноводческой продукции на окружающую среду, а также обогатить качественным белком корма растущих птиц. К наиболее популярным из них, рассматриваемых в научной литературе, относятся растения, насекомые, водоросли и грибы (Рисунок 1).

Среди растительных источников белка соя и кукуруза уже активно используются в кормах для сельскохозяйственных животных, однако в современных исследованиях рассматривается также возможность использования побочных продуктов растениеводства в кормах для перепелов. Так, например, измельченные сушеные листья маниоки являются источником белка с хорошим профилем незаменимых аминокислот. Мука из насекомых является возможной альтернативой соевому шроту и рыбной муке, благодаря большому содержанию белка и питательных веществ, а также чрезвычайно низкому воздействию на окружающую среду и возможности выращивания на вторичном сырье [4]. В научной литературе одним из наиболее широко изученных видов насекомых, рассматриваемых с точки зрения использования в рационах перепелов, является черная львинка *(Hermetia illucens)*. Как альтернативный источник белка в рационе птиц водоросли также имеют в своем составе большое количество питательных веществ и могут использоваться для улучшения здоровья и продуктивности птиц, а также для повышения качества мяса и яиц. Содержание белка в спирулине *(Spirulina platensis)* может достигать до 70% сухой массы, что выше, чем количество белка в соевых бобах, содержащих около 40% белка [5]. Исследований, направленных на изучение использования грибов в рационах перепелов, значительно меньше по сравнению с вышеперечисленными источниками. Тем не менее одним из примеров может служить шампиньон двуспоровый *(Agaricus bisporus)*, который обладает иммуномодулирующими свойствами.

Исходя из вышесказанного, цель данного обзора — анализ научной литературы, посвященной использованию растений, насекомых, водорослей и грибов как альтернативных источников белка в кормах для перепелов.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являлись научные публикации, посвященные возможности использования растений, насекомых, водорослей и грибов в кормах для перепелов. Поиск литературных источников осуществлялся с помощью поисковой системы Google Scholar и базы данных PubMed по ключевым словам: «растения в рационах перепелов», «насекомые в рационах перепелов», «водоросли в рационах перепелов», «грибы в рационах перепелов» и по конкретным источникам альтернативных белков.

3. Растения

На данный момент изучена возможность использования растений следующих семейств как белковых ингредиентов в кормах для перепелов: бобовые (соя, нут, арахис), злаковые (кукуруза, сорго, рис), капустные (канола), молочайные (маниока), мальвовые (хлопчатник), пальмовые (финиковая пальма). В Таблице 1 представлены достоинства и недостатки использования растений в качестве источников белка в рационах перепелов.

Традиционно как белковый компонент в состав кормов для перепелов входит рыбная мука, соевый шрот или кукуруза. Тем не менее в научной литературе соя и кукуруза зарекомендовали себя как отдельно взятые перспективные альтернативные источники белка. Например, в исследовании [18] сравнивалось влияние включения соевого шрота и рыбной муки в рацион перепелов. По сравнению с рыбной мукой включение 21% соевого шрота в состав корма привело к наибольшей средней дневной прибавке в весе и к наилучшим абсолютным показателям веса перепелов в возрасте 2–4 недель. Тем не менее включение 19% соевого шрота и 19% рыбной муки привело к наилучшему коэффициенту конверсии корма по сравнению с другими группами. В работе [19] исследовалось влияние включения соевых бобов, ферментированных *Aspergillus oryzae*, на показатели роста и на яйценоскость перепелов-несушек. Перепела, получавшие экспериментальные рационы, продемонстрировали больший прирост массы тела по сравнению с контрольной группой. Несмотря на это, за 7 последовательных 28-дневных периодов авторы не обнаружили существенного влияния экспериментальных рационов на показатель яйценоскости птиц.

Соя и продукты ее переработки повсеместно используются для производства кормов, благодаря высокому содержанию белка. Рост объемов производства мяса ведет и к росту в потребности в кормах, следовательно, поиск более дешевых и экологичных замен сои является актуальной задачей. Авторы A. A. Odunsi и A. A. Rotimi [20] провели исследование влияния включения 30% соевого шрота и аналогичных уровней арахисового жмыха, жмыха семян хлопчатника на рост и яйценоскость перепелов-несушек. В результате проведенного исследования выявлено, что три группы перепелов, употреблявших вышеуказанные источники растительного белка, не имели существенных различий в показателях ежедневного потребления корма и ежедневного прироста массы тела. Перепела, в рацион которых добавляли соевый шрот, имели более высокую яйценоскость по сравнению с другими группами.

Рисунок 1. **Альтернативные источники белка в рационах перепелов**
Figure 1. **Alternative protein sources in quail diets**

Таблица 1. **Использование растений как альтернативного источника белка в кормах для перепелов**

Table 1. **The use of plants as an alternative protein source in feeds for quails**

Источник белка	Форма	Преимущества	Возможные недостатки	Источник
Бобовые				
Соя	Бобы, соевый шрот	Традиционный источник растительного белка. Среди злаковых и других видов бобовых имеет самое большое содержание белка	Способна вызывать аллергию	[6]
Нут	Сырой и вареный, автоклавированный, обработанный в микроволновой печи	Отличается более высоким содержанием цинка и фосфора по сравнению с другими бобовыми	Содержит антипитательные вещества. Имеет дефицит серосодержащих аминокислот, таких как метионин и цистин	[7,8]
Арахис	Жмых	Обладает антиоксидантными свойствами	Способен вызывать аллергию. Может содержать афлатоксины	[9]
Злаковые				
Кукуруза	Зерно, барда	По энергетической ценности сопоставима с соевым шротом	Высокое содержание крахмала. Низкое содержание белка по сравнению с соей	[10]
Сорго	Зерно	Содержание сырого белка выше, чем в кукурузе	Имеет более низкую усвояемость питательных веществ, чем кукуруза. Наличие дубильных веществ. Низкое содержание каротиноидов	[11]
Рис	Дробленый	Энергетическая ценность и количество белка сопоставимы с кукурузой	Nd	[12]
Капустные				
Канола	Шрот	Имеет схожий белковый состав с соевым шротом. Дешевле соевого шрота	Имеет меньшую энергетическую ценность, чем соевый шрот. Глюкозинолат и синапин, содержащиеся в каноле, придают корму горький вкус и могут снижать потребление корма. Содержит большое количество клетчатки, что может привести к снижению усвояемости питательных веществ	[13]
Молочайные				
Маниока	Измельченные сушеные листья	Возможность использования побочных продуктов	Высокое содержание клетчатки, низкое содержание белка по сравнению с кукурузой. Присутствие синильной кислоты в горькой разновидности маниоки	[14,15]
Мальвовые				
Хлопчатник	Жмых семян	Имеет сбалансированный аминокислотный состав	Обладает токсичностью из-за содержания госсипола	[16]
Пальмовые				
Финиковая пальма	Мука из косточек фиников	Возможность использования побочных продуктов	Содержит большое количество клетчатки, что может привести к снижению усвояемости питательных веществ	[17]

Шрот канолы также рассматривается в научной литературе как возможная альтернатива сое в рационах перепелов. В исследовании [13] замена от 0 до 50% соевого шрота шротом канолы не повлияла на яйценоскость перепелов-несушек и на качественные показатели яиц, такие как длина яйца и толщина скорлупы. Кроме того, включение канолового шрота в рацион птиц привело к значимому снижению массы тела. Тем не менее в результате проведенного исследования при замене 30% соевого шрота каноловым шротом выявлено увеличение валового дохода на 14,8%, что свидетельствует об экономической целесообразности использования данного альтернативного источника белка.

Нут содержит до 20% белка [21] и является еще одним представителем бобовых, который может использоваться в качестве альтернативного источника белка в кормах для перепелов. В работе [7] рассматривалась возможность включения 60% вареного и сырого нута в рацион перепелов. В результате исследования выявлено, что группа перепелов, получавшая в свой рацион 60% сырого нута, продемонстрировала наилучшие результаты по показателям прироста массы тела и убойной массы тела по сравнению с остальными группами. Однако авторы не рекомендуют использовать 60%-ное включение вареного нута в качестве альтернативного источника белка в рацион перепелов, поскольку температурная обработка привела к ухудшению показателей продуктивности. Исследование [22], напротив, выявило, что различные тепловые обработки нута обычно не оказывают существенного влияния на показатели продуктивности перепелов-несушек. Включение 20% и 40% сырого нута, автоклавированного нута и обработанного в микроволновой печи не оказало значительного влияния на показатели потребления корма, коэффициента конверсии корма и на яйценоскость перепелов. Тем не менее между исследуемыми группами наблюдались некоторые различия с точки зрения качества яиц. Например, добавление в рацион перепелов нута, обработанного в микроволновой печи, и автоклавированного нута положительно повлияло на диаметр желтка яиц. Кроме того, автоклавирование нута привело к снижению содержания танинов в данном альтернативном источнике белка, что снизило общее количество антипитательных веществ.

Другим традиционным компонентом кормов сельскохозяйственных животных является кукуруза, она используется в том числе для кормления перепелов. Например, в работе [23] исследовалось влияние добавления кукурузы и известняка разного размера на продуктивность и качество яиц перепелов. Авторы исследования не выявили существенного влияния экспериментальных рационов на такие показатели, как масса яйца, потребление корма и коэффициент конверсии корма. Несмотря на это, в экспериментальном рационе с заменой 50% частиц мелкого известняка на крупный размер (0,947 мм) наблюдалось снижение доли разбитых яиц перепелов, что положительно характеризует влияние данного ингредиента на качество продукта.

Аналогично сое, исследователи изучают возможные способы замены кукурузной муки в кормах с целью снижения стоимости кормов и улучшения показателей продуктивности перепелов. В исследовании [12] отмечено, что дробленый рис может рассматриваться как альтернатива кукурузе. Авторы работы выявили, что дробленый рис можно использовать в рационах перепелов, заменяя до 20% кукурузы без негативных последствий для показателей среднесуточного прироста массы тела птиц, потребления корма и выживаемости. Несмотря на это, перепела, получавшие рационы с 10%-ным и 30%-ным добавлением дробленого риса, имели большую массу тела, чем птицы с 20%-ным включением данного ингредиента, что свидетельствует о необходимости поиска оптимального уровня включения.

Замена кукурузы в рационах перепелов белым сорго, красным сорго, а также их вариациями с добавлением красителей не привело к существенным различиям в показателях потребления корма, коэффициента конверсии корма, массы яиц и яйценоскости [11]. Кроме того, включение экспериментальных ингредиентов привело к снижению интенсивности цвета яичного желтка, что свидетельствует о нарушении его пигментации и об ухудшении внешнего вида.

Большой интерес с экономической и экологической точек зрения представляет изучение возможности использования побочных продуктов и отходов сельскохозяйственной и пищевой промышленности в качестве компонентов кормов. Применение маниоки в качестве источника альтернативного белка выглядит перспективным решением благодаря возможности задействовать побочный продукт растения — измельченные сушеные листья. В работе [14] включение 0–20% измельченных сушеных листьев маниоки в рацион перепелов в возрасте 1–35 дней взамен кукурузы привело к линейному увеличению потребления корма, к приросту в весе перепелов и к ухудшению конверсии корма. Среди исследуемых уровней включения авторы рекомендуют 10%-ное добавление сушеных листьев маниоки в рацион перепелов, которое привело к наилучшей конверсии корма по сравнению с остальными рассматриваемыми группами.

Кукурузная барда является побочным продуктом производства кукурузного этанола и также может рассматриваться как альтернативный источник белка в рационах перепелов. В работе [10] выявлено, что добавление 5% и 10% кукурузной барды в рацион японских перепелов-несушек привело к наибольшему индивидуальному потреблению корма. При этом включение 15% барды обеспечило наибольший вес яйца, а 20% — наилучшую конверсию корма на массу яйца. Авторы пришли к выводу, что включение 20% кукурузной барды в рацион перепелов демонстрирует наибольшую экономическую выгоду по сравнению с другими исследуемыми группами.

Еще один интересный пример возможного использования пищевых отходов в кормопроизводстве описан в работе Kamel E. R. и соавторов [17]. Авторы изучали влияние включения муки из косточек фиников на показатели роста, перевариваемость рациона, показатели крови и качество туши японских перепелов. В результате исследования выявлено, что включение муки из косточек фиников в рационы перепелов до 6% поддерживало темпы роста перепелов без отрицательного воздействия на здоровье и качество туши по сравнению с контрольным рационом.

Растительные источники белка уже используются в кормопроизводстве и являются традиционными компонентами в кормах для перепелов. В частности, соевый шрот и кукуруза присутствуют в большинстве исследуемых рецептур. Они позволяют обеспечивать продуктивность перепелов на высоком уровне, поддерживать их здоровье и качество получаемой продукции без использования рыбной муки. Тем не менее поиск замены таким источникам белка является актуальной задачей, так как позволит снизить зависимость сельского хозяйства от данного вида сырья, а также повысить экономичность и экологичность производства кормов. Ряд исследований показал также повышение продуктивности животных при замене традиционных растительных компонентов на альтернативные.

4. Насекомые

Насекомые являются естественным источником пищи для птиц на свободном выгуле и для диких птиц. Кроме того, они могут выращиваться с использованием вторичного сырья и с меньшим негативным воздействием на окружающую среду по сравнению с традиционными источниками белка (Таблица 2).

По тематике использования насекомых в рационах перепелов муха черная львинка *(Hermetia illucens)* рассматривается в научной литературе чаще других видов насекомых. Содержание белка в личинках *Hermetia illucens* варьируется от 41 до 44% от общей сухой массы, при этом черная львинка имеет аминокислотный профиль лучше, чем у соевого шрота [32].

Согласно литературным данным, мука из черной львинки способна положительно влиять на производительность, здоровье, некоторые характеристики яиц перепелов. Так, в работе авторов T. Widjastuti и R. Wiradimadja добавление личинок черной львинки в рацион самок-перепелов оказало значительное положительное влияние на исследуемые показатели производительности [25]. Авторы отметили, что при замене рыбной муки мукой из личинок *Hermetia illucens* (от 25% до 50%) рацион перепелов достиг оптимального состава, у перепелов увеличились потребление корма, масса яиц и улучшился коэффициент конверсии корма. В исследовании [33] оценивалось влияние добавления муки из личинок черной львинки *(Hermetia illucens)* на отдельные показатели иммунитета перепелов-бройлеров. Выявлено, что включение муки из личинок *Hermetia illucens* в рацион перепелов усиливало клеточный иммунный ответ: наибольшая реакция наблюдалась у групп перепелов, получавших корм с 10% муки из личинок *Hermetia illucens* в составе, а перепела контрольной группы показали самый низкий иммунный ответ. Исследование [34] также показало, что мука из насекомых может быть добавлена в состав кормов для перепелов-несушек, обеспечивая оптимальную производительность и состояние здоровья птиц. Перепела, в рацион которых добавляли обезжиренную муку из черной львинки (10% или 15%), производили более удлиненные яйца по сравнению с яйцами контрольной группы. Кроме того, вес скорлупы яиц у экспериментальных

Таблица 2. **Использование насекомых как альтернативного источника белка в кормах для перепелов**

Table 2. **The use of insects as an alternative protein source in feeds for quails**

Источник белка	Форма	Преимущества	Возможные недостатки	Источник
Черная львинка *(Hermetia illucens)*	Мука из личинок, обезжиренная мука из личинок	Содержит большое количество белка. Аминокислотный профиль сопоставим с аминокислотным профилем рыбной муки. Иммуномодулирующие свойства. Возможность выращивания на вторичном сырье	Могут накапливать загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы и пестициды. Состав питательных веществ личинок может варьироваться в зависимости от их рациона	[24,25]
Большой мучной хрущак *(Tenebrio molitor)*	Мука из личинок	Содержит большое количество белка и незаменимых аминокислот. Возможность выращивания на вторичном сырье	Могут накапливать тяжелые металлы. Способны вызывать аллергию. Могут содержать патогенные микроорганизмы. Хитин может отрицательно влиять на усвояемость питательных веществ	[24,26]
Тутовый шелкопряд *(Bombyx mori)*	Мука из куколок, обезжиренная мука из куколок	Содержит большое количество белка. Возможность выращивания на вторичном сырье	Хитин и 1-дезоксиногиримицин отрицательно влияют на усвояемость питательных веществ	[27]
Сверчок *(Gryllus bimaculatus)*	Мука	Содержит большое количество белка и незаменимых аминокислот. Возможность выращивания на вторичном сырье	Nd	[28]
Египетская хлопковая совка *(Spodoptera littoralis)*	Мука из личинок	Содержит более высокие уровни сырого белка, сырого жира, сырой клетчатки, углеводов и валовой калорийности, чем мясокостная мука. Уровень лизина, фенилаланина, треонина и изолейцина выше, чем в мясокостной муке	Nd	[29]
Кузнечик *(Oxya hyla hyla)*	Мука из имаго	Содержит большое количество белка и незаменимых аминокислот	Nd	[30]
Мадагаскарский таракан *(Gromphardorhina portentosa)*	Мука	Содержание сырого белка порядка 60% Более мягкие условия культивирования по сравнению с черной львинкой	Нет литературных сведений о показателях продуктивности	[31]

групп оказался больше, чем у контрольной, что в дальнейшем способно обеспечить большую прочность и защищенность продукции.

С другой стороны, в работе [35] различий между перепелами-бройлерами, обусловленных добавлением муки из личинок *Hermetia illucens* в рацион за счет частичной замены соевого шрота и масла, не выявлено: во всех исследуемых группах наблюдался одинаковый убойный вес, прирост живой массы, потребление корма, коэффициент конверсии корма и уровень смертности. Микробиологический состав фекалий не различался между анализируемыми группами по показателям общего количества жизнеспособных микроорганизмов, энтеробактерий, БГКП, клостридий, *Lactobacillus* spp. и *Bacillus* spp, что соотносится с рассмотренным выше исследованием авторов Pasotto D. и van Emmenes L [33]. В нем также не обнаруживались различия в показателях БГКП, *Lactobacillus* spp и других, таких как *Staphylococcus* spp., *Micrococcus* spp., *Pseudomonas* spp, между контрольной и экспериментальной группой. Таким образом, авторы [35] говорят об отсутствии как положительного, так и отрицательного влияния муки из черной львинки на продуктивность перепелов-бройлеров, что подтверждает возможность ее использования в кормах. Преимуществом муки из насекомого по сравнению с традиционными компонентами кормов может стать более высокая экологичность, а также увеличение разнообразия видов белкового сырья для кормопроизводства.

Для эффективного и безопасного использования новых компонентов в кормах необходимо учитывать не только продуктивность и экономическую целесообразность, но и изменение состава продукции, получаемой при выращивании перепелов (мяса и яиц). В работе [36] выявлено, что включение муки из личинок *Hermetia illucens* (10% и 15%) в рацион перепелов-бройлеров с частичной заменой соевого шрота и масла обеспечило увеличение количества аспарагиновой кислоты, глутаминовой кислоты, аланина, серина, тирозина и треонина в мясе. Однако включение в рацион перепелов муки из личинок *Hermetia illucens* значительно изменило соотношение жирных кислот. С увеличением количества муки из личинок *Hermetia illucens* увеличилось общее содержание насыщенных и мононенасыщенных жирных кислот в ущерб полиненасыщенных жирных кислот, что снизило полезные свойства мяса. Несмотря на это, профиль жирных кислот личинок черной львинки можно улучшить путем модуляции кормового субстрата, о чем свидетельствует работа [37]. Так, например, использование рыбных субпродуктов в выращивании черной львинки увеличило долю омега-3 полиненасыщенных жирных кислот (эйкозапентаеновой и докозагексаеновой) в мясе перепелов-бройлеров, что способно благоприятно воздействовать на здоровье человека.

Другим насекомым, рассматриваемым в научных публикациях как альтернативный источник белка в рационах перепелов, является большой мучной хрущак (*Tenebrio molitor*). В работе [38] исследовалось влияние включения муки из личинок *Tenebrio molitor* взамен рыбной муки на показатели роста, на характеристики туши и на качество мяса перепелов-бройлеров. В результате исследования было выявлено, что перепела, получавшие 22,5 и 30 г/кг муки из личинок *Tenebrio molitor*, имели наилучшие коэффициенты конверсии корма по сравнению с другими группами и наибольшую массу тела. Не было выявлено влияния экспериментального рациона на показатели относительной массы печени, сердца и желудка. В исследовании авторов S. Sarica и B. Kanoglu также рассматривалась возможность замены рыбной муки в рационе перепелов мукой из личинок *Tenebrio molitor*. Проводилось сравнение кормов с 0, 25, 50, 75 и 100% заменой рыбной муки на муку из личинок большого мучного хрущака. В результате исследования было установлено, что контрольный рацион, а также рационы с 25% и 50% заменой муки из личинок *Tenebrio molitor* продемонстрировали наибольшую конечную массу тела и прирост массы перепелов. Включение муки из личинок большого мучного хрущака в рацион перепелов снизило уровень холестерина и триглицеридов в сыворотке крови птиц по сравнению с контрольной группой. Авторы пришли к выводу, что замена до 50% рыбной муки мукой из личинок *Tenebrio molitor* может осуществляться, не влияя на исследуемые показатели продуктивности перепелов [26].

Перспективным вариантом включения муки из личинок *Tenebrio molitor* в рацион перепелов с точки зрения полученного результата является ее добавление совместно с порошком из листьев оливы европейской *(Olea europaea)*. Листья оливы европейской *(Olea europaea)* обладают гипотензивными, гипогликемическими, антиоксидантными и противоинфекционными свойствами. В исследовании [39] изучалось воздействие добавления порошка из листьев оливы европейской *(Olea europaea)* и муки из личинок *Tenebrio molitor* в рационы перепелов на продуктивность, выход туши и показатели крови. Совместное включение муки из *Tenebrio molitor* (3%) и порошка из листьев оливы европейской (2%) значительно увеличило живой вес у перепелов в возрасте от 3 до 5 недель. У перепелов, употреблявших рацион с добавлением исключительно 3% порошка из *Olea europaea,* наблюдался наилучший коэффициент конверсии корма по сравнению с другими группами. Все экспериментальные рационы не повлияли на показатели крови птиц.

Менее изученными видами насекомых с точки зрения наличия научной литературы по тематике их применения в рационах перепелов являются сверчок *(Gryllus bimaculatus),* мадагаскарский таракан (*Gromphardorhina portentosa*), египетская хлопковая совка *(Spodoptera littoralis),* кузнечик *(Oxya hyla hyla)* и тутовый шелкопряд *(Bombyx mori)*.

В исследовании [28] рассматривалась возможность замены рыбной муки в рационах самок-перепелов мукой из сверчка *(Gryllus bimaculatus)*. Авторы выявили, что включение муки из *Gryllus bimaculatus* на уровне от 2 до 8% существенно увеличивает яйценоскость, вес яйца, вес яичного белка и скорлупы перепелов. Несмотря на то, что экспериментальные рационы не повлияли на потребление и конверсию корма, в результате проведенного исследования отмечено, что мука из сверчка может частично заменять рыбную муку и использоваться как ингредиент в рационах перепелов.

В исследовании [29] изучалась возможность замены мясокостной муки в рационе перепелов мукой из личинок египетской хлопковой совки *(Spodoptera littoralis)*. В результате проведенного исследования выявлено, что замена мясокостной муки мукой из личинок *Spodoptera littoralis* (от 50 до 100%) увеличила прирост живой массы тела перепелов и улучшила коэффициент конверсии корма. Кроме того, согласно проведенным расчетам, это позволило снизить стоимость корма.

В работе [31] оценивалось влияние добавления муки из мадагаскарского таракана *(Gromphardorhina portentosa)* на гематологические и гистопатологические показатели перепелов в возрасте 1–35 дней. Добавление экспериментального рациона на уровнях от 6 до 18% и пол перепелов не оказали существенного влияния на исследуемые гематологические показатели крови. Гистопатологические исследования поджелудочной железы, двенадцатиперстной кишки, тонкой и подвздошной кишки не выявили различий между рационами. В результате проведенного исследования авторы пришли к выводу, что добавление до 18% муки из мадагаскарского таракана в рационы перепелов не влияет на состояние их здоровья.

В исследовании [30] рассматривалась возможность включения муки из имаго кузнечика *(Oxya hyla hyla)* в рацион перепелов на уровнях 50 г/кг, 100 г/кг и 150 г/кг. Авторы выявили, что группа перепелов, в рацион которых добавляли 100 г/кг муки из имаго кузнечика, показала лучшие результаты по увеличению массы тела, по коэффициенту конверсии корма и по яйценоскости по сравнению с особями, потреблявшими корма с аналогичными концентрациями соевой или рыбной муки. Кроме того, не было обнаружено значимого воздействия экспериментальных рационов на биохимические показатели крови перепелов и на лейкоцитарную формулу.

Куколки тутового шелкопряда *(Bombyx mori)* представляют собой побочный продукт производства шелка, который часто рассматривают как отходы. При этом они являются богатым источником белка и липидов. В исследовании [27] отмечается, что включение муки из куколки тутового шелкопряда отрицательно влияет на усвояемость питательных веществ у перепелов из-за наличия хитина и 1-дезоксиногиримицина. Авторы пришли к выводу, что существует необходимость в дальнейших исследованиях возможности добавления муки из куколки *Bombyx mori* в рацион перепелов после удаления вышеупомянутых веществ.

Таким образом, в большинстве исследований описывается положительное влияние включения насекомых в корма для перепелов в качестве источника белка. Они являются естественным источником пищи для птиц и способны увеличивать продуктивность и положительно влиять на здоровье перепелов. Кроме того, меняя состав кормового субстрата насекомых, можно частично менять состав самих насекомых и тем самым создавать обогащенные определенными веществами корма, которые затем будут накапливаться в мясе перепелов. Наиболее перспективным кандидатом на данный момент является черная львинка. Она содержит около 40% белка и может быть выращена на низкопитательных отходах сельскохозяйственной и пищевой промышленности.

5. Водоросли

Благодаря высокому содержанию питательных веществ и потенциально положительному влиянию на здоровье, водоросли рассматриваются как возможный ингредиент в рационах перепелов (Таблица 3).

Таблица 3. **Использование водорослей как альтернативного источника белка в кормах для перепелов**
Table 3. **The use of algae as an alternative protein source in feeds for quails**

Источник белка	Форма	Преимущества	Возможные недостатки	Источник
Микроводоросли				
Спирулина (*Spirulina platensis* и *Arthrospira platensis)*	Порошок	Содержит большое количество белка и незаменимых аминокислот. Противовоспалительные и иммуномодулирующие свойства. Может снижать концентрацию холестерина в яичном желтке перепелов. Природный источник каротиноидов, поэтому может улучшить цвет мяса и желтка	Может накапливать тяжелые металлы. Способна вызывать аллергию. Может содержать патогенные микроорганизмы	[5,24]
Хлорелла (*Chlorella vulgaris*)	Порошок	Содержит большое количество белка и незаменимых аминокислот. Иммуномодулирующие свойства	Может накапливать тяжелые металлы. Способна вызывать аллергию. Может содержать патогенные микроорганизмы. Имеет высокую стоимость	[24]
Schizochytrium sp.	Порошок	Обогащение яиц омега-3 жирными кислотами. Может улучшать цвет желтка	Nd	[40]
Макроводоросли				
Sargassam cristafolium	Порошок	Может повышать яйценоскость	Nd	[41]
Gracilaria pulvinata	Порошок	Может снижать концентрацию холестерина в яичном желтке перепелов	Nd	[41]
Sargassum sp.	Мука	Антиоксидантная активность. Может способствовать снижению содержания холестерина в перепелиных яйцах и улучшению цвета желтка	Nd	[42]

Например, спирулина имеет большое содержание аминокислот, считается самым богатым в мире природным источником витамина B12 и содержит растительные пигменты, такие как каротин и ксантофилл, обладающие антиоксидантными свойствами [43]. В исследовании [44] оценивалось влияние различных уровней включения порошка из спирулины *(Arthrospira platensis)* вместо соевого шрота на продуктивность и качество мяса перепелов. В результате работы выявлен оптимальный уровень включения спирулины, 4%, продемонстрировавший наилучший рост массы тела и коэффициент конверсии корма. Отмечено, что спирулина может значительно улучшить цвет мяса благодаря содержанию бета-каротина и зеаксантина. В другой работе [45] также была отмечена эффективность добавления 4% порошка из спирулины *(Spirulina platensis)* в рацион перепелов. Птицы, в корм которым добавили 4% порошка из *Spirulina platensis,* продемонстрировали наибольший коэффициент яйценоскости по сравнению с другими исследуемыми группами. Кроме того, данная группа перепелов имела наилучший коэффициент конверсии корма, от 2,8 до 3,3, в зависимости от стадии выращивания.

Другие результаты показаны в работе [43], в которой также оценивалось влияние порошка из спирулины *(Spirulina platensis)* на показатели роста и на качество яиц самок японских перепелов. По результатам исследования, добавление порошка из спирулины не оказало существенного воздействия на коэффициент конверсии корма, на потребление корма, на количество яиц, на вес яйца и на яйценоскость перепелов. Несмотря на это, наблюдались значительные различия по показателям массы тела, веса яичной скорлупы и холестерина в яичном желтке. Наибольшая масса тела к концу эксперимента оказалась у перепелов, получавших в составе рациона 0,5% порошка из спирулины, по сравнению с другими группами. Увеличение количества порошка из спирулины в рационе перепелов снизило концентрацию холестерина в яичном желтке и увеличило вес скорлупы яиц. Аналогично, в исследовании [46] включение порошка из спирулины (*Spirulina platensis)* в рацион перепелов не оказало существенного влияния на такие показатели, как конверсия корма, потребление корма, яйценоскость, масса яйца. Кроме того, рационы существенно не воздействовали на коэффициент переваримости сухого вещества и на массу яиц. Тем не менее включение 0,9% порошка из спирулины увеличило массу яичной скорлупы и снизило общее количество липидов в желтке, что повысило качество яиц.

В работе [5] увеличение включения порошка из спирулины (*Spirulina platensis)* в корм перепелам до 15%, с одной стороны, привело к уменьшению доли насыщенных жирных кислот и к увеличению доли мононенасыщенных в яйцах, что благоприятно может сказаться на здоровье людей. Однако снизилась доля омега-3 жирных кислот, таких как α-линоленовая кислота и докозагексаеновая, что, с другой стороны, снизило качество яиц перепелов, употреблявших спирулину. Увеличение включения порошка из спирулины (*Spirulina platensis)* до 15% привело к значимому увеличению интенсивности цвета желтка.

В качестве альтернативного источника белка хлорелла, как и спирулина, богата незаменимыми аминокислотами и каротиноидами. Несмотря на это, в литературе присутствуют сведения о том, что хлорелла является слишком дорогим ингредиентом для использования в качестве белковой составляющей в рационах животных, но при этом она может благоприятно воздействовать на их продуктивность [47]. Исследование, направленное на изучение влияния добавления сушеной хлореллы *(Chlorella vulgaris)* в рацион перепелов, выявило значимое увеличение массы тела птиц в возрасте 1–6 недель при включении 0,5% водорослей [48]. Несмотря на это, при включении 1–4% хлореллы масса тела перепелов оказалась ниже, чем у контрольной группы и группы, получавшей водоросль в количестве 0,5%. В работе Л. Н. Медведевой с соавторами также изучались перспективы включения данного вида водорослей в рацион перепелов породы московский белый гигант [49]. В результате проведенного исследования было выявлено, что добавление 500 мл хлореллы на 10 л воды увеличило выход инкубационных яиц, выход перепелят и дальнейшую их сохранность по сравнению с контрольной группой. В исследовании [50] оценивалось влияние добавления 0,5–4% хлореллы *(Chlorella vulgaris)* на качество яиц самок японских перепелов. Авторы не выявили существенных различий по показателям индекса формы яйца, плотности яйца, толщины скорлупы и цвета желтка между контрольной и экспериментальной группами.

Среди других водорослей, рассматриваемых в качестве возможного ингредиента в рационах перепелов, изучались микроводоросли *Schizochytrium* sp. и макроводоросли *Sargassam cristafolium, Gracilaria pulvinata, Sargassum* sp.

Авторы исследования, направленного на оценку воздействия различных уровней включения порошка из микроводорослей *Schizochytrium* sp. на продуктивность и качество яиц японских перепелов-несушек, не выявили существенного влияния на данные показатели [40]. Несмотря на это, добавление порошка из *Schizochytrium* sp. в рацион перепелов способствовало обогащению яиц омега-3 жирными кислотами. Кроме того, с увеличением включения порошка из водорослей до 40 г/кг снижалось отношение омега-6/омега-3 жирных кислот, что способно снизить риски возникновения рака, а также сердечно-сосудистых, воспалительных и аутоиммунных заболеваний [51].

В работе [41] изучались возможности использования сухого порошка из водорослей *S. cristafolium* и *G. pulvinata* в качестве добавки в рацион перепелов-несушек. Перепела, получавшие рацион с добавлением порошка из *S. cristafolium* (10 г/кг), имели более высокую еженедельную яйценоскость по сравнению с другими птицами. Кроме того, добавление 20 г/кг порошка из *S. cristafolium* увеличивало массу желтка. Включение в рацион перепелов *G. pulvinata* снизило концентрацию холестерина в яичном желтке и увеличило альбумин яичного белка.

В работе [42] отмечено, что добавление до 7,5% порошка из макроводорослей *Sargassum sp.* в рацион перепелов не оказало существенного влияния на их массу тела и убойный вес, которые остались

в пределах нормы для данного вида. Авторы пришли к выводу, что включение макроводорослей в рационы птиц может привести к снижению зависимости птицеводства от соевого шрота.

Описанные выше результаты показывают, что влияние водорослей на массу перепелов может быть различным, однако большинство исследователей отмечают положительное влияние на яйценоскость и на жирнокислотный состав желтков. Для оценки возможности использования водорослей в кормах для перепелов требуется проведение большего количества исследований, включающих определение их влияния на здоровье птиц и на качество мяса, а также расчет экономической эффективности использования такой добавки.

6. Грибы

Исследований, направленных на изучение использования грибов как альтернативного источника белка в рационах перепелов, значительно меньше, чем аналогичных работ, посвященных применению других источников белка. Известно, что грибы способствуют укреплению здоровья благодаря своим антиоксидантным, антибактериальным, иммуностимулирующим свойствам (Таблица 4).

В исследовании [52] выявлено, что при включении порошка из гриба шампиньон двуспоровый *(Agaricus bisporus)* на уровнях от 0,5% до 2% возрастал вес перепелов и потребление корма, также наблюдалось значимое улучшение коэффициента конверсии корма при включении 2% порошка по сравнению с другими группами.

В исследовании [53] включение порошка из гриба вешенка обыкновенная *(Pleurotus ostreatus)* в рацион перепелов не привело к существенному влиянию на прирост живой массы тела, на потребление корма, на коэффициент конверсии корма, на живую массу при убое и на вес туши. Несмотря на это, включение в рацион 10 и 20 г/кг порошка из *Pleurotus ostreatus* замедляло окисление липидов и улучшало pH, водоудерживающую способность, текстуру и сокращало потерю веса после приготовления мяса, что улучшило его качество. В работе [55] добавление порошка из *Pleurotus ostreatus* в рацион перепелов также не повлияло на прирост в весе, на потребление корма и на коэффициент конверсии корма. Однако положительно сказалось на биохимических показателях крови птиц: с увеличением количества *Pleurotus ostreatus* уменьшились триглицериды, общий холестерин, липопротеины низкой плотности.

В работе [54] изучалось влияние добавления различных количеств порошка из гриба трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum)* на продуктивность и физиологические показатели японских перепелов. В результате исследования было выявлено, что коэффициент конверсии корма экспериментальных групп перепелов, в рацион которых входили 1 и 1,5 г/кг порошка из *Ganoderma lucidum,* оказался значительно лучше, чем у контрольной группы. Кроме того, при включении 1 г/кг порошка наблюдалась наибольшая яйценоскость и масса яиц по сравнению со всеми другими группами.

Таким образом, хотя на данный момент не так много работ, посвященных исследованию включения грибов в корма для перепелов, согласно описанным выше данным, грибы являются перспективным альтернативным источником белка для этой цели. Добавление порошка из грибов может способствовать возрастанию продуктивности перепелов и уменьшению коэффициента конверсии корма, а также улучшению качества мяса. Однако для принятия решения о безопасности использования конкретного вида гриба в дальнейшем требуется проведение большего количества исследований, в том числе посвященных влиянию таких добавок на здоровье птиц и на состав получаемой продукции.

7. Выводы

В работе рассмотрены возможности использования растений, насекомых, водорослей и грибов как альтернативных источников белка в рационах перепелов. Традиционными растительными ингредиентами в кормах для птицеводческой отрасли являются соя и кукуруза. Тем не менее ряд исследований демонстрирует, что рецептуры кормов для перепелов можно улучшить благодаря более экологичным и экономичным источникам растительного белка. Ввиду возможности использования побочных продуктов перспективным растительным источником белка являются сушеные листья маниоки, 10%-ное добавление которых улучшило конверсию корма. Среди насекомых черная львинка *(Hermetia illucens)* является одним из самых многообещающих видов насекомых и может быть использована в качестве альтернативного источника белка в кормах для перепелов до 15% уровня включения. Включение муки из сверчка (*Gryllus bimaculatus)* на уровне от 2 до 8% способно увеличить яйценоскость и качественные показатели яиц. Среди водорослей следует выделить спирулину *(Spirulina platensis* и *Arthrospira platensis)*, при добавлении 4% порошка из которой у перепелов улучшились показатели продуктивности. Исследования возможности добавления грибов в рацион перепелов в настоящее время остаются ограниченными. Однако добавление порошка из грибов шампиньон двуспоровый *(Agaricus bisporus)* и вешенка обыкновенная *(Pleurotus ostreatus)* в рацион перепелов продемонстрировало положительные результаты по показателям продуктивности. Перспективным направлением в птицеводстве является совместное использование нескольких ингредиентов, например, насекомых и растений, в качестве альтернативных источников белка в кормах. Дальнейшие исследования использования альтернативных источников белка в рационах перепелов рекомендуется сосредоточить на более детальном изучении безопасности данных источников, а также на экономической целесообразности их включения в корма.

Таблица 4. **Использование грибов как альтернативного источника белка в кормах для перепелов**

Table 4. **The use of mushrooms as an alternative protein source in feeds for quails**

Источник белка	Форма	Преимущества	Возможные недостатки	Источник
Шампиньон двуспоровый *(Agaricus bisporus)*	Порошок из плодового тела	Иммуномодулирующие свойства	Nd	[52]
Вешенка обыкновенная (*Pleurotus ostreatus*)	Порошок из плодового тела	Антиоксидантные, иммуномодулирующие, антимутагенные, противовоспалительные, антилипидемические, антибактериальные свойства	Nd	[53]
Трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum)*	Порошок из плодового тела	Способен улучшить состояние сердечно-сосудистой системы	Nd	[54]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Marangoni, F., Corsello, G., Cricelli, C., Ferrara, N., Ghiselli, A., Lucchin, L. et al. (2015). Role of poultry meat in a balanced diet aimed at maintaining health and wellbeing: An Italian consensus document. *Food and Nutrition Research*, 59(1), Article 27606. https://doi.org/10.3402/fnr.v59.27606
2. OECD Agriculture Statistics. Retrieved from https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/data/oecd-agriculture-statistics_agr-data-en Accessed March 1, 2024
3. Cheng, K. M., Bennett, D. C., Mills, A. D. (2010). The Japanese quail. Chapter in a book: The UFAW handbook on the care and management of laboratory and other research animals. Wiley-Blackwell, 2010. https://doi.org/10.1002/9781444318777.ch42
4. Elahi, U., Xu, C., Wang, J., Lin, J., Wu, S., Zhang, H. et al. (2022). Insect meal as a feed ingredient for poultry. *Animal Bioscience*, 35(2), 332–346. https://doi.org/10.5713/ab.21.0435
5. Boiago, M. M., Dilkin, J. D., Kolm, M. A., Barreta, M., Souza, C. F., Baldissera, M. D. et al. (2019). Spirulina platensis in Japanese quail feeding alters fatty acid profiles and improves egg quality: Benefits to consumers. *Journal of Food Biochemistry*, 43(7), Article e12860. https://doi.org/10.1111/jfbc.12860
6. Thrane, M., Paulsen, P. V., Orcutt, M. W., Krieger, T. M. (2017). Soy Protein: Impacts, Production, and Applications. Sustainable Protein Sources. Academic Press, 2017. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802778-3.00002-0
7. Obregón, J. F., Bell, C., Elenes, I., Estrada, A., Portillo, J. J., Ríos, F. G. (2012). Effect of discarded chickpea (*Cicer arietinum* L.) cooking on the productive response and carcass yield of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) at the fattening stage. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 46(2), 169–173.
8. Grasso, N., Lynch, N. L., Arendt, E. K., O'Mahony, J. A. (2022). Chickpea protein ingredients: A review of composition, functionality, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 435–452. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12878
9. Variath, M. T., Janila, P. (2017). Economic and academic importance of peanut. Chapter in a book: The Peanut Genome. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63935-2_2
10. Bittencourt, T. M., D'Ávila Lima, H. J., Valentim, J. K., Martins, A. C. D. S., Moraleco, D. D., Vaccaro, B. C. (2019). Distillers dried grains with solubles from corn in diet of japanese quails. *Acta Scientiarum. Animal Sciences,* 41(1), Article 42759. https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.42759

11. Freitas, E. R., Raquel, D. L., Nascimento, A. J. N., Watanabe, P. H., Lopes, I. R. V. (2014). Complete replacement of corn by white or red sorghum in japanese quail feeds. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 16(3), 333–336. https://doi.org/10.1590/1516-635x1603333-336
12. Rahman, M. M., Suniza Anis, B. M. S., Jennlelyn, A. J. (2019). Growth performance and carcass characteristics of Japanese quail fed rations with inclusion of different levels of broken rice. *Malaysian Journal of Animal Science*, 22(2), 27–33.
13. Moraes, P. D. O., Gopinger, E., Catalan, A. A., Castro, M. L. S. de, Elias, M. C., Xavier, E. G. (2015). Effect of feeding canola meal to laying Japanese quails. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 37(3), 295–299. https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v37i3.26437
14. Silva Júnior, P. A., Lana, S. R. V., Lana, G. R. Q., Silva, L. C. L., Torres, E. C., Ferreira, T. S. (2017). Cassava foliage in quail feeding. *Acta Veterinária Brasilica*, 11(3), 150–156. https://doi.org/10.21708/avb.2017.11.0.6921
15. Diarra, S. S., Devi, A. (2015). Feeding value of some cassava by-products meal for poultry: A review. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(10), 735–741. https://doi.org/10.3923/pjn.2015.735.741
16. Kumar, M., Tomar, M., Punia, S., Grasso, S., Arrutia, F., Choudhary, J. et al. (2021). Cottonseed: A sustainable contributor to global protein requirements. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 100–113. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.058
17. Kamel, E. R., Mohammed, L. S., Abdelfattah, F. A. (2020). Effect of a diet containing date pits on growth performance, diet digestibility, and economic evaluation of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Tropical Animal Health and Production*, 52(1), 339–346. https://doi.org/10.1007/s11250-019-02021-x
18. Dahouda, M., Adjolohoun, S., Montchowui, E. H., Senou, M., Hounsou, N. M. D., Amoussa, S. et al. (2013). Growth performance of quails (*Coturnix coturnix*) fed on diets containing either animal or vegetable protein sources. *International Journal of Poultry Science*, 12(7), 396–400. https://doi.org/10.3923/ijps.2013.396.400
19. Chah, C. C., Nelson, R. A., Carlson, C. W., Semeniuk, G., Palmer, I. S., Hesseltine, C. W. (1976). Fungus-fermented soybeans benefit the life cycle of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Poultry Science*, 55(3), 975–981. https://doi.org/10.3382/ps.0550975
20. Odunsi, A. A., Rotimi, A. A., Amao, E. A. (2007). Effect of different vegetable protein sources on growth and laying performance of Japanese quails (Coturnix coturnix japonica) in a derived savannah zone of Nigeria. *World Applied Sciences Journal*, 3(5), 567–571.
21. Kaur, R., Prasad, K. (2021). Nutritional characteristics and value-added products of Chickpea (*Cicer arietinum*) — A review. *Journal of Postharvest Technology,* 9(2), 1–13.
22. Şengül A. Y., Çalışlar S. (2020). Effect of partial replacement of soybean and corn with dietary chickpea (raw, autoclaved, or microwaved) on production performance of laying quails and egg quality. *Food Science of Animal Resources*, 40(3), 323–337. https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e98
23. Berto, D. A., Garcia, E. A., Móri, C., Faitarone, A. B. G., Pelícia, K., Molino, A. B. (2007). Performance of Japanese quails fed feeds containing different corn and limestone particle sizes. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 9(3), 167–171. https://doi.org/10.1590/S1516-635X2007000300005
24. Hadi, J., Brightwell, G. (2021). Safety of alternative proteins: Technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods*, 10(6), Article 1226. https://doi.org/10.3390/foods10061226
25. Widjastuti, T., Wiradimadja, R., Rusmana, D. (2014). The effect of substitution of fish meal by Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) maggot meal in the diet on production performance of quail (Coturnix coturnix japonica). *Scientific Papers. Series D. Animal Science*, 57(2), 125–129.
26. Sarica, S., Kanoglu, B., Yildirim, U. (2020). Defatted yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) meal as possible alternative to fish meal in quail diets. *South African Journal of Animal Science*, 50(3), 481–491. https://doi.org/10.4314/sajas.v50i3.15
27. Dalle Zotte, A., Singh, Y., Squartini, A., Stevanato, P., Cappellozza, S., Kovitvadhi, A. et al. (2021). Effect of a dietary inclusion of full-fat or defatted silkworm pupa meal on the nutrient digestibility and faecal microbiome of fattening quails. *Animal*, 15(2), Article 100112. https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100112
28. Permatahati, D., Mutia, R., Astuti, D. A. (2019). Effect of cricket meal (*Gryllus bimaculatus*) on production and physical quality of Japanese quail egg. *Tropical Animal Science Journal*, 42(1), 53–58. https://doi.org/10.5398/tasj.2019.42.1.53
29. Hatab, M. H., Ibrahim, N. S., Sayed, W. A., Sabic, E. M. (2020). Potential value of using insect meal as an alternative protein source for Japanese quail diet. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 22(1), 1–9. https://doi.org/10.1590/1806-9061-2017-0700
30. Das, M., Mandal, S. K. (2014). Oxya hyla hyla (Orthoptera: Acrididae) as an alternative protein source for Japanese quail. *International Scholarly Research Notices*, 3–4, Article 269810. https://doi.org/10.1155/2014/269810
31. de Freitas Soares, P. D., de Jesus, C. A., Ferreira, F., de Oliveira, L. B., Ecco, R., de Oliveira Paes Leme, F. et al. (2022). Hematological and histopathological evaluation of meat-type quails fed Madagascar cockroach meal. *Tropical Animal Health and Production*, 54(2), Article 128. https://doi.org/10.1007/s11250-022-03118-6
32. Scala, A., Cammack, J. A., Salvia, R., Scieuzo, C., Franco, A., Bufo, S. A. et al. (2020). Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.)(Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale. *Scientific Reports*, 10(1), Article 19448. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8
33. Pasotto, D., van Emmenes, L., Cullere, M., Giaccone, V., Pieterse, E., Hoffman, L. C. et al. (2020). Inclusion of *Hermetia illucens* larvae reared on fish offal to the diet of broiler quails: Effect on immunity and caecal microbial populations. *Czech Journal of Animal Science*, 65(6), 213–223. https://doi.org/10.17221/60/2020-CJAS
34. Dalle Zotte, A., Singh, Y., Michiels, J., Cullere, M. (2019). Black soldier fly (*Hermetia illucens*) as dietary source for laying quails: Live performance, and egg physico-chemical quality, sensory profile and storage stability. *Animals*, 9(3), Article 115. https://doi.org/10.3390/ani9030115
35. Cullere, M., Tasoniero, G., Giaccone, V., Miotti-Scapin, R., Claeys, E., De Smet, S. et al. (2016). Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: Apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. *Animal*, 10(12), 1923–1930. https://doi.org/10.1017/S1751731116001270
36. Cullere, M., Tasoniero. G., Giaccone. V., Acuti, G., Marangon, A., Dalle Zotte, A. (2018). Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: Meat proximate composition, fatty acid and amino acid profile, oxidative status and sensory traits. *Animal*, 12(3), 640–647. https://doi.org/10.1017/S1751731117001860
37. Cullere, M., Woods, M. J., van Emmenes, L., Pieterse, E., Hoffman, L. C, Dalle Zotte, A. (2019). Hermetia illucens larvae reared on different substrates in broiler quail diets: Effect on physicochemical and sensory quality of the quail meat. *Animals*, 9(8), Article 525. https://doi.org/10.3390/ani9080525
38. Zadeh, Z. S., Kheiri, F., Faghani, M. (2019). Use of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) as a protein source on growth performance, carcass traits, meat quality and intestinal morphology of Japanese quails (*Coturnix japonica*). *Veterinary and Animal Science*, 8, Article 100066. https://doi.org/10.1016/j.vas.2019.100066
39. Ait-Kaki, A., Hornick, J.-L., El Otmani, S., Chebli, Y., Moula, N. (2021). Effect of dried mealworms (*Tenebrio molitor*), larvae and olive leaves (*Olea europaea* L.) on growth performance, carcass yield and some blood parameters of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Animals*, 11(6), Article 1631. https://doi.org/10.3390/ani11061631
40. Santana, L. da C., Mendonça, M. de O., Silva, V. R. O., Castro, M. das D. A., Costa, P. K. F., Moura, G. de S. et al. (2021). Performance and egg quality of Japanese quail fed diets containing microalgae Schizochytrium sp. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 50, Article e20200161. https://doi.org/10.37496/rbz5020200161
41. Habibi, H., Ghahtan, N., Kohanmoo, M. A. (2019). Evaluation of dietary medicinal plants and algae in laying Japanese quails. *Journal of World's Poultry Research*, 9(2), 82–88. https://doi.org/10.36380/jwpr.2019.10
42. Oliveira, A. G. de, Furtado, D. A., Ribeiro, N. L., Marques, J. I., Leite, P. G., Mascarenhas, N. M. H. et al. (2023). Marine macroalgae as an alternative in the feeding of broiler quails in an environment of thermal stress. *Food Science and Technology,* 43, Article e116122. https://doi.org/10.5327/fst.116122
43. Dogan, S. C., Baylan, M., Erdogan, Z., Akpinar, G. C., Kucukgul, A., Duzguner, V. (2016). Performance, egg quality and serum parameters of Japanese quails fed diet supplemented with Spirulina platensis. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25(12a), 5857–5862.
44. Cheong, D. S. W., Kasim, A., Sazili, A. Q., Hishamuddin, O. M. A. R., Teoh, J. Y. (2016). Effect of supplementing Spirulina on live performance, carcass composition and meat quality of Japanese quail. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 13(2), 77–84. https://doi.org/10.14456/WJST.2016.8
45. Abbass, M. S., Bandr, L. K., Alkhilani, F. M. H. (2022). Effect of adding different levels of spirulina algae (*Spirulina platensis*) to the diet of Japanese quail on the productive performance. *Research Journal of Science*, 3(1), 41–50.
46. Oliveira, M. C. de, Oliveira, M. A. D., Gonçalves, N. R., Ferreira, P. do C., Lima, D. S., Arantes, U. M. (2024). Spirulina in diets of Japanese quail: Productive performance, digestibility, and egg quality. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 46, Article e63040. https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v46i1.63040
47. Świątkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., Józefiak, D. (2015). Application of microalgae biomass in poultry nutrition. *World's Poultry Science Journal*, 71(4), 663–672. https://doi.org/10.1017/S0043933915002457
48. Amritha, N., Revathi, K., Babu, M. (February 11–13, 2016). Effect of green algae (*Chlorella vulgaris*) on the production performance of Japanese quails (*Coturnix coturnix japonica)*. Proceedings of XV AZRA International Conference on "Recent Advances in Life Sciences". Applied Zoologists Research Association (AZRA), Bhubaneswar, India 2016.
49. Медведева, Л. Н., Зорькина, О. В., Московец, М. В. (2022). Разведение перепелов в личных подсобных хозяйствах с включением в рацион питания *Chlorella Vulgaris*. Вестник *Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 17(4), 499–513. [Medvedeva, L. N., Zorkina, O. V., Moskovets, M. V. (2022). Use of *Chlorella vulgaris* as a dietary supplement for quails bred at private farms. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 17(4), 499–513. (In Russian)] https://doi.org/10.22363/2312-797X-2022-17-4-499-513
50. Anjalai, K., Revathi, K., Vidhya, G. (2020). Effect of dietary supplementation of *Chlorella vulgaris* (green microalgae) on egg quality characteristics of Japanese quail. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 24(1), 51–55.
51. Simopoulos, A. P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 56(8), 365–379. https://doi.org/10.1016/S0753-3322(02)00253-6
52. Asadi-Dizaji, A., Shahryar, H.A., Shaddel-Tili, A., Maheri-Sis, N., Ghiasi-Ghalehkandi, J. (2014). Effect of common mushroom (*Agaricus bisporus*) levels on growth performance and carcass yields of Japanese quails (*Coturnix coturnix Japonica*). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3(7), 1–5.
53. Vargas-Sánchez, R. D., Torrescano-Urrutia, G. R., Ibarra-Arias, F. J., Portillo-Loera, J. J., Ríos-Rincón, F. G., Sánchez-Escalante, A. (2018). Effect of dietary supplementation with *Pleurotus ostreatus* on growth performance and meat quality of Japanese quail. *Livestock Science*, 207, 117–125. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.11.015
54. Al-Tikriti, S. S., Al-douri, A. H. I. (2019). The effect of the adding Ganoderma lucidum fungus powder in the production performance for the brown Japanese Quail bird. *Indian Journal of Public Health Research and Development*, 10(7), 695–679. https://doi.org/10.5958/0976-5506.2019.01652.8
55. Asadi-Dizaji, A., Shahryar, H. A., Maheri-Sis, N. (2017). Effect of levels of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on performance and blood biochemical characteristics in Japanese quails (*Coturnix coturnix*). *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 7(4), 687–691.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Полубесова Мария Андреевна — специалист по маркетингу, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7 (812) 273–75–24 E-mail: m.polubesova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8253-6225 * автор для контактов	**Mariia A. Polubesova,** Marketer, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–273–75–24 E-mail: m.polubesova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8253-6225 * corresponding author
Мечтаева Елизавета Владимировна — младший научный сотрудник, лаборатория промышленных биотехнологических инноваций, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7 (812) 273–75–24 E-mail: e.mechtaeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7879-7994	**Elizaveta V. Mechtaeva,** Junior Researcher, Laboratory of Industrial Biotechnological Innovations, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–273–75–24 E-mail: e.mechtaeva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7879-7994
Чернов Александр Дмитриевич — заместитель руководителя Северо-Западной испытательной лаборатории, Федеральный центр охраны здоровья животных 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 15 Тел.: +7 (812) 630–20–69 E-mail: 4ern@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2920-7059	**Aleksandr D. Chernov,** Deputy Director of Federal Centre for Animal Health 15, Moskovskoe shosse, 196158, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–630–20–69 E-mail: 4ern@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2920-7059
Ситнов Вениамин Юрьевич — директор, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7 (812) 273–75–24 E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997	**Veniamin Yu. Sitnov,** Director, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7–812–273–75–24 E-mail: v.sitnov@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1927-1997
Журавлева Айгуль Зарифовна — кандидат ветеринарных наук, заместитель директора по качеству, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых добавок 190000, Санкт-Петербург, Литейный пр., 55 Тел.: +7 (812) 273–75–24 E-mail: a.zhuravleva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2683-269X	**Aigul Z. Zhuravleva,** Candidate of Veterinary Sciences, Deputy Director, All-Russia Research Institute for Food Additives 55, Liteiny pr., 190000, St. Petersburg, Russia Tel.: +7 (812) 273–75–24 E-mail: a.zhuravleva@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0003-2683-269X

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.

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

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-345-354

Поступила 30.01.2024
Поступила после рецензирования 29.07.2024
Принята в печать 02.08.2024
© Черных В. Я., Алексеенко Е. В., Сметанин Д. О., Балуян Х. А., Печникова Ю. Ю., 2024

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МЯКИША ПШЕНИЧНОГО ХЛЕБА

Черных В. Я.[1] *, Алексеенко Е. В.[2], Сметанин Д. О.[1,2], Балуян Х. А.[1], Печникова Ю. Ю.[1,2]

[1] Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности, Москва, Россия

[2] Российский биотехнологический университет, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
пшеничная мука, автолитическая активность, солод пшеничный, сухая клейковина, пшеничный хлеб, индекс твердости, скорость черствения

АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена исследованию структурно-механических свойств мякиша пшеничного хлеба через 12 часов после выпечки и далее через каждые 24 часа в течение 108 часов хранения. В основе данного исследования лежит изучение процесса ретроградации крахмала, который представляет собой переход аморфной структуры зерен крахмала в кристаллическое состояние, что предопределяет повышение значений показателей твердости и индекса твердости мякиша. Целью работы является исследование влияния состояния углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплекса пшеничной муки посредством внесения солода пшеничного и сухой клейковины на структурно-механические свойства мякиша хлебобулочных изделий и на скорость их черствения при хранении. В данной работе используются мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта, солод пшеничный, клейковина сухая, хлеб из муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, изготовленный безопарным способом посредством проведения пробной лабораторной выпечки. В статье установлено влияние дозировки пшеничного солода и сухой пшеничной клейковины на изменение водопоглощения пшеничного теста в процессе замеса, на его реологические свойства, на структурно-механические характеристики мякиша пшеничного хлеба, изготовленного при проведении пробной лабораторной выпечки, а также на скорость его черствения при хранении. Оптимальная дозировка пшеничного солода составила 5%, что обеспечило число падения, равное 235 с. Дозировка сухой клейковины 3% обеспечила общее содержание клейковины в тесте 31,3%, влажность теста 43,1% и консистенцию теста, равную 640 е.Ф. Совместное внесение пшеничного солода и сухой пшеничной клейковины обеспечили уменьшение индекса твердости мякиша пшеничного хлеба на 55% и скорости его черствения в 3,3 раза.

Received 30.01.2024
Accepted in revised 29.07.2024
Accepted for publication 02.08.2024
© Chernykh V. Ya., Alekseenko E. V., Smetanin D. O., Baluyan Kh. A., Pechnikova Yu. Yu., 2024

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

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANAGING THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WHEAT BREAD CRUMB

Valery Ya. Chernykh[1] *, Elena V. Alekseenko[2], Dmitry O. Smetanin[1,2], Khachatur A. Baluyan[1], Yulia Yu. Pechnikova[1,2]

[1] Scientific Research Institute for the Baking Industry, Moscow, Russia

[2] Russian Biotechnological University, Moscow, Russia

KEY WORDS:
wheat flour, autolytic activity, wheat malt, dry gluten, wheat bread, hardness index, staling rate

ABSTRACT

This work is dedicated to the study of the structural-mechanical properties of wheat bread crumb 12 hours after baking and then every 24 hours during 108 hours of storage. The basis of this investigation was the study of the starch retrogradation process, which is a transfer of the amorphous structure of starch grains into the crystalline state, which predetermines an increase in the values of the hardness parameters and hardness index. The aim of the work was investigation of an effect of the state of carbohydrate-amylase and protein-proteinase complex of wheat flour by introduction of wheat malt and dry gluten on the structural-mechanical properties of crumb of bakery products and their staling rate during storage. In this study, the authors used baker's wheat flour of the highest grade, wheat malt, dry gluten, bread from baker's wheat flour of the highest grade that was made using the straight dough method by the experimental laboratory baking. The authors established an effect of dosing wheat malt and dry wheat gluten on changes in the water absorption of wheat dough in the process of mixing, on its rheological properties, on the structural-mechanical properties of crumb of wheat bread made by the experimental laboratory baking as well as on the rate of its staling during storage. The optimal dosage of wheat malt was 5%, which ensured the falling number equal to 235 s. The dose of dry gluten of 3% ensured the total gluten content in dough of 31.3%, dough moisture of 43.1% and dough consistency equal to 640 FU. Simultaneous introduction of wheat malt and dry wheat gluten ensured a decrease in the hardness index of wheat bread crumb by 55% and the rate of its staling by 3.3 times.

1. Введение

При изготовлении хлебобулочных изделий из пшеничной муки особое внимание уделяется сохранению свежести готовых изделий при хранении. Хранение хлеба сопровождается двумя основными процессами, усыханием и черствением [1,2,3], при которых меняются реологические свойства хлеба: упругость, пластичность, сжимаемость, прочность и др. [4,5]. При хранении хлеба в обычных температурных условиях (15–25 °С) через 8–10 часов появляются признаки черствения, усиливающиеся при дальнейшем хранении. Мякиш при этом теряет эластичность, становится жестким и крошащимся, ухудшается вкус и снижается аромат хлеба, свойственные свежему изделию [6]. Хрупкая после выпечки корка превращается в мягкую

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Черных, В. Я., Алексеенко, Е. В., Сметанин, Д. О., Балуян, Х. А., Печникова, Ю. Ю.** (2024). Технологические аспекты управления структурно-механическими свойствами мякиша пшеничного хлеба. *Пищевые системы*, 7(3), 345–354. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-345-354

FOR CITATION: **Chernykh, V. Ya., Alekseenko, E. V., Smetanin, D. O., Baluyan, Kh. A., Pechnikova, Yu. Yu. (2024).** Technological aspects of managing the structural and mechanical properties of wheat bread crumb. *Food Systems*, 7(3), 345–354. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-345-354

и эластичную [7]. Потребительские свойства хлебобулочных изделий обусловлены определенными значениями структурно-механических свойств мякиша после выпечки и скоростью их изменения в процессе хранения изделий [8]. Увеличение показателей твердости мякиша при хранении хлебобулочных изделий связано с протеканием процесса ретроградации крахмальных зерен — переходом их аморфной структуры в кристаллическое состояние после выпечки [9,10,11]. Скорость данного процесса или скорость черствения хлебобулочных изделий при хранении предопределяется автолитической активностью муки и содержанием гелеобразующих клейковинных белков [12,13].

Автолитическая активность муки — это способность муки образовывать при прогреве водно-мучной суспензии определенное количество водорастворимых веществ [14,15]. В соответствии с существующими стандартами (ГОСТ 27495–87[1], ГОСТ 26574–2017[2]), автолитическая активность пшеничной муки оценивается по показателю числа падения — это условный показатель вязкости водно-мучной суспензии, отражающий глубину гидролиза крахмала собственными амилазами хлебопекарной муки [16–18]. Этот биотехнологический показатель, с одной стороны, влияет на сахарообразующую способность муки, определяя интенсивность жизнедеятельности дрожжевых клеток и молочнокислых бактерий при созревании теста и окончательной расстойке тестовых заготовок, а также окраску корки готового хлеба. С другой стороны, он влияет на глубину перехода кристаллической структуры крахмала в аморфное состояние при выпечке изделий [19–21]. Сахарообразующая способность муки обуславливается действием амилолитических ферментов муки на ее крахмал и зависит как от количества амилолитических ферментов, так и от размеров, от характера, от состояния частиц муки и от крахмальных зерен в этих частицах. Показателем сахарообразующей способности муки считают количество миллиграммов мальтозы, образующейся в водно-мучной суспензии из 10 г муки и 50 мл воды после одного часа ее настаивания при температуре 27 °С [22–24].

Содержание в муке белковых веществ, их состав, состояние и свойства определяют технологические свойства пшеничной муки. Отличительные особенности реологических свойств пшеничного теста, сочетающего упругость (эластичность) с пластичностью и вязкостью, обусловлены именно белками муки [25–27]. В состав пшеничной муки входят белки простые (протеины), состоящие только из аминокислотных остатков, и сложные (протеиды), состоящие из белков с включениями ионов металлов, пигментов, комплексов с липидами, нуклеиновыми кислотами, а также с ковалентносвязанными остатками фосфорной или нуклеиновой кислот, углеводов [28,29]. Массовая доля белков в пшеничной муке может колебаться в широких пределах (от 7 до 26%) в зависимости от сорта пшеницы и агроклиматических условий ее культивации, интенсивности химизации посадок. Белки пшеницы состоят из альбуминов (20–22%); глобулинов (4–6%); а также из проламинов и глютелинов (73–75%) [14]. Белок глютенин, относящийся к глютелинам, подразделяется на две фракции — глютенин I и глютенин II. Их массовая доля к общей массе глютелинов муки составляет от 6 до 28% и от 15 до 37% соответственно. Технологическая роль белков пшеничной муки связана с тем, что они формируют клейковину, т. е. своеобразный комплекс, который играет первостепенную роль в хлебопекарном производстве [30]. Количество и свойства клейковины, с одной стороны, влияют на газоудерживающую способность теста, что определяет структуру пористости мякиша после выпечки и его структурно-механические свойства. С другой стороны, количество клейковины влияет на содержание связанной влаги, что, в свою очередь, воздействует на процесс ретроградации крахмала. При бóльшем содержании связанной влаги клейковинными белками процесс перехода аморфной структуры крахмальных зерен в кристаллическое состояние замедляется [31].

Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплекса пшеничной муки посредством внесения солода пшеничного и сухой клейковины на структурно-механические свойства мякиша хлебобулочных изделий и на скорость их черствения при хранении.

2. Объекты и методы

В работе использованы пшеничная хлебопекарная мука высшего сорта (далее — пшеничная мука), пшеничный солод, сухая клейковина, а также хлеб из пшеничной муки высшего сорта, изготовленный безопарным способом с помощью пробной лабораторной выпечки. Контрольные пробы пшеничного теста для анализа изготавливались из пшеничной муки и воды, опытные пробы пшеничного теста — из пшеничной муки, воды, пшеничного солода и клейковины сухой, вносимой в различных дозировках. Пробу I готовили из пшеничной муки, воды, пшеничного солода (с дозировкой 5%); пробу II — из пшеничной муки, воды, клейковины сухой (с дозировкой 3%); пробу III — из пшеничной муки, воды, пшеничного солода (с дозировкой 5%) и клейковины сухой (с дозировкой 3%). Для определения оптимальной дозировки сухой клейковины были получены классические фаринограммы пшеничного теста. При замесе клейковину вносили в количестве от 0 до 7%, с шагом 1%. Контрольные пробы хлеба (без пшеничного солода и сухой клейковины) и опытные пробы хлеба (с пшеничным солодом и сухой клейковиной) изготавливались по нормативной рецептуре: мука пшеничная — 100 кг; дрожжи хлебопекарные прессованные — 2,5 кг; соль пищевая — 1,5 кг. Количество пшеничного солода определялось с учетом автолитической активности муки (5%), количество сухой клейковины — с учетом реологических свойств теста (3%), предопределяемых консистенцией теста (640 е.Ф.). При проведении пробной лабораторной выпечки пшеничного хлеба тесто готовили безопарным способом. Замес теста проводили в тестомесильной машине Diosna SP80D (Diosna Dierks and SÖHne Gmbh, Германия). Созревание теста, окончательную расстойку тестовых заготовок и выпечку хлеба осуществляли при помощи оборудования Miwe Condo (Diosna Dierks and SÖHne Gmbh, Германия). Продолжительность созревания теста составляла 150 минут, время окончательной расстойки тестовых заготовок — 60 минут. Хлеб выпекали при температуре 225 °С в течение 25 мин с пароувлажнением.

Физико-химические характеристики пшеничной муки, теста и мякиша хлеба определяли с помощью следующих приборов:

- «Волюмотест ВТ-1» (ООО «Лаборатория качества», Россия) — для выявления насыпной плотности муки (ρм, кг/м^3).
- «ИДК-3» (ООО «Плаун», Россия) — для определения общей деформации клейковины ($h_{общ}$, е.ИДК).
- «Амилотест АТ-97 (ЧП-ТА)» (ООО НПФ «РАДИУС», Россия) — для идентификации автолитической активности муки по числу падения (ЧП, с).
- Amilograph-E (Brabender GmbH and Co. KG, Германия) — для установления максимальной вязкости клейстеризованной суспензии (ηmax, е.AU.).
- Farinograph — E (Brabender GmbH and Co. KG, Германия) — для определения показателей реодинамики замеса теста: консистенции теста (А, е.Ф.); водопоглотительной способности (ВПС, %); времени образования теста (В, мин); стабильности теста (С, мин); разжижения теста (Е, е.Ф.); удельной энергии замеса ($E_{уд}$, кДж/кг).
- Glutork (Perten Instruments, Швеция) — для выявления влажности теста ($W_т$, %) и мякиша ($W_{мяк}$, %) хлеба.
- Шкаф сушильный АСЭШ-8–2 (ООО НПФ «Экан», Россия) — для определения влажности муки ($W_{м.ф.}$).
- BVM 6600 (Perten Instruments, Швеция) — для расчета объема ($V_{хл}$, см^3) и удельного объема ($V_{уд.хл}$, см^3/г) хлеба.
- «Структурометр СТ-2» (ООО «Лаборатория качества», Россия) — для определения следующих структурно-механических характеристик мякиша хлеба: твердости (Fh, гс); индекса твердости (Ih, гс/[(г/см^3) ×%]); модуля упругости межпоровых стенок (E^I, кПа); модуля упругости пористой структуры (E^{II}, кПа); общего количества удельной механической энергии ($A_{общ}$, Дж/г), затрачиваемого при сжатии мякиша; количества удельной механической энергии ($A_{упр}$, Дж/г), связанного с восстановлением структуры мякиша за счет упругой деформации; количества удельной механической энергии ($A_{пл}$, Дж/г), приводящего к изменению структуры мякиша за счет пластической деформации; скорости черствения ($V_ч$, гс/сутки) при хранении.

Пшеничная мука была получена от «Городищенского комбината хлебопродуктов», г. Волгоград. Мука имела высокое число падения, равное 566 секундам, и обладала низкой амилолитической активностью и низкой сахарообразующей способностью. Число падения было определено стандартным методом (ГОСТ ISO 3093–2016[3]). Количество и качество клейковины были выявлены в соответствии с российским стандартом (ГОСТ 27839–2013[4]). Количество клейковины рассчитывали следующим образом: тесто замешивали

[1] ГОСТ 27495–87. «Мука. Метод определения автолитической активности». М.: Стандартинформ, 2007. — 5 с.

[2] ГОСТ 26574–2017. «Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2018. — 16 с.

[3] ГОСТ 3093–2016. «Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга-Пертена». М.: Стандартинформ, 2016. — 12 с.

[4] ГОСТ 27839–2013. «Мука пшеничная. Методы определения количества и качества клейковины». М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.

Таблица 1. **Показатели технологических свойств муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта**

Table 1. **Indicators of technological properties of baker's wheat flour of the highest grade**

ФХХ муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта				
$W_{м.ф.}$, %	**$\rho_м$, кг/м^3**	**$G_{кл}$,%**	**h $_{общ}$, е.ИДК**	**ЧП, с**
13,17 ± 0,11	446,83 ± 1,38	28,31 ± 0,29	73,03 ± 3,45	566 ± 34,45
ВПС, %	**В, мин**	**С, мин**	**Е, е.Ф.**	**η_{max}, е.AU.**
55,87 ± 0,25	2,3 ± 1,14	18,13 ± 1,06	31,33 ± 13,15	1450 ± 43,24

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение», число степеней свободы n = 3.

Таблица 2. **Физико-химические характеристики солода пшеничного и клейковины сухой**

Table 2. **Physico-chemical characteristics of wheat malt and dry gluten**

Наименование показателей	Рецептурные компоненты	
	Солод пшеничный	Клейковина сухая
Влажность, %	8,39 ± 0,10	3,8 ± 0,08
Насыпная плотность, кг/м^3	422,93 ± 1,24	460,47 ± 1,51
Цветовые характеристики L: a: b	(91,21 ± 7,93): (0,01 ± 0,19): (10,14 ± 2,73)	(92,27 ± 7,65): (–0,13 ± 0,21): (10,08 ± 2,51)

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение ± стандартное отклонение», число степеней свободы n = 3.

из 25 грамм муки и 14 грамм воды, затем выдерживали его в воде в течение 20 минут для гидратации и образования внутри- и межмолекулярных связей в веществах, образующих клейковину (глиадин и глютенин). Сырую клейковину отмывали руками с использованием сита в водопроводной воде. Полученную клейковину взвешивали и рассчитывали процентное содержание сырой клейковины по отношению к массе муки. Качество сырой клейковины оценивается по показателю прибора «ИДК-3», при этом она делится на следующие качественные группы: неудовлетворительно крепкая (менее 32 единиц прибора), удовлетворительно крепкая (33–52 единицы прибора), хорошая (53–77 единиц прибора), удовлетворительно слабая (78–102 единицы прибора), неудовлетворительно слабая (более 103 единиц). Влажность муки была определена в соответствии с российским стандартом (ГОСТ 9404–88[5]) следующим образом: в разогретый до 130 °C сушильный шкаф поместили бюксы для просушивания в течение 60 минут, затем охлаждали их в эксикаторе в течение 20 минут. Навески муки массой по 5 грамм поместили в бюксы, затем отправили их в сушильный шкаф для высушивания на 40 минут, после чего охладили их в эксикаторе. Влажность муки определяли отношением разности масс до и после высушивания к массе до высушивания. Насыпную плотность муки выявляли в соответствии с российским стандартом (ГОСТ 19440–94[6]) с использованием метода Волюметра Скотта. Водопоглотительная способность муки, продолжительность замеса теста до готовности, его стабильность и разжижение были определены в соответствии с ISO 5530–1:1997[7]. Максимальная вязкость клейстеризованной суспензии устанавливалась в соответствии с ISO 7973:1992[8].

Пшеничный солод был получен от ООО «Прорасти», г. Москва. Клейковина сухая — от ООО «Слим-Мастер», г. Подольск. Влажность и насыпную плотность пшеничного солода и сухой клейковины определяли аналогичными методами, что и для пшеничной муки. Цветовые характеристики выявлялись с использованием колориметра Chroma Meter CR-410 (KONICA MINOLTA, INC., Япония), в координатах цветового пространства L*, a*, b* (CIELAB) [32].

Сбор данных и обработку результатов проводили с помощью программы Microsoft Office Excel. Все измерения были выполнены в трех параллельных измерениях (кроме измерений показателей мякиша хлеба, выполненных в шести параллельных измерениях), результаты представлены как среднее арифметическое ± стандартное отклонение.

3. Результаты и обсуждение

Управление структурно-механическими свойствами мякиша или текстурными показателями пшеничного хлеба возможно за счет контроля состояния углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплексов. Они, в свою очередь, предопределяют как реологические свойства теста на стадии его приготовления, так и качество готовых изделий на стадии выпечки. Оптимизацию состояния приведенных макрокомплексов пшеничной муки осуществляли посредством установления оптимальных дозировок пшеничного солода и сухой клейковины.

Физико-химические характеристики (ФХХ) муки пшеничной хлебопекарной высшего сорта, используемой в работе, приведены в Таблице 1, солода пшеничного и сухой клейковины — в Таблице 2.

Из Таблицы 1 видно, что пшеничная мука имеет высокое значение показателя числа падения — 566 с, что свидетельствует о низкой ее сахарообразующей способности. Данное значение не позволяет получить в результате гидролиза крахмала 6% сахаров, из которых 3% обеспечивают жизнедеятельность дрожжевых клеток и молочнокислых бактерий в процессе созревания теста и окончательной расстойки тестовых заготовок, а оставшиеся 3% обусловливают окраску корки при выпечке хлебобулочных изделий.

В работах, посвященных изучению состояния углеводно-амилазного комплекса пшеничной муки [33,34], было установлено, что показатель биотехнологических свойств пшеничной муки число падения имеет оптимальное значение, равное 235 ± 15 с, для получения 6% сахаров. Данное значение числа падения для исходной пшеничной муки с числом падения 566 с было обеспечено путем внесения пшеничного солода в количестве 5% с помощью номограммы, приведенной в работе [33].

Первые исследования взаимосвязи показателя числа падения пшеничной муки и качества готового хлеба провел Харальд Пертен в 1964 году [35]. Он отмечал, что низкое значение числа падения может предопределять плохое качество готовых изделий, так как пшеничная мука быстро разжижается во время выпечки. Харальд выяснил, что пшеничная мука с показателем числа падения в диапазоне от 200 до 250 секунд позволяет получить мякиш с идеальными структурно-механическими свойствами, золотистого цвета корку и высокий объем готового изделия. Также Пертеном было установлено, что хлеб, приготовленный из муки с высоким значением числа падения (свыше 300 секунд), имеет сухой, неэластичный, крошковатый мякиш. По другим данным, мякиш хлебобулочных изделий получается липким и заминающимся при использовании муки с показателем числа падения ниже 150 секунд, потому что крахмал в такой муке сильно гидролизуется α-амилазой и не может сформировать непрерывный крахмально-белковый каркас для обеспечения нужной структуры теста [36,37].

Результаты проведенных в 2010-х годах испытаний, посвященных влиянию числа падения на качество пшеничной муки, подтвердили данные прошлых исследований [38]. Установлено, что число падения в диапазоне от 200 до 300 секунд и активность α-амилазы имеют линейную зависимость. В муке с данным значением активность α-амилазы достаточно сбалансирована, что позволяет крахмалу правильно преобразовываться во время выпечки из кристаллической структуры в аморфное состояние.

Некоторые страны мира регламентируют значение показателя числа падения в зависимости от сорта пшеницы. В Австралии для твердой пшеницы коммунального сорта и для премиальных белых сортов рекомендованное значение числа падения составляет 200 и 350 секунд соответственно [39]. В Великобритании определен

[5] ГОСТ 9404–88. «Мука и отруби. Метод определения влажности». М.: Стандартинформ, 2007. — 5 с.

[6] ГОСТ 19440–94. «Порошки металлические. Определение насыпной плотности». М.: Издательство стандартов; Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. — 15 с.

[7] ISO 5530–1–2013. «Мука пшеничная. Физические характеристики теста. Определение водопоглощения и реологических свойств с применением фариографа». М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

[8] ISO 7973–2013. «Зерно и зернопродукты. Определение вязкости с применением амилографа». М.: Стандартинформ, 2014. — 12 с.

Таблица 3. **Показатели фаринограммы пшеничного теста**
Table 3. **Indicators of farinograms of wheat dough**

№ п/п	Наименование проб пшеничного теста	Показатели фаринограммы (500 е.Ф.)						
		$W_{м.ф.}$, %	ВПС*, %	B*, мин	C, мин	E*, е.Ф.	$E_{уд}$*, кДж/кг	$W_т$*, %
1	Контроль	9,3±0,1	55,6±0,1	2,5±0,2	19,0±1,1	18±3,3	8,52±0,8	45,4±0,3
	Опытные пробы теста с добавлением сухой клейковины							
2	1%	9,3±0,1	56,5±0,1	9,5±0,3	17,1±1,1	—	37,44±0,9	45,7±0,3
3	2%	9,3±0,1	56,6±0,1	12,0±0,2	18,4±1,0	—	45,19±0,9	45,8±0,3
4	3%	9,3±0,1	57,8±0,1	11,2±0,2	18,3±1,2	—	43,35±0,8	46,1±0,2
5	4%	9,3±0,1	59,4±0,1	12,7±0,2	18,0±1,0	—	49,04±0,8	46,7±0,3
6	5%	9,3±0,1	61,3±0,1	19,0±0,2	18,1±1,1	—	72,75±0,7	47,3±0,3
7	6%	9,3±0,1	63,2±0,1	20,0±0,0	17,5±1,0	—	72,31±0,9	47,9±0,2
8	7%	9,3±0,1	65,0±0,1	20,0±0,0	17,0±1,0	—	69,97±1,0	48,5±0,3

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение±стандартное отклонение». Средние значения в столбцах не имеют значимых различий, кроме столбцов со значком «*» ($p < 0,05$), число степеней свободы n=3.

показатель числа падения для мягкой и твердой пшеницы — 220 и 250 секунд соответственно [40].

Таким образом, установленное нами оптимальное значение числа падения, равное 235±15 секундам, соотносится с результатами других зарубежных ученых [35–40].

Показатели реологического поведения пшеничного теста при замесе без внесения (контроль) и с внесением (опытные пробы) сухой клейковины приведены в Таблице 3.

На Рисунке 1 приведен график изменения удельной энергии замеса в зависимости от дозировки сухой клейковины.

Из анализа данных, представленных в Таблице 3 и на Рисунке 1, была установлена оптимальная дозировка сухой клейковины, равная 3%, соответствующая на графике точке перегиба «X». При этом общее количество клейковины вместе с клейковиной, содержащейся в муке, составило 31,3%.

В работе Маслова А. В. и др. [41], посвящённой исследованию влияния комплексной растительной добавки на свойства пшеничного теста, установлено, что её внесение в количестве 16% позволяет получить тесто с оптимальными реологическими свойствами. При этом в статье приведены графики влияния количества комплексной добавки на изменение показателей водопоглощения пшеничной муки, времени образования теста и его устойчивости, на которых видно, что при её добавлении в дозировке 16% появляется соответствующая точка перегиба функции, что подтверждает наш подход в определении оптимальной дозировки добавочного рецептурного компонента, использующегося с целью улучшения технологических свойств пшеничной муки.

Для оценки реологического поведения пшеничного теста при замесе были получены его фаринограммы (Рисунок 2).

Показатели фаринограммы пшеничного теста приведены в Таблице 4.

Из Рисунка 2 и Таблицы 4 (проба I) видно, что повышение автолитической активности пшеничной муки за счет внесения оптимального количества пшеничного солода приводит к увеличению

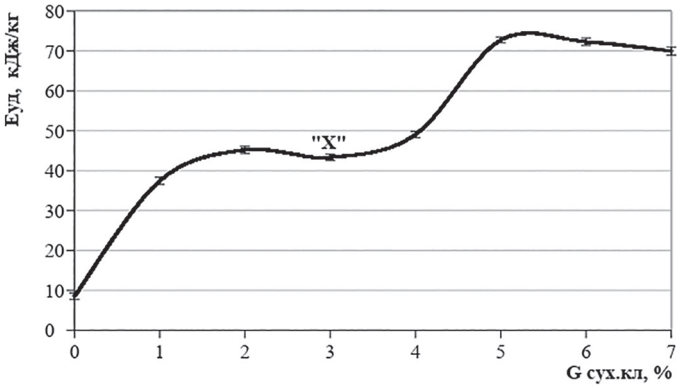


Рисунок 1. **Влияние дозировки сухой клейковины на изменение удельной энергии замеса**
Figure 1. **Effect of a dose of dry gluten on changes of the specific mixing energy**

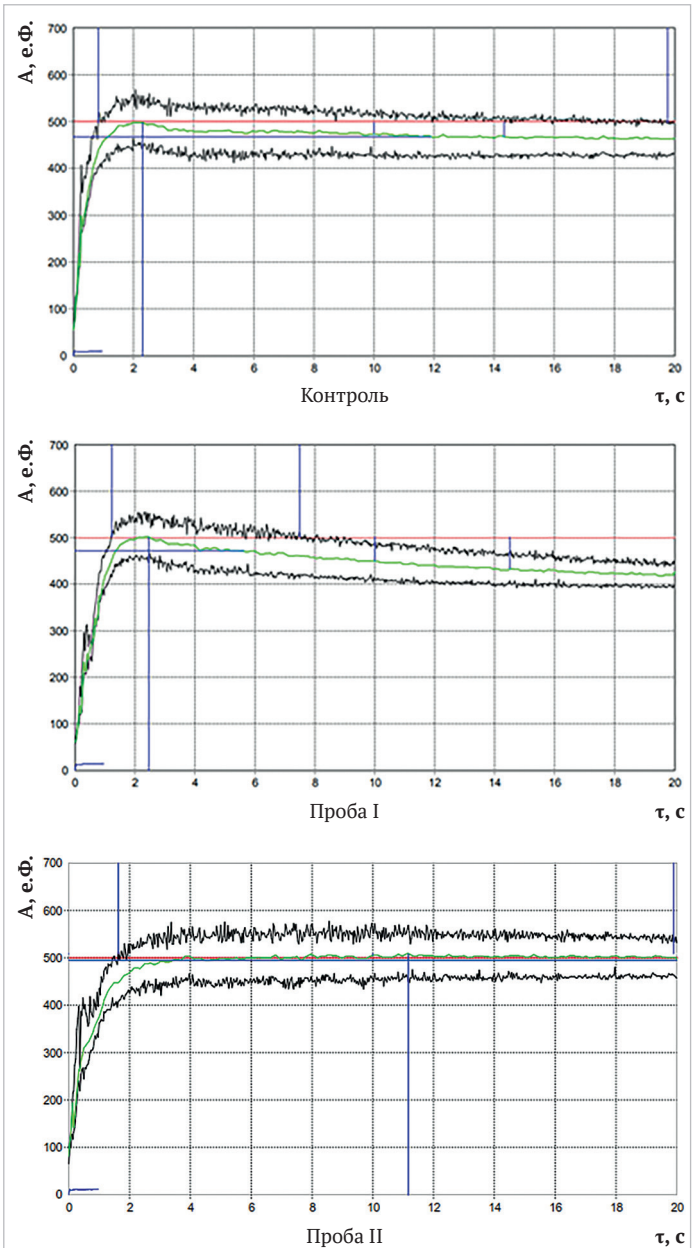


Рисунок 2. **Фаринограммы (реодинамика замеса) пшеничного теста с консистенцией 500 е.Ф.**
Figure 2. **Farinograms (rheodynamics of mixing) of wheat dough with the consistency of 500 FU**

Таблица 4. **Показатели фариограммы пшеничного теста**
Table 4. **Indicators of the farinogram of wheat dough**

№ п/п	Наименование проб пшеничного теста	Показатели фариограммы (500 е.Ф)				
		$W_{м.ф.}$, %	ВПС*, %	В*, мин	С*, мин	Е*, е.Ф.
1	Контроль	11,0±0,09	55,9±0,08	2,3±0,23	18,9±1,04	31±3,2
2	Проба I	11,0±0,09	58,5±0,07	2,5±0,21	6,3±1,07	75±3,4
3	Проба II	9,3±0,07	57,8±0,10	11,2±0,27	18,3±1,10	–

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение±стандартное отклонение». Средние значения в столбцах не имеют значимых различий, кроме столбцов со значком «*» ($p < 0,05$), число степеней свободы n=3.

показателя разжижения (Е) теста, предопределяемого увеличением активности α-амилазы и образованием бóльшего количества мальтозы, что делает пшеничное тесто более пластичным. Показатель Е увеличивается на 40 е.Ф., и его конечное значение 75±3,4 е.Ф. является критической точкой в определении оптимального состояния углеводно-амилазного комплекса муки с помощью прибора Farinograph.

В проведённых Ямашевым Т. А. и др. [42] исследованиях о влиянии овсяного солода на реологические характеристики пшеничного теста также отмечается, что его внесение приводит к увеличению показателя разжижения теста. В данной работе исследовались тестовые полуфабрикаты с добавлением солода в дозировках, равных 1% и 5%. Внесение овсяного солода в количестве 1% обеспечило получение показателя разжижения теста, равного 70 е.Ф. Дальнейшее увеличение дозировки до 5% привело к соответствующему увеличению показателя разжижения теста, и он был равен 150 е.Ф. Отмечается, что данное тесто было более вязким и менее упругим в сравнении с предыдущим (дозировка 1%). Из этого следует, что установленное нами значение критической точки показателя разжижения (Е) теста, сопоставляется с данными других авторов.

Таким образом, показатель разжижения (Е) теста может дополнять показатель числа падения при оценке сахарообразующей способности муки. Образование бóльшего количества продуктов гидролиза крахмала приводит в свою очередь к увеличению водопоглотительной способности (ВПС) муки и, как следствие, к увеличению продолжительности замеса (В) теста до готовности.

Из Рисунка 2 и Таблицы 4 также видно (проба II), что добавление сухой клейковины приводит к увеличению водопоглотительной способности (ВПС) муки на 3,4% за счет гелеобразующей способности проламиновой и глютелиновой фракций белков клейковины. В связи с этим увеличилась продолжительность замеса (В) пшеничного теста. При этом стабильность (С) теста не изменяется и разжижения теста не наблюдается, так как сухая клейковина состоит преимущественно из белков глиадина и глютенина, образующих клейковинный каркас теста, а структура зерен крахмала остается в нативном состоянии.

В работе Lucas Marchetti и др. [43] отмечается, что в зависимости от технологических свойств муки и качества вносимой сухой клейковины реологические характеристики теста могут быть разными. Авторы отмечают, что внесение пшеничной клейковины, как правило, приводит в большинстве случаев к увеличению водопоглотительной способности муки. Продолжительность замеса теста до готовности может, как повыситься, так и понизиться. Стабильность теста преимущественно не изменяется, а его разжижение уменьшается. Из этого следует, что полученные нами результаты не противоречат данным других исследователей.

Таким образом, при дозировке сухой клейковины, равной 3%, повышается общее количество клейковины в пшеничном тесте до оптимального значения 31,3%, что обеспечивает формирование более устойчивой к механическому воздействию при замесе структуры теста.

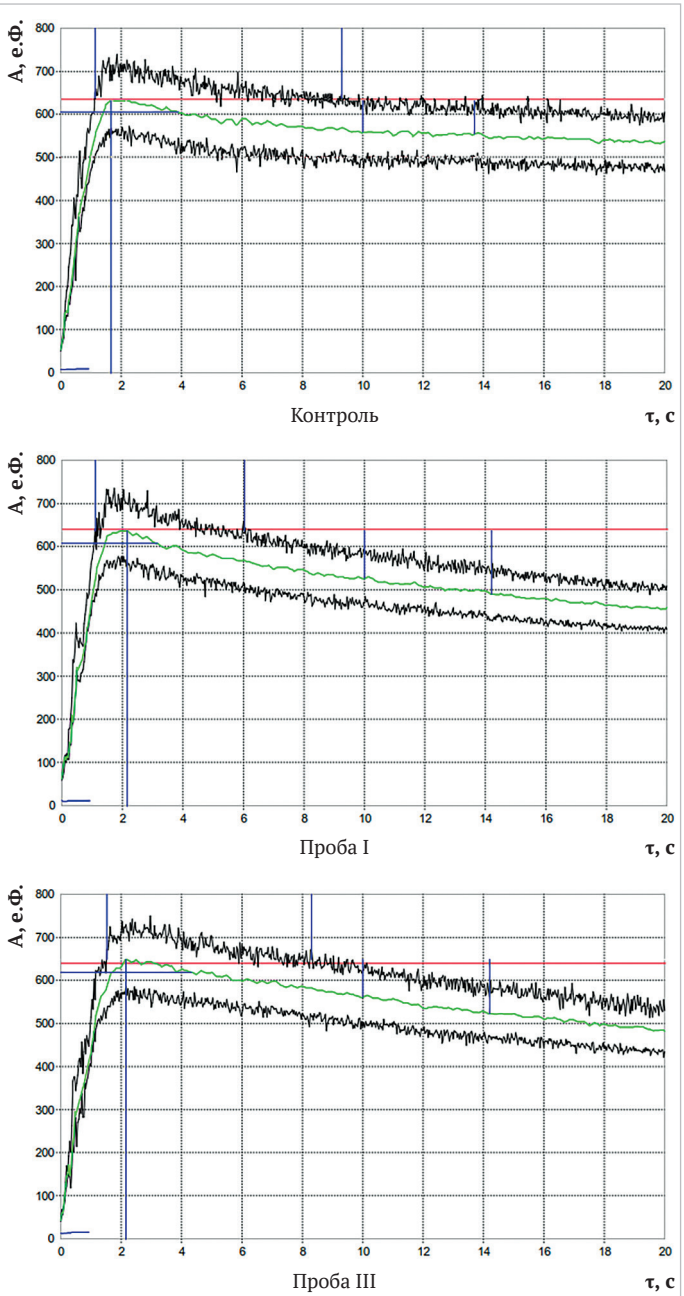


Рисунок 3. **Реодинамика замеса пшеничного теста с консистенцией 640 е. Ф.**
Figure 3. **Rheodynamics of mixing of wheat dough with the consistency of 640 FU**

Для проведения пробной лабораторной выпечки пшеничного хлеба, помимо контрольной пробы, были выбраны проба I и проба III. Пробу II не целесообразно использовать, так как без оптимизации углеводно-амилазного комплекса пшеничной муки, играющего ключевую роль в управлении качеством хлебобулочных изделий, повышение органолептических и физико-химических показателей качества будет незначительное. Замес контрольной пробы и опытных проб теста осуществляли с консистенцией 640 е.Ф. (Рисунок 3). Показатели фариограмм контрольной и опытных проб теста приведены в Таблице 5.

Таблица 5. **Физико-химические характеристики пшеничного теста**
Table 5. **Physico-chemical characteristics of wheat dough**

№ п/п	Наименование проб пшеничного теста	Показатели фариограммы (640 е.Ф.)					
		$W_{м.ф.,\%}$	ВПС*,%	В*, мин	С*, мин	Е*, е.Ф.	$W_т$,%
1	Контроль	11,0±0,09	50,6±0,09	1,7±0,25	8,3±1,03	81±3,36	42,3±0,31
2	Проба I	11,0±0,09	52,4±0,11	2,2±0,21	4,9±1,09	147±3,18	42,6±0,33
3	Проба III	10,1±0,11	56,2±0,08	2,2±0,22	6,2±1,01	126±3,29	43,1±0,27

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение±стандартное отклонение». Средние значения в столбцах не имеют значимых различий, кроме столбцов со значком «*» ($p < 0,05$), число степеней свободы n=3.

Из Рисунка 3 и Таблицы 5 видно, что продолжительность замеса (В) теста до готовности у опытных проб по сравнению с контрольной пробой увеличилась примерно на 30%. При этом стабильность (С) теста при внесении солода уменьшилась на 40%, а при совместном добавлении солода и сухой клейковины — на 17%. Увеличение влажности теста при внесении дозировки солода составило 0,7%, а при дополнительном добавлении сухой клейковины достигло почти 2,0%. Это обусловлено тем, что на первом этапе происходит гидролиз крахмала, а затем вступает в действие гелеобразующая способность внесенной сухой клейковины.

Уменьшение стабильности (С) теста при внесении пшеничного солода, как отдельно, так и совместно с сухой клейковиной, обусловлено ферментативным гидролизом. Это приводит к изменению соотношения упругой и пластической деформации в сторону последней. В результате при брожении формируются более пластичные межпоровые стенки и микрокапилляры, способные увеличиваться в размерах и обеспечивать повышение газоудерживающей способности полуфабриката. Это, в свою очередь приводит к увеличению пористости готовых изделий.

К аналогичному выводу о влиянии ферментативного гидролиза, который привёл к уменьшению показателя стабильности теста, пришли Ямышев Т. А. и др. в своей работе, упоминаемой ранее [42]. Авторы отмечают, что с увеличением дозировки солода происходит сокращение времени нахождения теста в устойчивой зоне, и это обусловлено воздействием ферментов солода на структурные компоненты теста.

В Таблице 6 приведена нормативная рецептура пшеничного теста при проведении пробной лабораторной выпечки хлеба: контрольной пробы (без рецептурных компонентов); опытной пробы I (с пшеничным солодом) и опытной пробы III (с пшеничным солодом и сухой клейковиной).

На Рисунке 4 представлены образцы контрольных и опытных проб хлеба.

В Таблице 7 приведены физико-химические характеристики пшеничного хлеба.

Из Таблицы 7 видно, что объем ($V_{хл}$, $см^3$) и удельный объем ($V_{уд}$, $см^3/г$) опытной пробы хлеба I с добавлением пшеничного солода увеличились на 15% по сравнению с контрольной пробой хлеба; удельный объем опытной пробы III увеличился на 25%, а плотность ($\rho_{мяк}$, $г/см^3$) мякиша соответственно уменьшилась. Пористость мякиша ($П_{мяк}$, %) хлеба с пшеничным солодом в абсолютном выражении увеличилась

Таблица 6. **Нормативная рецептура пшеничного теста при проведении пробной лабораторной выпечки хлеба**

Table 6. **Normative recipe of wheat dough upon performing experimental laboratory baking of bread**

Наименование сырья	Расход сырья при безопарном способе приготовления теста		
	Контроль	Проба I	Проба III
Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта, кг	100,0	100,0	100,0
Дрожжи хлебопекарные прессованные, кг	2,5	2,5	2,5
Соль пищевая, кг	1,5	1,5	1,5
Солод пшеничный, кг	–	5,0	5,0
Клейковина сухая, кг	–	–	3,0
Вода, кг	С учетом консистенции теста, равной 640 е.Ф.		

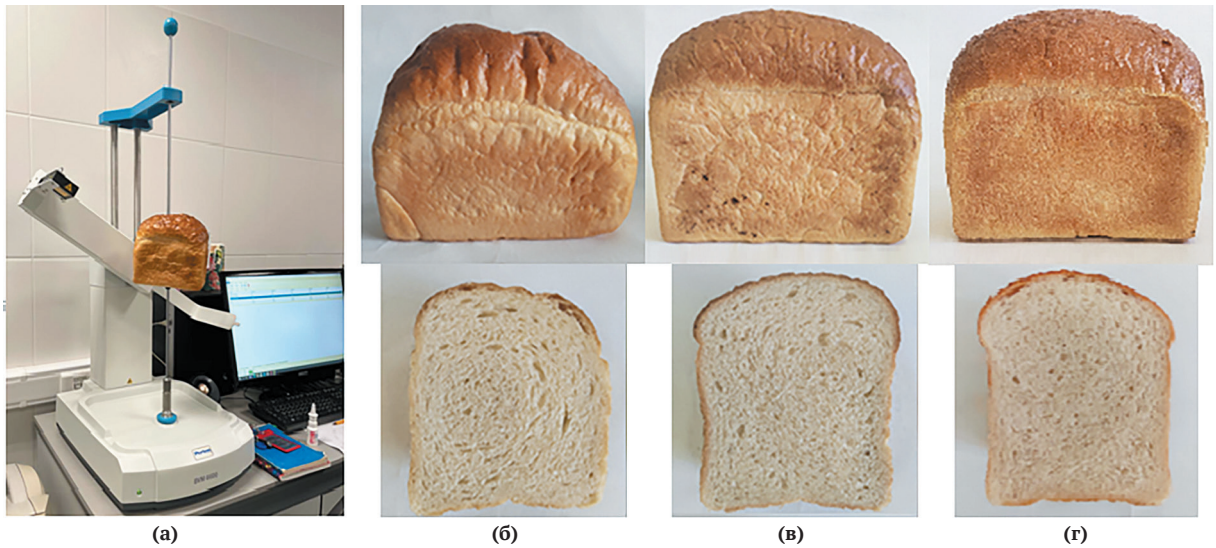
на 5,1% по сравнению с контрольным образцом, а хлеба с пшеничным солодом и клейковиной — на 5,5%. Наименьшее значение суммарных технологических затрат: упека ($G_{уп}$, %) и усушки ($G_{ус}$, %) пшеничного хлеба наблюдаются при совместном внесении пшеничного солода и сухой клейковины (проба III) в количестве 14,46%.

На Рисунке 5 приведены кривые изменения усилия (Fh, гс) нагружения при сжатии цилиндрической пробы мякиша на 5 мм для хлеба «контроль», «проба I» и «проба III» с разной продолжительностью хранения после выпечки — 12; 36; 60; 84 и 108 ч.

На Рисунке 5 видна существенная разница в реологическом поведении мякиша при определении его твердости с использованием метода обратимой деформации, при этом значения твердости (Fh) у опытной пробы с добавлением пшеничного солода и клейковины сухой были наименьшие, а наибольшее значение данного показателя — у контрольной пробы.

В Таблице 8 приведены физико-химические характеристики мякиша контрольных и опытных образцов хлеба.

Из Таблицы 8 видно, что изменение индекса твердости (Ih) мякиша хлеба для контрольной пробы составило: № 1 — от 21 до 45 гс/[(г/см^3)×%]. У опытных проб хлеба: проба I — от 12 до 30 гс/[(г/см^3)×%], проба III — от 10 до 20 гс/[(г/см^3)×%].



(а) (б) (в) (г)

Рисунок 4. **Внешний вид целого хлеба и в разрезе (а – лазерный объемомерник, б — контроль; в — проба I; г — проба III)**

Figure 4. **Appearance of whole bread and cross-section appearance (a - laser volume measuring instrument, б — control; в — sample I; г — sample III)**

Таблица 7. **Физико-химические характеристики контрольного и опытного хлебов**

Table 7. **Physico-chemical characteristics of control and experimental bread**

№ п/п	Наименование проб пшеничного теста	Физико-химические характеристики пшеничного хлеба						
		$G^*_{уп}$, %	$G^*_{ус}$, %	$W_{мяк}$, %	$\rho^*_{мяк}$, г/см^3	$V^*_{хл}$, см^3	$V^*_{уд.хл}$, см^3/г	$П^*_{мяк}$, %
1	Контроль	12,2±0,37	2,44±0,35	41,9±0,43	0,246±0,019	1902±29,65	3,61±0,15	81,2±1,42
2	Проба I	14,5±0,42	2,48±0,32	41,1±0,41	0,179±0,009	2190±33,95	4,27±0,16	86,3±0,72
3	Проба III	12,8±0,52	1,66±0,44	41,7±0,40	0,175±0,013	2376±34,09	4,65±0,18	86,7±0,98

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение±стандартное отклонение». Средние значения в столбцах не имеют значимых различий, кроме столбцов со значком «*» ($p < 0,05$), число степеней свободы n=3.

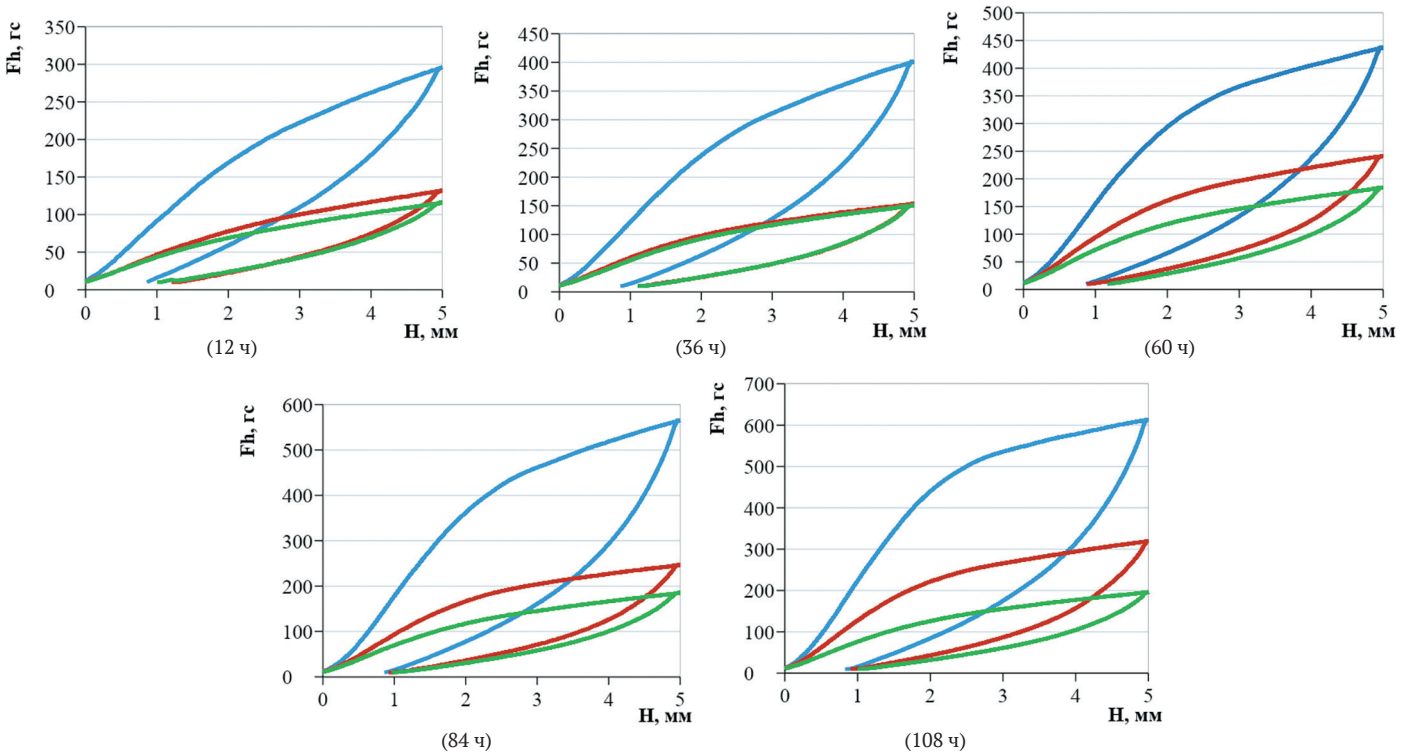


Рисунок 5. **Кинетика усилия нагружения при сжатии пробы мякиша для хлеба с разной продолжительностью хранения после выпечки: 12; 36; 60; 84 и 108 ч (Контроль ——; Проба I ——; Проба III ——)**

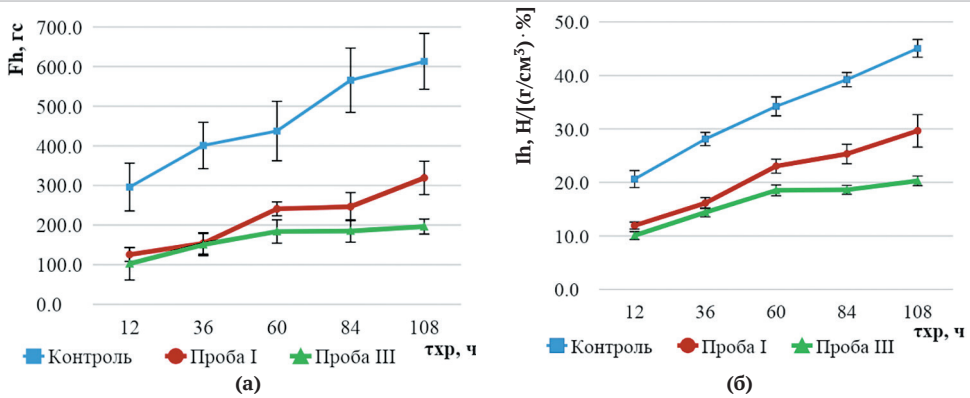
Figure 5. **Kinetics of loading force under compression of the crumb sample for bread with different storage duration after baking: 12; 36; 60; 84 and 108 hours (Control ——; Sample I ——; Sample III ——)**

Таблица 8. **Физико-химические характеристики мякиша хлеба**

Table 8. **Physico-chemical characteristics of bread crumb**

Вид изделия	ФХХ мякиша	Значения ФФХ мякиша хлеба с разной продолжительностью хранения, ч.				
		12	36	60	84	108
Контроль	$\rho^*_{мяк}$, г/см^3	0,246±0,019	0,245±0,011	0,220±0,012	0,249±0,008	0,235±0,009
	$П_{мяк}$,%	81,21±1,42	81,26±0,86	83,18±0,88	80,98±0,64	82,05±0,66
	$W_{мяк}$,%	41,7±0,39	41,9±0,37	42,0±0,42	42,1±0,42	42,1±0,41
	Fh*, гс	295,92±60,50	401±58,51	437,38±75,20	565,53±81,20	613,25±70,62
	Ih*, гс/[(г/см^3)×%]	20,62±1,59	28,10±1,24	34,21±1,77	39,21±1,34	45,05±1,66
	E^I, кПа	11,53±4,27	15,83±1,67	18,27±6,15	20,20±4,34	27,30±2,58
	E^{II}, кПа	6,17±2,79	5,88±2,35	5,88±1,81	8,83±3,55	5,46±2,17
	$A^*_{общ}$, Дж/г × E^{-4}	17,63±1,36	24,34±1,08	31,60±1,64	34,98±1,20	42,86±1,58
	$A^*_{пл}$, Дж/г × E^{-4}	7,84±0,61	12,33±0,55	17,35±0,90	19,37±0,66	24,61±0,91
	$A^*_{упр}$, Дж/г × E^{-4}	9,79±0,76	12,02±0,53	14,25±0,74	15,62±0,53	18,25±0,67
	$V_ч$, гс/сутки			89,87		
Проба I	$\rho^*_{мяк}$, г/см^3	0,179±0,009	0,164±0,011	0,180±0,011	0,168±0,012	0,186±0,020
	$П_{мяк}$,%	86,3±0,72	87,5±0,81	86,2±0,82	87,2±0,91	85,8±1,51
	$W_{мяк}$,%	41,7±0,41	41,9±0,40	42,0±0,41	42,1±0,38	42,1±0,39
	Fh*, гс	125,57±17,30	153,70±27,04	240,97±17,73	246,57±35,42	319,17±42,09
	Ih*, гс/[(г/см^3) ×%]	11,93±0,65	16,14±1,03	23,04±1,31	25,32±1,81	29,64±3,04
	E^I, кПа	5,56±0,89	8,48±2,93	13,81±4,35	11,53±1,20	17,21±3,56
	E^{II}, кПа	2,73±1,09	3,31±1,30	2,86±1,23	3,98±0,67	4,43±1,01
	$A^*_{общ}$, Дж/г × E^{-4}	10,37±0,57	14,73±0,94	21,40±1,21	23,54 ±1,69	27,90±2,87
	$A^*_{пл}$, Дж/г × E^{-4}	5,20±0,28	7,90±0,50	11,95±0,68	13,40±0,96	16,26±1,67
	$A^*_{упр}$, Дж/г × E^{-4}	5,17±0,28	6,83±0,43	9,44±0,54	10,14±0,73	11,64±1,20
	$V_ч$, гс/сутки			40,66		
Проба III	$\rho^*_{мяк}$, г/см^3	0,175±0,013	0,180±0,011	0,171±0,009	0,172±0,008	0,167±0,007
	$П_{мяк}$,%	86,67±0,98	86,23±0,77	86,94±0,68	86,88±0,57	87,25±0,54
	$W_{мяк}$,%	41,7±0,39	41,9±0,40	42,0±0,39	42,1±0,41	42,1±0,41
	Fh*, гс	102,55±40,98	150,73±27,73	183,77±29,43	185,20±28,19	196,32±19,15
	Ih*, гс/[(г/см^3) ×%]	10,07±0,73	14,39±0,84	18,52±1,02	18,62±0,84	20,30±0,91
	E^{I*}, кПа	6,68±2,13	6,81±1,45	10,28±2,82	10,12±3,21	10,50±1,66
	E^{II*}, кПа	1,51±0,35	2,34±0,65	2,28±0,88	4,21±0,97	4,46±2,71
	$A^*_{общ}$, Дж/г × E^{-4}	9,93 ±0,72	12,84 ±0,75	16,95 ±0,94	16,79±0,76	18,49±0,83
	$A^*_{пл}$, Дж/г × E^{-4}	4,99±0,36	6,65±0,39	9,26±0,51	8,90±0,40	9,88±0,44
	$A^*_{упр}$, Дж/г × E^{-4}	4,94±0,46	6,19±0,36	7,69±0,43	7,88±0,36	8,61±0,39
	$V_ч$, гс/сутки			27,45		

Примечание: данные приведены в форме «среднее значение±стандартное отклонение». Средние значения в столбцах не имеют значимых различий, кроме столбцов со значком «*» ($p < 0,05$), число степеней свободы n=6.



(а) (б)

Рисунок 6. **Влияние продолжительности хранения пшеничного хлеба («контроль»; «проба I»; «проба III») на изменение показателей твердости (а) и индекса твердости (б) мякиша в процессе хранения хлеба в течение от 12 ч до 108 ч**

Figure 6. **Effect of storage duration of wheat bread (control, sample I, sample III) on changes in the hardness indicators (a) and hardness index (б) of crumb during bread storage for 12 hours to 108 hours**

На Рисунке 6 приведена динамика показателей твердости (Fh) и индекса твердости (Ih) мякиша пшеничных хлебов «контроль», «проба I» и «проба III» при хранении после выпечки в течение 108 часов.

Анализ данных, представленных в Таблице 8 и на Рисунке 6, позволил установить скорость черствения мякиша. Для контрольной пробы она составила 90 гс/сутки, для опытных образцов: проба I — 41 гс/сутки, проба III — 27 гс/сутки. Таким образом, наименьшая скорость черствения отмечена для пробы III с внесением сухой клейковины.

Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными [44–45], подтверждают положительное влияние сухой клейковины на качество готовых изделий. Исследования, проведенные Егошиной Т. [44], аналогично выявили, что внесение пшеничной клейковины приводит к увеличению пористости мякиша хлебобулочных изделий и к снижению технологических затрат производства. Эти же данные подтверждают исследования Погонец Е. В. [45], которая также выявила, что внесение сухой клейковины обеспечивает увеличение пористости и объема готовых изделий. Lauren Tebben и др. [46] отмечают, что добавление сухой клейковины не только обеспечивает увеличение объема буханки хлеба, но и снижает твердость мякиша. Таким образом, отмечается закономерность, что добавление сухой пшеничной клейковины улучшает органолептические и физико-химические свойства готовых изделий.

4. Выводы

Таким образом, исследования, направленные на оптимизацию реологических свойств пшеничного теста за счет внесения в муку пшеничную хлебопекарную высшего сорта пшеничного солода и сухой клейковины, позволили сделать следующие выводы:

1. Установлена оптимальная дозировка сухой пшеничной клейковины, равная 3%, позволяющая рекомендовать мукомольной промышленности изготовление муки пшеничной хлебопекарной с содержанием клейковины в пределах 31,3 ± 0,3%. Такое ее количество обеспечивает минимальную скорость черствения мякиша пшеничного хлеба при хранении при условии оптимизации показателей ее углеводно-амилазного комплекса;
2. Установлена динамика индекса твердости мякиша пшеничного хлеба без внесения и с внесением пшеничного солода, а также при совместном внесении пшеничного солода и сухой клейковины при хранении изделий в течение 108 ч.;
3. Установлена скорость черствения мякиша контрольной пробы пшеничного хлеба, опытной пробы I (с пшеничным солодом) и опытной пробы III (с пшеничным солодом и сухой клейковиной), которая составила 90 гс/сутки, 41 гс/сутки и 27 гс/сутки соответственно;
4. Наибольший технологический эффект при оптимизации реологических свойств пшеничного теста достигается за счет совместного внесения пшеничного солода и сухой клейковины. Такое сочетание способствует сокращению скорости черствения мякиша хлеба в 3,3 раза по сравнению с контрольной пробой и составляет 28 гс/сутки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

1. Носова, М. В., Дремучева, Г. Ф., Костюченко, М. Н., Смирнова, С. А. (2019). Влияние мультиэнзимной композиции на степень черствости батонов нарезных из пшеничной хлебопекарной муки высшего сорта. *Хлебопечение России*, 2, 39–43. [Nosova, M. V., Dremucheva, G. F., Kostyuchenko, M. N., Smirnova, S. A. (2019). Effect of multi-enzyme composition on a degree of staleness of long loaves from baker's wheat flour of the highest grade. *Bakery of Russia,* 2, 39–43. (In Russian)]
2. Kostyuchenko, M., Martirosyan, V., Nosova, M., Dremucheva, G., Nevskaya, E., Savkina, O. (2021). Effects of α-amylase, endo-xylanase and exoprotease combination on dough properties and bread quality. *Agronomy Research*, 19(S3), 1234–1248. https://doi.org/10.15159/AR.21.067
3. Liu, W., Brennan, M. A., Serventi, L., Brennan, C. S. (2017). Effect of cellulase, xylanase and α-amylase combinations on the rheological properties of Chinese steamed bread dough enriched in wheat bran. *Food Chemistry*, 234, 93–102. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.160
4. Sluková, M., Kubín, M., Horáčková, Š., Příhoda, J. (2015). Application of amylographic method for determination of the staling of bakery products. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(6), 507–512. https://doi.org/10.17221/184/2015-CJFS
5. Dahiya, S., Bajaj, B. K., Kumar, A., Tiwari, S. K., Singh, B. (2020). A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making. *Process Biochemistry*, 99, 290–306. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.002
6. Rayas-Duarte, P., Murtini, E. S. (2020). Bread staling. Chapter in a book: Breadmaking (Third Edition). Woodhead Publishing, 2020. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102519-2.00019-0
7. Chen, Y., Gavaliatsis, T., Kuster, S., Städeli, C., Fischer, P., Windhab, E. J. (2021). Crust treatments to reduce bread staling. *Current Research in Food Science*, 4, 182–190. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.004
8. de Beer, T. (2023). Quality assessment of wheat flour, dough, and bread. Chapter in a book: ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology. Academic Press, 2023. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00002-2
9. Karim, A. A., Norziah, M. H., Seow, C. C. (2000). Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 71(1), 9–36. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00130-8
10. Gray, J. A., Bemiller, J. N. (2003). Bread staling: Molecular basis and control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(1), 1–21. https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2003.TB00011.X
11. Eliasson, A. C. (2020). Wheat starch structure and bread quality. Chapter in a book: Breadmaking (Third Edition). Woodhead Publishing, 2020. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102519-2.00005-0
12. Сметанин, Д. О. (2023). Определение критических точек показателей состояния углеводно-амилазного комплекса пшеничной муки. Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. Москва: Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, 2023. [Smetanin, D.O. (2023). Determination of critical points of indicators of the state of the carbohydrate-amylase complex of wheat flour. International scientific-practical conference of young scientists and specialists of the Department of the Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences. Moscow: V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 2023. (In Russian)]
13. Лейберова, Н. В., Панкратьева, Н. А., Заворохина, Н. В., Чугунова, О. В. (2019). Влияние содержания амилозы в пшеничной муке на процесс черствения и показатели качества хлеба в процессе хранения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2, 93–101. [Leiberova N. V., Pankratieva N. A., Zavorohina N. V., Chugunova O. V. (2019). Amylose content in a wheat flour influence on become stale of bread and indicator of the quality of bread in the process of storage. *Storage and Processing of Farm Products,* 2, 93–101. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2019.156
14. Ауэрман, Л. Я. (2005). Технология хлебопекарного производства. СПб.: Профессия, 2005. [Auerman, L. Ya. (2006). Technology of bakery production. Saint-Petersburg: Profession, 2005. (In Russian)]
15. Шмалько, Н. А. (2022). Подбор закона распределения для числа падения пшеничной муки. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 1, 116–132. [Shamalko N. A. (2022). Selection of the distribution law for the falling number of wheaten flour. *Storage and Processing of Farm Products,* 1, 116–132. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2022.279

16. Barrero, J. M., Mrva, K., Talbot, M. J., White, R. G., Taylor, J., Gubler, F. et al. (2013). Genetic, hormonal, and physiological analysis of late maturity alpha-amylase in wheat. *Plant Physiology*, 161(3), 1265–1277. https://doi.org/10.1104/pp.112.209502
17. Delwiche, S. R., Vinyard, B. T., Bettge, A. D. (2015). Repeatability precision of the falling number procedure under standard and modified methodologies. *Cereal Chemistry*, 92(2), 177–184. https://doi.org/10.1094/cchem-07-14-0156-r
18. Gerits, L. R., Pareyt, B., Delcour, J. A. (2015). Wheat starch swelling, gelatinization and pasting: Effects of enzymatic modification of wheat endogenous lipids. *LWT — Food Science and Technology*, 63(1), 361–366. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.02.035
19. Marti, A., Cardone, G., Nicolodi, A., Quaglia, L., Pagani, M. A. (2017). Sprouted wheat as an alternative to conventional flour improvers in bread-making. *LWT,* 80, 230–236. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.028
20. Эррера, В. Э. (2019). Определение числа падения на приборах ПЧП-3 и ПЧП-7. *Хлебопродукты*, 8, 24–25. [Herrera, V. E. (2019). Determination of the falling number on the instruments PChP-3 and PChP-7. *Khleboproducty,* 8, 24–25. (In Russian)]
21. Эррера, В. Э. (2019). Определение Автоматическая система определения истинного значения числа падения Эталоник. *Хлебопродукты*, 5, 31–33. [Herrera, V. E. (2019). Determination Automatic system of determination of the true value of the falling number Etalonic. *Khleboproducty,* 5, 31–33. (In Russian)]
22. Жук, Е. А., Кондаков, К. С., Кибкало, И. А. (2020). Изучение состояния углеводно-амилазного комплекса зерна сорго через определение числа падения. *Кукуруза и сорго*, 4, 25–29. [Zhuk, E. A., Kondakov, K. S., Kibkalo, I. A. (2020). Study of the state of the carbohydrate-amylase complex of sorghum grain through the definition of fall numbers. *Corn and Sorghum*, 4, 25–29. (In Russian)] https://doi.org/10.25715/a4303-5647-5344-u
23. Шмалько, Н. А., Никитин, И. А., Штерман, С. В., Сидоренко, М. Ю. (2022). Определение условий процесса клейстеризации крахмалистого геля при изучении числа падения. *Пищевая промышленность*, 12, 6–9. [Shmalko, N. A., Nikitin, I. A., Shterman, S. V., Sidorenko, M. Yu. (2022). Determination of the conditions of the starch gel gelatinization process when studying the falling number. *Food Industry*, 12, 6–9. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.12.12.001
24. Березина, Н. А. (2022). Исследование технологического показателя «число падения» поликомпонентных мучных смесей с белоксодержащим сырьем. Продукты питания. Новые технологии: сборник научных статей. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина. [Berezina N. A. (2022). Study of the technological indicator «fall number» of polycomponent flour mixtures with protein-containing raw materials. Food products. New technologies: Collection of scientific papers. Orel: Orel State Agrarian University named after N. V. Parakhin. (In Russian)]
25. Chen, J.-S., Deng, Z. -y., Wu, P., Tian, J.-C., Xie, Q.-G. (2010). Effect of gluten on pasting properties of wheat starch. *Agricultural Sciences in China*, 9(12), 1836–1844. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60283-2
26. Гурьева, К. Б., Когтева, Е. Ф., Белецкий, С. Л. (2018). Изменение белково-протеиназного комплекса пшеничной муки при длительном хранении. *Хлебопродукты*, 12, 56–59. [Guryeva, K. B., Kogteva, E. F., Beletsky, S. L. (2018). Change in the protein-proteinase complex of wheat flour during long-term storage. *Khleboprodukty*, 12, 56–59. (In Russian)]
27. Гурьева, К. Б., Белецкий, С. Л., Хаба, Н. А. (2020). Оценка белково-протеиназного комплекса зерна пшеницы после длительного хранения. *Хлебопродукты*, 7, 34–36. [Guryeva, K. B., Beletsky, S. L., Khaba, N. A. (2020). Assessment of the protein-proteinase complex of wheat grain after long-term storage. *Khleboprodukty*, 7, 34–36. (In Russian)]
28. Витол, И. С., Панкратов, Г. Н., Мелешкина, Е. П., Кандроков, Р. Х. (2019). Особенности состава и белково-протеиназного комплекса муки из двухкомпонентной зерновой смеси и семян льна. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, 6, 83–88. [Vitol, I. S., Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Kandrokov, R. Kh. (2019). Features of composition and protein protein complex of flour from two-component grain mixture and flax seeds. *Technology and Merchandizing of Innovative Foodstuff*, 6, 83–88. (In Russian)]
29. Гурьева, К. Б., Белецкий, С. Л., Хаба, Н. А. (2020). Белково-протеиназный комплекс пшеницы после длительного хранения. *Товаровед продовольственных товаров*, 9, 69–72. [Guryeva, K. B., Beletsky, S. L., Khaba, N. A. (2020). Protein-proteinase complex of wheat after long-term storage. *Food Products Commodity Expert*, 9, 69–72. (In Russian)]
30. Медведев, П. В., Федотов, В. А. (2020). Современные подходы к оценке и управлению качеством продукции хлебопекарного производства. *Хлебопечение России*, 4, 33–37. [Medvedev, P. V., Fedotov, V. A. (2020). Modern approaches to assessment and management of quality of products of bakery production. *Bakery of Russia*, 4, 33–37. (In Russian)]
31. Wang, L., Li, Y., Guo, Z., Wang, H., Wang, A., Li, Z., et al. (2023). Effect of buckwheat hull particle-size on bread staling quality. *Food Chemistry*, 405(A), Article 134851. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134851
32. Haghighat-Kharazi, S., Kasaai, M. R., Milani, J. M., Khajeh, K. (2020). Antistaling properties of encapsulated maltogenic amylase in gluten-free bread. *Food Science and Nutrition*, 8(11), 5888–5897. https://doi.org/10.1002/FSN3.1865
33. Черных, В. Я., Иванов, В. С. (2019). Регулирование сахарообразующей способности хлебопекарной муки. Монография, М.: ООО «Буки Веди». [Chernykh, V. Ya., Ivanov, V. S. (2019). Regulation of sugar-forming capacity of baker's flour. Moscow: BukiVedi. (In Russian)]
34. Черных, В. Я., Кононенко, В. В., Максимов, А. С. (2020). Влияние продолжительности хранения хлебобулочных изделий на показатели твердости и эластичности мякиша. *Хлебопечение России*, 2, 19–27. [Chernykh, V. Ya., Kononenko, V. V., Maksimov, A. S. (2020). Effect of storage duration of bakery products on indicators of hardness and elacticity of crumb. *Bakery of Russia*, 2, 19–27. (In Russian)]
35. Perten, H. (1964). Application of falling number method for evaluating alpha-amylase activity. *Cereal Chemistry*, 41(3), 127–139.
36. Hug-Iten, S., Handschin, S., Conde-Petit, B., Escher, F. (1999). Changes in starch microstructure on baking and staling of wheat bread. *LWT — Food Science and Technology*, 32(5), 255–260. https://doi.org/10.1006/fstl.1999.0544
37. Scanlon, M. G., Zghal, M. C. (2001). Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34(10), 841–864. https://doi.org/10.1016/s0963-9969(01)00109-0
38. N., Yu., Laurenz, R., Siler, L., P. K. W. Ng., Souza, E., Lewis, J. M. (2015). Evaluation of alpha-amylase activity and falling number around maturity for soft white and soft red wheat varieties in Michigan. Cereal Research Communications, 43(4), 672–681. https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.026
39. GTA Wheat Trading Standards (2024). Grain Trade Australia. Section 2 — Wheat Trading Standards. 2022/2023 Season. Retrieved from https://www.graintrade.org.au/sites/default/files/Standards/Section%2002%20-%20Wheat%20Trading%20Standards%202022-2023.pdf Accessed July 18, 2024.
40. Home Grown Cereals Authority (2014). Guide to cereals in the UK. Retrieved from http://web.archive.org/web/20190719211510/https://cereals.ahdb.org.uk/media/658213/hgca-cereal-a5-16pp-final.pdf. Accessed July 18, 2024.
41. Маслов, А.В., Мингалеева, З.Ш., Ямашев, Т.А., Шибаева, Н.Ф. (2022). Изучение влияния комплексной растительной добавки на свойства мучных смесей и пшеничного теста. *Техника и технология пищевых производств*, 52, 3, 511–525. [Maslov, A.V., Mingaleeva, Z. Sh., Yamashev, T.A., Shibaeva, N.F. (2022). Effect of a Complex Plant Additive on Flour Mixes and Wheat Dough. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52, 3, 511–525. (In Russian)] http://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385
42. Ямашев, Т.А., Мусина, А.М., Мусина, Г.М., Салахова, А.И., Решетник, О.А. (2015). Влияние овсяного солода на реологические характеристики пшеничного теста. *Вестник Технологического университета*. 18, 23, 60–62. [Yamashev, T.A., Musina, A.M., Musina, G.M., Salahova, A.I., Reshetnik, O.A. (2015). Effect of oat malt on rheological characteristics of wheat dough. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta,* 18, 23, 60–62 (In Russian)]
43. Marchetti, L., Cardos, M., Campana, L., Ferrero, Cr. (2012). Effect of glutens of different quality on dough characteristics and breadmaking performance. *LWT — Food Science and Technology,* 46(1), 224–231. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.10.002
44. Егошина, Т. (2009). Влияние сухой пшеничной клейковины на качество булочки французской. *Студенческая наука и XXI век*, 6, 16–19. [Egoshina, T. (2009). Effect of dry wheat gluten on quality of French bread loaf. *Student Science and the XXI Century*, 6, 16–19. (In Russian)]
45. Погонец, Е. В. (2014). Влияние сухой пшеничной клейковины на качество пшенично-тритикалевого хлеба. *Техника и технология пищевых производств*, 2(33), 61–65. [Pogonec, E. V. (2014). The influence of dry wheaten gluten on quality of triticale-white bread. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2(33), 61–65. (In Russian)]
46. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., Li, Y. (2020). Individual effects of enzymes and vital wheat gluten on whole wheat dough and bread properties. *Integrated Food Science*, 85(12), 4201–4208. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15517

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Черных Валерий Яковлевич — доктор технических наук, профессор, руководитель центра реологии пищевых сред, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Б. Черкизовская, 26 А Тел: +7–499–161–04–97 E-mail: polybiotest@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3560-1901 * автор для контактов	**Valery Ya. Chernykh**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Center for Rheology of Food Media, Chief Researcher, Scientific Research Institute for the Baking Industry 26 A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia Tel: +7–499–161–04–97 E-mail: polybiotest@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3560-1901 * corresponding author
Алексеенко Елена Викторовна — доктор технических наук, профессор, заместитель директора по работе с индустриальными партнерами, Институт биотехнологии и глобального здоровья, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел: +7–499–750–01–11 E-mail: AlekseenkoEV@mgupp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6208-0999	**Elena V. Alekseenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Work with Industrial Partners, Institute of Biotechnology and Global Health, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk highway, Moscow, 125080, Russia Tel: +7–499–750–01–11 E-mail: AlekseenkoEV@mgupp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6208-0999
Сметанин Дмитрий Олегович — младший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Б. Черкизовская, 26 А Аспирант, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел: +7–499–161–04–97 E-mail: dimkapers35@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7214-5574	**Dmitry O. Smetanin**, Junior Researcher, Center for Rheology of Food Media, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26 A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia Postgraduate Student, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russia Tel: +7–499–161–04–97 E-mail: dimkapers35@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7214-5574
Балуян Хачатур Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Б. Черкизовская, 26 А Тел: +7–499–161–04–97 E-mail: Kh.baluyan@ya.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3011-8846	**Khachatur A. Baluyan**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Center for Rheology of Food Media, Scientific Research Institute of the Bakery Industry 26 A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia Tel: +7–499–161–04–97 E-mail: Kh.baluyan@ya.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3011-8846
Печникова Юлия Юрьевна — младший научный сотрудник, центр реологии пищевых сред, Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности 107553, Москва, ул. Б. Черкизовская, 26А Аспирант, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел: +7–499–161–04–97 E-mail: yu.pechnikova@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9039-7368	**Yulia Yu. Pechnikova**, Junior Researcher, Center for Rheology of Food Media, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia Postgraduate Student, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russia Tel: +7–499–161–04–97 E-mail: yu.pechnikova@gosniihp.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9039-7368
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-355-362

Поступила 18.04.2024
Поступила после рецензирования 19.07.2024
Принята в печать 24.07.2024
© Ушкалова А. А., Чжан Т., Баочэнь Л., 2024

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

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИГИДРОКВЕРЦЕТИНА В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ушкалова А. А.*, Чжан Т., Баочэнь Л.

Институт пищевых наук и инженерии, Цзилиньский университет, Чанчунь, Цзилинь, Китай

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *дигидрокверцетин, таксифолин, биофлавоноид, антиоксидант, пищевая промышленность, молочные продукты*

АННОТАЦИЯ

Данный обзор представляет собой подробный анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных учеными из разных стран, по практическому применению дигидрокверцетина в пищевых продуктах. Основное внимание уделяется антиоксидантным и функциональным свойствам биофлавоноида в составе молока и молочной продукции. На современном этапе дигидрокверцетин признан наиболее сильным природным антиоксидантом, использование которого продлевает срок хранения продуктов и оказывает благоприятное воздействие на организм человека. Несмотря на то, что с момента обнаружения дигидрокверцетина российскими учеными прошло достаточно времени, на сегодняшний день значительная часть исследований биофлавоноида сосредоточена в фармацевтической сфере, в то время как в пищевой отрасли его применение находится на начальной стадии развития. В статье систематизированы работы российских, китайских, японских, европейских, американских и других зарубежных авторов, что позволило достаточно полно описать тенденции использования дигидрокверцетина в мировой промышленности. Остановившись более подробно на влиянии антиоксиданта на свойства молочных продуктов, ученые обнаружили, что он повышает устойчивость кислотности и pH, сдерживает развитие патогенной микрофлоры, благоприятно влияет на вкус и аромат. Выявлены перспективные направления его использования, а также определены направления дальнейших исследований применения этого антиоксиданта в молочной отрасли. Сделан вывод о том, что добавление дигидрокверцетина в рецептуру позволит получить новые функциональные (парафармацевтические) продукты питания с антиоксидантной устойчивостью для профилактики социально значимых болезней и с целью улучшения состояния здоровья населения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья выполнена при поддержке плана научно-технического развития провинции Цзилинь (№ 20210401127YY; № 20230202046NC).

Received 18.04.2024
Accepted in revised 19.07.2024
Accepted for publication 24.07.2024
© Ushkalova A. A., Zhang T., Baochen L., 2024

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

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF DIHYDROQUERCETIN APPLICATION IN THE FOOD INDUSTRY

Anastasiia A. Ushkalova*, Tiehua Zhang, Ligen Baochen

College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin, China

KEY WORDS: *dihydroquercetin, taxifolin, bioflavonoid, antioxidant, food industry, dairy products*

ABSTRACT

This review is a detailed analysis of the results of the experimental studies carried out by scientists from different countries and devoted to the practical application of dihydroquercetin in food products. The main attention is paid to the antioxidant and functional properties of the bioflavonoid in the composition of milk and dairy products. Currently, dihydroquercetin is considered the most powerful natural antioxidant, which use prolongs the shelf-life of products and has a beneficial effect on the human body. Although much time has passed since dihydroquercetin discovery by Russian scientists, today a significant part of research of the bioflavonoid is focused on the pharmaceutical sphere, while its use in the food industry is at the initial stage of the development. In the article, studies carried out by Russian, Chinese, Japanese, European, American and other foreign authors are systemized, which allowed describing quite thoroughly trends in the use of dihydroquercetin in the global industry. Having focused on the influence of the antioxidant on the characteristics of dairy products, scientists found that it increases the stability of acidity and pH, inhibits the development of the pathogenic microflora, favorably affects taste and aroma. Prospect directions for its use have been revealed, and directions for further research of the use of this antioxidant in the dairy industry have been identified. It is concluded that the addition of dihydroquercetin into a recipe will allow obtaining new functional (parapharmaceutical) food products with the antioxidant stability to prevent socially significant diseases and improve the health of the population.

FUNDING: This work was supported by the Jilin Province Science and Technology Development Plan (No. 20210401127YY; No. 20230202046NC).

1. Введение

В настоящее время проблема продления срока хранения продуктов питания продолжает оставаться актуальной. Учитывая, что антиокислители синтетической природы (пропилгаллат, гидроксианизол и другие) оказывают негативное влияние на здоровье человека, проводится поиск новых природных антиоксидантов. Одновременно к ним предъявляется ряд повышенных требований, в том числе отсутствие мутагенности, низкая степень или отсутствие их влияния на цвет, вкус и консистенцию продукта, устойчивость к термической или механической обработке, безвредность, наличие биологической активности [1]. Способность снижать содержание кислорода и натуральность дигидрокверцетина, в сравнении с другими природными антиоксидантами, свидетельствуют о его высокой антиоксидантной активности, о ценных биологических свойствах, а также о приемле-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ушкалова, А. А., Чжан, Т., Баочэнь, Л.** (2024) Состояние и перспективы применения дигидрокверцетина в пищевой промышленности. *Пищевые системы*, 7(3), 355–362. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-355-362

FOR CITATION: **Ushkalova, A. A., Zhang, T., Baochen, L.** (2024). Current state and prospects of dihydroquercetin application in food industry. *Food Systems*, 7(3), 355–362. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-355-362

мой для пищевой промышленности устойчивости к процессам технологической обработки.

Дигидрокверцетин (далее ДГК) — флавоноидное соединение, получаемое преимущественно из древесины лиственницы и обладающее антиоксидантными свойствами. По молекулярному строению и функциям ДГК ($C_{15}H_{12}O_7$) близок рутину и кверцетину, однако его фармакобиологическая активность выше. Дигидрокверцетин является мощнейшим антиоксидантом с отсутствием мутагенных эффектов, эмбриотоксичности, тератогенности, аллергенности и изменчивости, что делает его абсолютно пригодным для использования в пищевой промышленности, в производстве растительных масел, животных жиров, сухого молока, жиросодержащих кондитерских изделий и других продуктов.

На протяжении более 20 лет ДГК разрешен для применения в качестве пищевой добавки в России (с 2001 г. он введен в Перечень разрешенных добавок в пищевой промышленности) [2] и во многих европейских странах, где более известен как таксифолин (с 2017 г. Евросоюз добавил этот антиоксидант в перечень разрешенных) [3]. Несмотря на известность антиоксидантных свойств данного вещества в фармацевтической промышленности, изучение применения ДГК в Китае началось лишь в последние несколько лет (ДГК введен в Перечень разрешенных пищевых добавок лишь в 2021 г.). В целом, ученые из разных стран указывают на широкие перспективы ДГК в пищевой промышленности. В связи с этим была поставлена проблема: несмотря на признанные антиоксидантные и функциональные свойства дигидрокверцетина и на наличие отдельных результатов эмпирических исследований применения в пищевых продуктах, отсутствие системного обзора привело к невозможности теоретического осмысления текущего состояния и перспектив использования дигидрокверцетина в пищевой промышленности.

Для решения проблемы ставится цель изучить текущее состояние и выявить перспективы ДГК в пищевой промышленности, особенно для улучшения свойств молочных продуктов. В связи с этим был проведен анализ научных работ, посвященных использованию ДГК в пищевой промышленности, выявлено влияние ДГК на формирование различных свойств молочных продуктов, а также определены перспективы применения и дальнейшие направления изучения ДГК в качестве антиоксиданта в пищевом производстве.

2. Объекты и методы

Объектом проведенного исследования выступают научные статьи российских, китайских и иных зарубежных авторов, посвященные изучению дигидрокверцетина и его свойств применительно к пищевой промышленности. В том числе были рассмотрены результаты экспериментов, направленных на выявление влияния ДГК как антиоксиданта на срок хранения продуктов и на их функциональные свойства.

Поиск работ проводился в российских и международных базах данных, в том числе в Elibrary, Google Scholar, Web of Science, PubMed, Scopus, CNKI. Были использованы научные работы в полнотекстовых версиях на нескольких языках, включая английский, русский, китайский.

Поиск литературы проводился на сайтах баз данных с использованием запросов «дигидрокверцетин», «таксифолин» и их английских и китайских семантических аналогов. В дальнейшем отбирались исследования в сферах пищевых технологий и химии пищи, а также в смежных научных областях. Хронологические рамки поиска изначально были ограничены периодом с 2019 по 2023 гг., однако в дальнейшем ввиду малого количества работ были расширены до более широкого периода с 1996 г. (выбор нижней границы обусловлен наличием в 1996–1997 гг. нескольких фундаментальных работ российских ученых по теме применения ДГК в составе пищевых продуктов). Для дальнейшего их анализа использовались инструменты ПО Endnote (версия 20, производитель Clarivate), что позволило систематизировать более 700 научных работ по критерию вида продукта, в котором применяется ДГК. Отдельно были изучены труды российских, китайских, европейских и японских исследователей, посвященные экспериментальному анализу функциональных свойств ДГК, что позволило достаточно полно описать возможности использования ДГК в парафармацевтических пищевых продуктах.

3. Дигидрокверцетин и его свойства

Дигидрокверцетин (таксифолин) — биофлавоноид, который с точки зрения структуры относится к классу полифенолов, имея в своем составе пять активных гидроксильных групп. ДГК содержится в комлевой части древесины лиственницы даурской, где концентрируется в пятисантиметровой зоне под корой. Также ДГК был обнаружен в коре ели Дугласа, в репчатом красном луке, в цитрусовых, в томатах и в некоторых других растениях. Однако его содержание в них значительно меньше, чем в лиственнице. Дигидрокверцетин — это порошок с горьким привкусом, цвет от белого до бело-кремового, почти нерастворим в водных растворах, имеет температуру плавления 240 °C [4].

ДГК — эталонный антиоксидант, проявляющий свою антирадикальную активность при концентрации 0,0001–0,00001%, при этом не имеющий мутагенной активности для человека. По мнению Нобелевского лауреата Л. Полинга, введение дигидрокверцетина в пищевые продукты в пределах минимальных концентраций продлит жизнь человека на 20–25 лет [5]. ДГК обладает Р-витаминной активностью, в связи с чем в организме человека катализирует многие биохимические процессы [6]. Он способен непосредственно поглощать свободные радикалы кислорода, что связано с количеством гидроксильных групп в структуре молекулы ДГК [7].

4. Применение дигидрокверцетина в пищевой промышленности

4.1. Применение дигидрокверцетина при производстве рыбы, мяса и мясных продуктов

К настоящему времени исследователями изучены возможности применения ДГК в мясной и мясоперерабатывающей промышленности при производстве разных видов мяса и рыбы, мясного фарша, мясных консервов и колбасных изделий. Взаимодействуя с животным жиром, ДГК ингибирует окисление липидов, приводя к увеличению срока годности продукта. Сравнительное эмпирическое исследование натуральных антиоксидантов показало, что ДГК наиболее эффективно предотвращает окисление жира-сырца при хранении. В образцах с ДГК в течение 12 суток наблюдалось минимальное накопление перекисей и сокращение образования продуктов вторичного окисления [8]. Обработка продукта ДГК (концентрация 1 г/л) имеет антиоксидантный эффект и позволяет увеличить сроки хранения говядины [9] и мяса птицы [10], улучшая вкусовые свойства последнего [11]. В настоящее время рассматривается возможность применения ДГК как добавки для корма свиней, что позволяет получать обогащенное ДГК мясо с лучшими функциональными и потребительскими свойствами, которое в последующем может быть использовано для получения функциональных свиных сосисок и колбас [12].

ДГК, добавленный в мясной фарш вместе с салом, продлевает срок его хранения. Для этого антиоксидант необходимо предварительно растворить в сале [13]. Ингибируя окисление липидной фракции, ДГК снижает перекисное число фарша на 58,60% [14]. В настоящее время изучена возможность применения ДГК в производстве нового функционального конского фарша с добавлением L-аскорбиновой кислоты (оптимальная концентрация ДГК 0,035%, оптимальная концентрация L-аскорбиновой кислоты 0,02%) [15].

Кроме этого, при взаимодействии с другими антиоксидантами ДГК может проявлять более высокую антиоксидантную активность. Так, смеси растворов ДГК с молочной кислотой показали синергетический антибактериальный эффект в говяжьем фарше и получили наивысшую оценку вкуса и общей приемлемости, что делает их пригодными для использования в пищевой промышленности в качестве естественного барьера для контроля роста патогенных генов и естественной микрофлоры порчи [16].

ДГК ингибирует биохимические процессы, происходящие при хранении колбасных изделий. Внесение ДГК в колбасную смесь позволяет ингибировать увеличение тирамина, который образуется в процессе брожения, при поступлении в организм вызывая мигрень и повышая уровень артериального давления [17]. ДГК успешно стабилизирует окислительные процессы в свиных колбасах холодного копчения [18], в функциональных вареных колбасах [19], не оказывает влияния на вкусовые качества колбасных изделий, на стабильность цвета и на приблизительный состав [20].

Мясные и колбасные изделия являются благоприятной средой для развития микробиологических процессов и обсеменения опасными для организма человека бактериями. С этой точки зрения, ДГК может быть использован для снижения рисков распространения опасных бактерий. Эмпирически доказано, что добавление ДГК к колбасам с молотыми специями позволяет существенно снизить риски развития опасных микроорганизмов [21].

ДГК может использоваться для продления сроков хранения рыбы и рыбных консервов. Обнаружено, что ДГК проявляет высокую ингибирующую активность по отношению к липоксигеназе, сохраняя свежесть и цвет лосося (обработка 1 г 5%-ным водным раствором этанола в 1 мкг/л) [22]. Обработка раствором ДГК (1,0 г/л(–1))

примерно в 2 раза снижает содержание свободных жирных кислот в охлажденном хранящемся лососе, что позволяет сохранить его свежесть до 11 дней хранения (при температуре хранения 1 °C) [23]. ДГК может использоваться для продления сроков хранения рыбных консервов, поскольку в сравнении с другими антиоксидантами, например, аскорбиновой кислотой и ресвератролом, он позволяет повысить устойчивость кислотного числа рыбных консервов в процессе хранения, снижая интенсивность гидролитических процессов [24].

ДГК может быть использован при разработке комбинированных мясных продуктов как антиоксидант и биологически активный компонент пищи. В настоящее время разработана технология производства мясного паштета с профилактической направленностью, состоящего из 60% конины и 40% куриной печени, с заменой 10% мясного сырья тыквой и с добавлением 25 мг ДГК на 100 г паштета. Такой паштет обогащен биофлавоноидами, Р-каротином и пищевыми волокнами [25].

4.2. Применение дигидрокверцетина при производстве хлеба, хлебобулочных и кондитерских изделий

В настоящее время рассматривается возможность использования ДГК в производстве хлеба и мучных кондитерских изделий, устойчивых к процессам окисления и к развитию плесеней.

Добавление ДГК к тесту при производстве хлеба вызывает незначительное замедление ферментативных процессов, а поэтому ДГК может использоваться с целью повышения антиоксидантных свойств хлеба [26]. Однако при производстве хлебобулочных изделий возможны потери ДГК (24–40%), преодолеть которые и повысить стабильность ДГК возможно за счет инкапсуляции в β-циклодекстрин и наноэмульсии [27]. При этом взаимодействие ДГК с другими компонентами хлеба (например, с солодовой закваской) ведет к повышению устойчивости антиоксиданта [27].

Пирожные с ДГК имеют пролонгированный срок хранения, что связано со снижением скорости окисления в 1,6 раза и гидролиза жиров в 1,2 раза [28]. Обнаружено, что оптимальная доза внесения ДГК в мучное кондитерское изделие составляет 0,3% от массы жира [29].

При добавлении ДГК в мучной полуфабрикат торта «Медовик» (0,050% и 0,075% от массы сырья) происходит существенное торможение окисления (на 30-й день перекисное число на 17,6% ниже, чем в образце без ДГК). Более того, ДГК также позволяет сохранить ценные свойства экстракта из ягод черноплодной рябины, используемого для обогащения данного торта [30].

4.3. Применение дигидрокверцетина в производстве напитков

В настоящее время учеными рассматривается возможность использования ДГК в производстве алкогольных и безалкогольных напитков. При этом с учетом хорошей растворимости ДГК в водно-спиртовых растворах наиболее широко изучены возможности его использования при производстве алкогольных напитков.

При производстве ликеро-водочных изделий — настоек, в том числе на женьшене, калине и клюкве, ДГК вносится в мезгу с водно-спиртовой жидкостью, позволяя увеличивать показатели антиоксидантной активности и общего содержания фенольных соединений, улучшать органолептические показатели конечного продукта, придавая мягкость вкусу [31]. Более того, добавление ДГК позволяет получать алкогольные напитки с гепатопротекторными свойствами [32].

При внесении ДГК в напиток брожения с виноградным растительным компонентом может быть получен функциональный продукт, используемый для профилактического питания людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями [33]. В течение 130 суток в квасе с ДГК не происходит изменений в содержании сухих веществ, титруемой кислоты и вкуса, лишь после 140 суток проявляется посторонний несвойственный привкус [34].

Изучено взаимодействие ДГК с другими компонентами обогащенных напитков. В безалкогольных напитках ДГК позволяет повысить устойчивость к хранению витамина С [35]. Обнаружено, что взаимодействие ДГК с аскорбиновой кислотой положительно влияет на длительность срока годности напитка [36]. Наличие ДГК в напитке ведет к повышению устойчивости аминокислот и общих фенольных соединений [37].

4.4. Применение дигидрокверцетина в производстве молочных продуктов

Молочные продукты представляют собой водно-жировую эмульсию (молоко, сливки, йогурт и другие жидкие продукты), а также эмульсию типа масла в воде (сыр высокой жирности, сливочное масло), в которой жировой компонент имеет животное происхождение. Учитывая благоприятное влияние ДГК на липиды животных жиров, перспективы использования антиоксиданта в молочной промышленности не вызывают сомнений. При добавлении ДГК в молочные продукты в количестве 0,02% от массы жира скорость процесса окисления и соответствующее накопление токсичных веществ в организме человека снижаются. Таким образом, повышается стабильность молочных продуктов при хранении, что позволяет продлить срок годности молока (сухого молока, питьевого молока, сырого молока), сливок, сыра, йогурта, плавленого сыра, мороженого и сметаны в 2–4 раза [38].

Применение ДГК позволяет продлить срок хранения сливочного масла и сыра, ингибируя окислительные процессы в жировом компоненте продукта. Эмпирические исследования показали, что количество добавляемого ДГК (50, 100, 150 и 200 мг/100 г) к сливочному маслу положительно влияет на срок хранения, увеличивая его в 1,5–3 раза [39]. В сравнении с другими природными биофлавоноидами, ДГК демонстрирует наиболее сильную антиоксидантную способность [40].

Учитывая, что среди молочных продуктов сыры характеризуются высоким содержанием жира, применение ДГК для продления сроков их хранения обладает определенными перспективами. Было экспериментально установлено, что ДГК обладает более эффективной антиоксидантной активностью, увеличивая срок хранения сыра с 30–60 до 60–120 дней [41]. ДГК может ингибировать процесс окисления жира плавленого сыра и обладает устойчивостью к температуре, растворимостью, отсутствием цвета [42]. Добавление ДГК к ингредиентам плавленого сыра способствовало снижению массовой доли и числа окисляющих веществ в 2,8 раза [43].

При производстве сыра с добавлением ДГК важно учитывать технологические особенности и момент внесения вещества в сырную смесь. В процессе производства свежего сыра использование метода разделения для добавления ДГК к ингредиентам топленого масла может продлить срок хранения свежего сыра с 5 до 10 дней, независимо от массовой доли жира (5 или 18%). В то же время ДГК не вызывает увеличения количества молочнокислых микроорганизмов в свежем сыре, но подавляет повышение титруемой кислотности [44].

Добавление ДГК в сухое молоко может продлить срок хранения до 24 месяцев [45]. Кроме этого, ДГК может быть использован в производстве молочных консервов, оказывая ингибирующее действие на процесс свободно-радикального окисления липидов [46].

ДГК ведет к продлению срока хранения йогурта до 60 дней [45]. При производстве сметаны 10% или 20% жирности ДГК увеличивает срок ее хранения в 1,9–2,3 раза [44]. После ферментации ДГК не повлияет на количество молочнокислых микроорганизмов, но может продлить срок хранения сметаны с 14 до 26 дней [44], сохраняя ее органолептические показатели [38]. При этом изменение вносимой в продукт дозы ДГК не оказывает существенного влияния на увеличение его стойкости к процессам, происходящим при хранении [47].

ДГК может использоваться для продления срока годности напитков на основе молочной сыворотки. Внесение ДГК не оказывает влияния на органолептические и структурные свойства конечного продукта, на консистенцию и на цвет [48].

В настоящее время количество ДГК, которое может быть внесено в молочные продукты, нормативно установлено. Однако ученые все же рассматривают возможность его увеличения, преследуя цель повышения биологической ценности продукта и еще большего увеличения срока его хранения. Добавление ДГК в молочные продукты в количестве 0,02% от массы жира эффективно ингибирует перекисное окисление липидов [49]. В то же время наращивать его объем до объема, превышающего установленную норму, неэффективно и экономически нецелесообразно. Экспериментально подтверждено, что изменение массовой доли ДГК с 200 мг/кг жира до 400 мг/кг жира не привело к существенной разнице в сроках хранения молочных продуктов [50].

4.5. Применение дигидрокверцетина в производстве иных продуктов питания

ДГК также может быть использован для улучшения потребительских свойств овощей и орехов. Так, при обработке ДГК капустного овоща пак-чой происходит снижение скорости деградации хлорофилла и окисления липидов, что в целом ведет к улучшению питательных веществ [51]. Поверхностная обработка ядер грецкого ореха раствором ДГК ведет к торможению окисления, увеличивая сроки хранения в 1,5 раза [52]. Это указывает на то, что ДГК вполне способен ингибировать окисление в жире как животного происхождения, так и растительного, однако в отношении первого ДГК демонстрирует более высокую антиоксидантную активность [53].

В результате была составлена таблица о возможностях применения дигидрокверцетина в пищевой промышленности (Таблица 1).

Таблица 1. **Использование дигидрокверцетина в пищевой промышленности**
Table 1. **Application of dihydroquercetin in the food industry**

Наименование продукта	Количество вносимого дигидрокверцетина	Влияние на свойства конечного продукта	Ссылка
Говядина, мясо птицы	1 г/л (обработка поверхности)	Увеличение сроков хранения, улучшение вкусовых свойств	[8–10]
Жир-сырец	200 мг / кг	Сокращение образования продуктов вторичного окисления	[7]
Мясной фарш	массовая доля 0,001%	Препятствует росту патогенной микрофлоры, в сочетании с другими антиоксидантами демонстрирует более высокий антиоксидантный эффект	[12–15]
Колбасные изделия	250 мг/кг	Ингибирует биохимические процессы, продлевает срок хранения, стабилизируя окислительные процессы, снижает риски развития опасных бактерий	[16–20]
Свежая рыба	1 г/л (обработка поверхности)	Снижение содержания жирных кислот, продление срока хранения	[22]
Рыбные консервы	н/а	Повышение устойчивости кислотного числа, снижение интенсивности гидролитических процессов	[23]
Хлеб	н/а	Повышение антиоксидантных свойств	[25]
Пирожные	0,3% от массы жира	Снижение скорости окисления и гидролиза жиров	[27–28]
Торт	0,025%	Снижение перекисного числа	[29]
Ликеро-водочные изделия	0,01%–0,02%	Повышение антиоксидантной активности, придание мягкого вкуса	[30–31]
Напиток брожения	2,0 мг/дм3	Устойчивость кислотности и вкуса при хранении	[32–33]
Безалкогольные напитки	1,0 мг/дм3	Повышение устойчивости аминокислот и общих фенольных соединений, увеличение срока годности напитка	[34–36]
Сливочное масло	50, 100, 150 и 200 мг/100 г	Увеличение срока хранения	[38–39]
Сыр	0,02% от массы жира	Снижение перекисного и кислотного числа, повышение антиоксидантной активности	[40–43]
Сухое молоко	0,005%	Продление срока хранения	[44]
Молочные консервы	н/а	Ингибирует процесс свободно-радикального окисления липидов	[45]
Йогурт	0,025%	Продление срока хранения	[39], [44]
Сметана	0,02%	Повышает устойчивость органолептических показателей, увеличивает срок годности	[37], [43], [46]
Напитки на основе сыворотки	0,02%	Продление срока годности	[47]
Овощи (пак-чой)	н/а	Задерживает деградацию хлорофилла, приводит к снижению окисления липидов мембран	[50]
Грецкий орех	1 г/л (обработка поверхности)	Снижение скорости окислительных процессов	[51]

5. Особенности использования дигидрокверцетина в производстве молока и молочных продуктов

Одно из первых исследований, посвященных влиянию ДГК на некоторые молочные продукты, было проведено еще в 1962 г. на базе Университета штата Орегон (США). В нем отмечено, что хорошая растворимость ДГК в теплой воде (5 мг%) делает его особенно пригодным для включения в жидкое молоко и молочные продукты, позволяя снизить самоокисление и повысить их устойчивость к хранению. В настоящее время обнаружено, что внесение ДГК в молоко и молочные продукты оказывает влияние на химические, микробиологические и органолептические свойства.

5.1. Влияние дигидрокверцетина на физико-химические свойства молочных продуктов

В настоящее время доказано, что ДГК не оказывает существенного влияния на физические свойства молочных продуктов, поскольку добавляемая к молочным продуктам доза ДГК крайне мала. В связи с этим конечный продукт с добавлением ДГК не существенно отличается от продукта по показателям плотности. В то же время отмечено, что низкое содержание полисахаридов (4,1%–4,3%) в ДГК обусловило отсутствие у него структурообразующих свойств [40].

С точки зрения влияния ДГК на химические свойства, стоит отметить, что добавление антиоксиданта оказывает ингибирующее влияние на происходящие в молочных продуктах окислительные процессы. Учитывая, что в процессе окисления происходит кислотообразование, сопровождаемое повышением pH и общей кислотности, добавление ДГК ведет к сдерживанию колебаний этих показателей в пределах срока годности продукта [54].

Внесение ДГК оказывает влияние на жирнокислотный состав молочного продукта. При этом растворимость ДГК может зависеть от состава и от содержания жирных кислот. Сравнение жирнокислотного состава молочных продуктов с добавлением ДГК позволило обнаружить, что в начале и в конце срока годности наблюдается незначительное его изменение [40]. Также доказано, что эффективность антиоксидантной способности ДГК в значительной степени зависит от состава и от содержания жирных кислот продукта [55]. Следовательно, эффективность растворения и антиоксидантные свойства ДГК в молочных продуктах зависят от особенностей жировой фазы в них.

5.2. Влияние дигидрокверцетина на микробиологические свойства молочных продуктов

Молочные продукты — благоприятная среда для развития микроорганизмов, полезных для человека (например, молочнокислые микроорганизмы с пробиотическими функциями) или опасных (*B. cereus*, *S. Aureus* и *L. monocytogenes* и другие). Добавление ДГК в молочные продукты ведет к улучшению процессов развития полезных бактерий и к одновременному противодействию развития опасных микроорганизмов.

Эмпирически установлена связь между добавлением ДГК в молочные продукты и активностью молочнокислых бактерий. Влияние ДГК на активность молочных продуктов с *B. bulgaricus*, *S. thermophilus* и смесью бактерий выражается в снижении скорости кислотообразования и в повышении стабильности числа живых микроорганизмов [56]. Добавление ДГК в процессе ферментации может увеличить количество молочнокислых микроорганизмов со 10^8 до 10^9 и обеспечить продление срока годности (с 14 до 32 дней) без изменения органолептических показателей [44]. В отношении других продуктов, таких как сыр, в которых используются иные закваски, ДГК не оказывает негативного влияния на динамику развития микроорганизмов [41]. Экспериментально доказано, что добавление ДГК значительно подавляет пролиферацию микробов в молоке, снижая тем самым общее количество колоний в молоке и сокращая потребление лактозы, в результате чего в нем наблюдается более низкая кислотность и высокое содержание лактозы [57].

ДГК оказывает благоприятное влияние на микроорганизмы кисломолочных продуктов и подавляет развитие опасной микрофлоры. Взаимодействуя с молочной кислотой, ДГК демонстрирует наилучший антибактериальный эффект в отношении кишечной палочки [58]. При этом ДГК обладает антибактериальной активностью в отношении как грамположительных (*B. cereus*, *S. Aureus* и *L. monocytogenes*), так и грамотрицательных (*E. coli O157: H7* и *Y. enterocolitica*) бактерий, проникая через их эффективный клеточный барьер [59]. Путем повреждения стенки и целостности мембраны ДГК предотвращает

развитие *E. coli* и *S. Aureus* [57,60]. Средняя гибель клеток патогенной микрофлоры составляет от 11,8% (*E. coli*) до 91% (*S. Aureus*) [61]. ДГК проявляет высокую антимикробную активность при минимальных ингибирующих концентрациях 625 мкг/мл (*P. acnes*), 2500 мкг/мл (*S. aureus*), при этом обнаружено, что ацетилированные формы ДГК имеют более мощную антиоксидантную активность [62].

5.3. Влияние дигидрокверцетина на органолептические свойства молочных продуктов

Количество добавляемого в молочный продукт ДГК должно быть оптимальным, чтобы избежать рисков изменения органолептических показателей. Добавление ДГК в количестве 0,02% к массовой доле жира позволяет получить продукты с наиболее близкими сенсорными свойствами, сохраняя антиоксидантные свойства ДГК и увеличивая срок годности молочного продукта в 2–2,5 раза [42]. В то же время некоторые исследования показывают, что добавление ДГК приводит к улучшению органолептических свойств продуктов. Так, молочные продукты, содержащие ДГК, обладают выраженным сливочным вкусом, без горечи, постороннего запаха, изменения цвета [54].

Достаточно спорным остается вопрос о влиянии ДГК на консистенцию молочного продукта. Проведенное исследование органолептических свойств молочных продуктов с добавлением ДГК позволило обнаружить наличие порошкообразной консистенции [54]. Вполне вероятно, что ощущение отсутствия однородности консистенции обусловлено плохой растворимостью используемого порошка ДГК.

Органические свойства молочных продуктов с добавлением ДГК лишь являются внешним выражением физико-химических и микробиологических процессов, происходящих в продукте. Учитывая высокую активность ДГК в отношении химических и микробиологических свойств продукта, следует полагать, что сдерживание кислотообразования способно благоприятно влиять на вкус продуктов, в которых кислый вкус выступает показателем порчи продукта. Однако для кисломолочных продуктов, где образование молочной кислоты играет важную роль в формировании органолептических свойств продукта, способность сдерживания процесса кислотообразования ДГК будет препятствовать формированию нужного вкуса продукта.

6. Перспективы применения дигидрокверцетина в производстве молочных продуктов питания

Учитывая антиоксидантные, антимикробные, антиплесневые, а также биологические свойства ДГК, можно полагать, что его использование открывает новые перспективы для пищевой промышленности.

Прежде всего, внесение ДГК в продукты позволит продлить срок их хранения и улучшить функциональные свойства. В настоящее время известно, что ДГК оказывает широкий спектр действия на человеческий организм, фактически способствуя профилактике и лечению от многих заболеваний (Рисунок 1). ДГК оказывает положительное влияние на нервную систему человека. Лабораторные исследования показали, что дигидрокверцетин ведет к улучшению симптомов паркинсонизма у крыс и обладает определенным нейротерапевтическим потенциалом [63]. Он также может вызывать обезболивающий эффект [64]. ДГК оказывает благоприятное влияние на кардиосистему и сосуды [65], улучшает работу сердца [66]. ДГК способствует лечению артериальной гипертензии, а также обладает противовирусными свойствами [67], может использоваться при лечении повреждений легких, вызванных сепсисом [68]. ДГК также может применяться при лечении заболеваний почек [69]. Применение ДГК ослабляло многочисленные маркеры окислительного стресса,

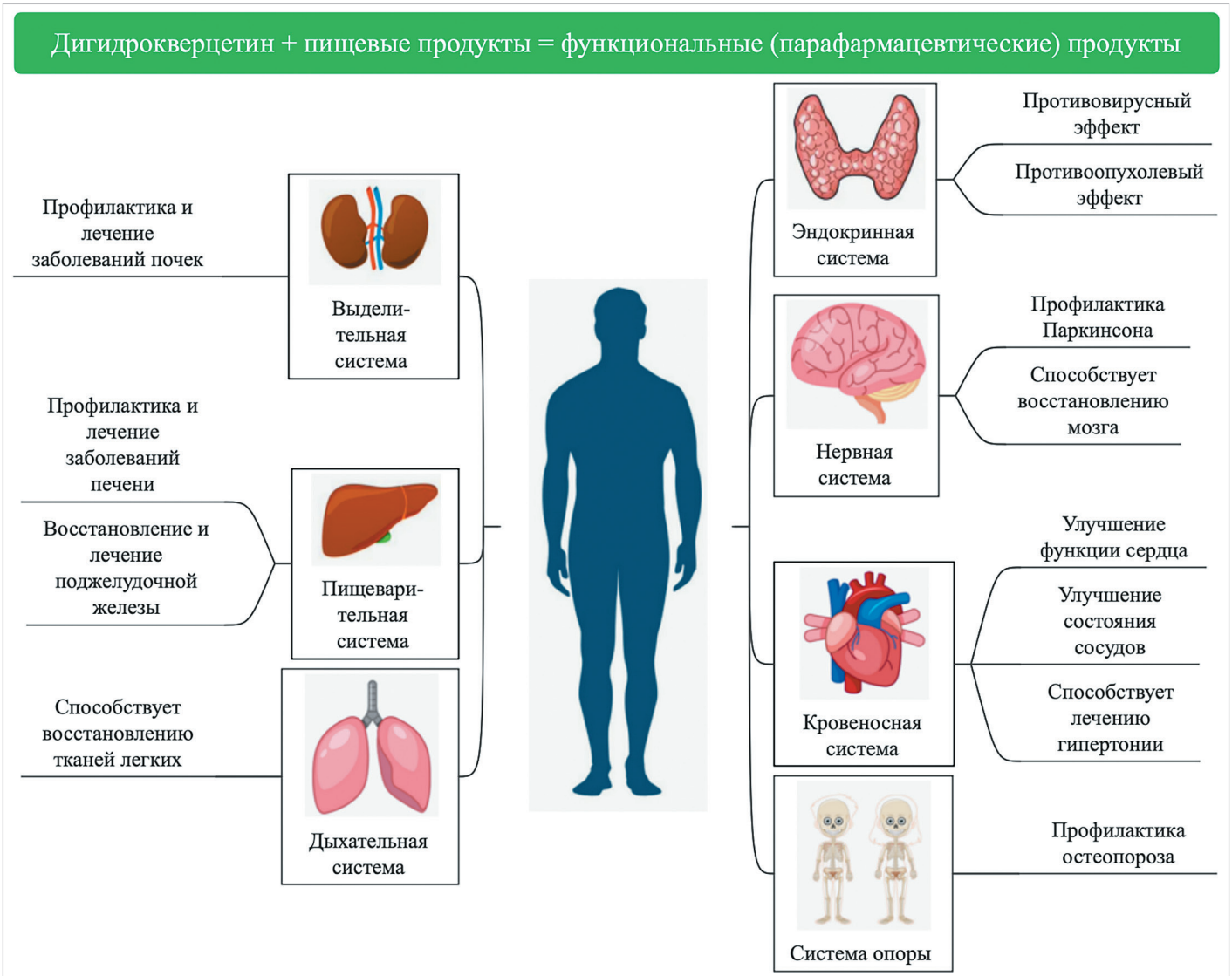


Рисунок 1. **Функциональные свойства ДГК в пищевых продуктах (авторский рисунок)**
Figure 1. **Functional properties of dihydroquercetin in foods (authors' figure)**

воспаления и апоптоза в печени мышей, которым вводили гепатотоксичный циклофосфамид, поэтому ДГК в перспективе может быть использован для профилактики заболеваний печени [70]. Также он восстанавливает функцию поджелудочной железы и может применяться для лечения панкреатита [71]. Было обнаружено положительное влияние ДГК на кости, что делает возможным его использование в лечении и профилактике остеопороза [72]. ДГК также обладает противоопухолевым эффектом, что делает его перспективным компонентом диеты в борьбе против рака [59]. В результате клинических исследований, проведенных японскими учеными, было обнаружено, что потребление ДГК положительно влияет на мозговую активность здоровых молодых людей, снижает их усталость [73]. Все перечисленное выше определяет перспективы использования ДГК в производстве парафармацевтических продуктов питания.

В то же время остаются нерешенными технологические вопросы применения ДГК, а также возможное его взаимодействие с другими компонентами пищи с образованием новых веществ.

Термическая обработка продуктов способна оказывать влияние на биологические свойства ДГК. Кроме этого, важно учитывать, что при высокой температурной обработке снижается антиоксидантная функция ДГК [29]. Поэтому дальнейшие исследования должны быть посвящены изучению технологических особенностей внесения ДГК в молочные продукты.

Недостаточно изучен вопрос о взаимодействии ДГК с другими компонентами пищевых систем. Известно, что ДГК может быть объединен с лецитином или циклодекстрином с лучшими физическими и химическими свойствами, что позволило бы повысить эффективность применения в пищевой промышленности [74].

ДГК также рассматривается как кормовая добавка для животных, внесение которой позволит получить мясо, предварительно обогащенное ДГК [12]. Учитывая данный аспект, для исследователей молочной промышленности рекомендовано более подробно изучить вопрос о добавлении ДГК в пищевой рацион коров и исследовать возможность получения коровьего молока с антиоксидантными и антимикробными свойствами.

Внесение ДГК в пищевые продукты имеет и негативные последствия. Так, внесение излишнего количества ДГК придает напиткам терпко-сладкий, несвойственный вкус [34]. ДГК способен оказать негативное влияние на консистенцию продукта. Известно, что в чистом виде ДГК трудно растворим в воде. Однако интенсивное перемешивание и предварительная механоактивация порошка ДГК позволяет увеличить растворимость [75]. Наблюдаются различия между растворением ДГК в дистиллированной и дегазованной воде: так, в случае первой получается раствор повышенной кислотности, а при растворении во второй — слабокислый раствор [76]. При этом сейчас создаются более растворимые формы дигидрокверцетина, как например, «Лавитол», полученный за счет смеси дигидрокверцетина с арабиногалактаном, что позволяет улучшить технологические свойства ДГК как пищевой добавки.

7. Выводы

ДГК имеет высокий потенциал развития в производстве продуктов питания, в том числе молочных. Благодаря своей уникальной антиоксидантной активности и биологической активности, ДГК может повысить качество продуктов. Он воздействует на разные системы организма человека и может быть использован для профилактики ряда заболеваний, поэтому добавление ДГК позволить получить парафармацевтические молочные продукты. Кроме этого, положительное влияние ДГК на микробиологические показатели и на безопасность молочных продуктов определяет широкие перспективы его использования в производстве йогурта, сыров и других продуктов. Проведенный обзор текущих результатов исследования применения ДГК в пищевой промышленности, полученных европейскими, российскими и китайскими авторами, показал, что дальнейшие перспективы изучения ДГК связаны с несколькими направлениями. Во-первых, необходимо изучить взаимодействие ДГК с другими компонентами пищи. Во-вторых, важно исследовать влияние температуры и других технологических факторов на ДГК. В-третьих, нужно изучить влияние этого антиоксиданта на физико-химические и органолептические свойства различных продуктов при различных его концентрациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. 马丽霞, 莫卓华, 何少峰. (2023). 天然抗氧化剂在饮料食品中的应用分析. *现 品*, 29(18), 115–117. [Ma, L., Mo, Z., He, S. (2023). Analysis of the application of natural antioxidants in beverages and foods. *Modern Food,* 29(18), 115–117. (In Chinese)] https://doi.org/10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2023.18.035
2. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 N36 (ред. от 06.07.2011) «О введении в действие Санитарных правил» (вместе с «СанПиН 2.3.2.1078–01. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001) Электронный ресурс: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5214/51423b5b59f78cc74fb83a4d12ebfa2c89476959/?ysclid=lymjxjkbf3146952508. Дата доступа: 14.07.2024. [Resolution of the Chief State Sanitary Inspector of the RF No 36 of 14.11.2001 (edition of 06.07.2011) “On the enforcement of the sanitary rules” (together with “SanPiN2.3.2.1078–01. 2.3.2. Food raw materials and food products. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. Sanitary-and-epidemiologic rules and norms”, approved by the Chief State Sanitary Inspector of the RF 06.11.2001). Retrieved from https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5214/51423b5b59f78cc74fb83a4d12ebfa2c89476959/?ysclid=lymjxjkbf3146952508. Accessed July 14, 2024. (In Russian)]
3. EUR-Lex (2017). Commission Implementing Decision (EU) 2017/2079 of 10 November 2017 authorising the placing on the market of taxifolin-rich extract as a novel food ingredient under Regulation (EC) No 258/97 of the European Parliament and of the Council (notified under document C (2017) 7418). Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32017D2079 Accessed July 14, 2024.
4. 董潞娜, 曹浩, 张欣宇, & 王海胜. (2020). 二氢槲皮素的研究进展. *生物技术进展*, 10(03), 226–233. [Dong, L., Cao, H., Zhang, X., Wang, H. (2020). Research progress on dihydroquercetin. *Progress in Biotechnology,* 10(03), 226–233. (In Chinese)] https://doi.org/10.19586/j.2095-2341.2020.0008
5. Решетник, Е. И., Максимюк, В. А., Уточкина, Е. А. (2013). Научное обоснование технологии ферментированных молочных продуктов на основе биотехнологических систем. Благовещенск: ДальГАУ, 2013. [Reshetnik, E. I., Maksimyuk, V. A., Utochkina, E. A. (2013). Scientific substantiation of the technology of fermented dairy products on the basis of biotechnological systems. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University, 2013. (In Russian)]
6. 张宏伟, 李鹏. (2016). 二氢槲皮素的研究进展及展望. *化工管理*, 17, 43–45. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=S8jPpdFxNHipf85pQ4fNmstPNTVKKvfhFiwKZBii7O3gg46hn-24SKKFPnQV_UpEqrZgKPzKBbQVWFWlhP—UlWtfFnVxqOo9–5Zedxf-qiFBqt_JViP5L_g6YUtXQc4YjZvhUpmS2ntj7eCa_PnKQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS [Zhang, H., Li, P. (2016). Research progress and prospects of dihydroquercetin. *Chemical Management*, 17, 43–45. (In Chinese)]
7. 王梦雨, 万凡, 伊宝, & 张宏福. (2021). 二氢槲皮素的生物学功能及其在畜禽生产中的应用进展. *动物营养学报*, 33(11), 6057–6068. [Wang, M., Wan, F., Yi, B., Zhang, H. (2021). Biological functions of dihydroquercetin and its application progress in livestock and poultry production. *Journal of Animal Nutrition*, 33(11), 6057–6068. (In Chinese)]
8. Насонова, В. В., Туниева, Е. К. (2019). Сравнительные исследования эффективности антиокислителей. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 9(3), 563–569. [Nasonova, V. V., Tunieva, E. K. (2019). Comparative studies in the effectiveness of antioxidants. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 9(3), 563–569. (In Russian)] https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-563-569
9. Ivanov, G. Y., Staykov, A. S., Balev, D. K., Dragoev, S. G., Filizov, E. H., Vassilev, K. P. et al. (2010). Effect of treatment with natural antioxidant on the chilled beef lipid oxidation. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2(4), 213–218.
10. Bakalivanova, T., Kaloyanov, N. (2012). Effect of taxifolin, rosemary and synthetic antioxidants treatment on the poultry meat lipid peroxidation. *Comptes Rendus de l’Acad´emie Bulgare des Sciences*, 65(2), 161–168.
11. Kuzmina, N. N., Petrov, O. Y., Savinkova, E. A. (13–14 November, 2019). *Influence of natural antioxidants on quality indicators of semi-finished products from meat of broilers*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2nd International Scientific Conference «AGRITECH-II-2019: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies», Krasnoyarsk, Russia. https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/2/022074
12. Vlahova-Vangelova, D. B., Balev, D. K., Dragoev, S. G., Dinkova, R. H. (2020). Reduction of nitrites addition in cooked sausages from phytonutrient supplemented pork. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 12(4), 60–68. https://doi.org/10.34302/crpjfst/2020.12.4.7
13. 李杨, 唐志国, 刘丽美, 马丽媛, 刘东琦. (2021). 二氢槲皮素对添加甘油解猪油肉饼抗氧化. *食品工业*, 6, 264–268. [Li, Y., Tang, Z., Liu, L., Ma, L., Liu, D. (2021). Antioxidant effect of dihydroquercetin on lard meat patties added with glycerol. *Food Industry,* 6, 264–268. (In Chinese)]
14. Semenova, A. A., Nasonova, V. V., Kuznetsova, T. G., Tunieva, E. K., Bogolyubova, N. V., Nekrasov, R. V. (2020). Program chair poster pick: A study on the effect of dihydroquercetin added into a diet of growing pigs on meat quality. *Journal of Animal Science*, 98 (Suppl 4), 364–364. https://doi.org/10.1093/jas/skaa278.639
15. Abilmazhinova, N., Vlahova-Vangelova, D., Dragoev, S., Abzhanova, S., Balev, D. (2020). Optimization of the oxidative stability of horse minced meat enriched with dihydroquercetin and vitamin c as a new functional food. *Comptes Rendus de l’Acade'mie Bulgare des Sciences*, 73(7), 1033–1040. https://doi.org/10.7546/crabs.2020.07.18
16. Rokaityte, A., Zaborskiene, G., Macioniene, I., Rokaitis, I., Sekmokiene, D. (2016). Combined effect of lactic acid, bioactive components and modified atmosphere packaging on the quality of minced meat. *Czech Journal of Food Sciences*, 34(1), 52–60. https://doi.org/10.17221/291/2015-cjfs

17. Rokaityte, A., Zaborskiene, G., Gustiene, S., Raudonis, R., Janulis, V., Garmiene, G. et al. (2019). Effect of taxifolin on physicochemical and microbiological parameters of dry-cured pork sausage. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(5), 366–373. https://doi.org/10.17221/57/2018-cjfs
18. Gustiene, S., Zaborskiene, G., Rokaityte, A., Riešute, R. (2019). Effect of biofermentation with taxifolin on physicochemical and microbiological properties of cold-smoked pork sausages. *Food Technology and Biotechnology*, 57(4), 481–489. https://doi.org/10.17113/ftb.57.04.19.6250
19. Kolev, N., Vlahova-Vangelova, D., Balev, D., Dragoev, S. (2022). Effect of three-component antioxidant blend on oxidative stability and nitrite reduction of cooked sausages. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 21(2), 205–212. https://doi.org/10.17306/j.Afs.2022.1052
20. Balev, D. K., Nenov, N. S., Dragoev, S. G., Vassilev, K. P., Vlahova-Vangelova, D. B., Baytukenova, S. B. et al. (2017). Comparison of the effect of new spice freon extracts towards ground spices and antioxidants for improving the quality of bulgarian-type dry-cured sausage. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 67(1), 59–66. https://doi.org/10.1515/pjfns-2016-0021
21. Dragoev, S. G., Balev, D. K., Nenov, N. S., Vassilev, K. P., Vlahova-Vangelova, D. B. (2016). Antioxidant capacity of essential oil spice extracts versus ground spices and addition of antioxidants in Bulgarian type dry-fermented sausages. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 118(10), 1450–1462. https://doi.org/10.1002/ejlt.201500445
22. Balev, D., Ivanov, G., Nikolov, H., Dragoev, S. (2009). Effect of pretreatment with natural antioxidants on the colour surface properties of chilled-stored salmon discs. *Bulgarian Journal of Agricultural Science,* 15(5), 379–385.
23. Dragoev, S. G., Balev, D. K., Ivanov, G. Y., Nikolova-Damyanova, B. M., Grozdeva, T. G., Filizov, E. H. et al. (2014). Effect of superficial treatment with new natural antioxidant on salmon (Salmo salar) lipid oxidation. *Acta Alimentaria*, 43(1), 1–8. https://doi.org/10.1556/AAlim.43.2014.1.1
24. Семенова, Е. А., Сидоренко, Ю. И., Громова, В. А., Гурьева, К. Б., Антропова, Л. Е. (2014). Применение антиоксидантов для увеличения сроков годности рыбных консервов. *Пищевая промышленность*, 8, 36–39. [Semenova, E. A., Sidorenko, Yu. I., Gromova, V. A., Guryeva, K. B., Antropova, L. E. (2014). Use of antioxidants to increase the shelf life of canned fish. *Food Industry*, 8, 36–39. (In Russian)]
25. Вершинина, А. Г., Каленик, Т.К., Самченко, О. Н. (2012). Разработка мясорастительных паштетов для здорового питания. *Техника и технология пищевых производств*, 1(24), 120–124. [Vershinina, A. G., Kalenik, T. K., Samchenko, O. N. (2012). The development of meat and plant based pate (paste) technology for healthy diet. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1(24), 120–124. (In Russian)]
26. Kalinina, I., Fatkullin, R., Naumenko, N., Popova, N., Stepanova, D. (2023). The influence of flavonoid dihydroquercetin on the enzymatic processes of dough ripening and the antioxidant properties of bread. *Fermentation,* 9(3), Article 263. https://doi.org/10.3390/fermentation9030263
27. Калинина, И. В., Фаткуллин, Р. И., Иванова, Д., Кондратьева, Л. В. (2019). Определение стабильности пищевых ингредиентов на основе дигидрокверцетина в процессе производства хлебобулочных изделий. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 7(2), 35–43. [Kalinina, I. V., Fatkullin, R. I., Ivanova, D., Kondratyeva, L. V., (2019). Evaluating stability of food ingredients with dihydroquercetin in bakery production. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 7(2), 35–43. (In Russian)] https://doi.org/10.14529/food190204
28. Наумова, Н. Л., Чаплинский, В. В., Ромашкевич, О. А. (2014). К вопросу о разработке крошковых пирожных с антиоксидантными свойствами. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 7(117), 160–164. [Naumova, N. L., Chaplinsky, V. V., Romashkevich, O. A. (2014). Development of crumble cakes with antioxidant properties. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 7(117), 160–164. (In Russian)]
29. Татарникова, Е. А., Куприна, О. В., Остроухова, Л. А. (2013). Функциональные мучные кондитерские изделия с дигидрокверцетином. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 1(4), 46–50. [Tatarnikova, E. A., Kuprina, O. V., Ostroukhova, L. A. (2013). Functional confectionery and pastry with dihydroquercetin. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 1(4), 46–50. (In Russian)]
30. Osipenko, E. Y., Denisovich, Y. Y., Gavrilova, G. A., Vodolagina, E. Y. (2019). The use of bioactive components of plant raw materials from the far eastern region for flour confectionery production. *AIMS Agriculture and Food*, 4(1), 73–87. https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.1.73
31. Поляков, В. А., Абрамова, И. М., Воробьева, Е. В., Галлямова, Л. П., Головачева, Н. Е. (2017). Антиоксиданты и их применение в ликероводочной промышленности. *Пищевая промышленность*, 12, 12–16. [Polyakov, V. A., Abramova, I. M., Vorobyova, E. V., Gallyamova, L. P., Golovacheva, N. E. (2017). Antioxidants and their application in the alcoholic beverage industry. *Food Industry*, 12, 12–16. (In Russian)]
32. Абрамова, И. М., Калинина, А. Г., Головачева, Н. Е., Морозова, С. С., Галлямова, Л. П., Гнеушева, С. Л. и др. (2019). Исследование влияния дигидрокверцетина на алкогольную интоксикацию спиртных напитков. *Пищевая промышленность*, 6, 58–61. [Abramova, I. M., Kalinina, A. G., Golovacheva, N. E., Morozova, S. S., Gallyamova, L. P., Gneusheva, S. L. et al. (2019). The study of the effect of dihydroquercetin on alcoholic intoxication of alcoholic beverages. *Food Industry*, 6, 58–61. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10090
33. Бибик, И. В., Бабий, Н. В., Пеков, Д. Б., Помозова, В. А., Киселева, Т. Ф. (2009). Специальные продукты питания с использованием растительных антиоксидантов. *Пищевая промышленность*, 10, 32–33. [Bibik, I. V., Babij, N. V., Pekov, D. B., Pomozova, V. A., Kiseleva, T. F. (2009). Special food stuffs with use of vegetable antioxidants. *Food Industry*, 10, 32–33. (In Russian)]
34. Бибик, И. В., Лоскутова, Е. В. (2014). Научное обоснование количества внесения дигидрокверцетина при разработке технологии кваса «Виноградный». *Техника и технология пищевых производств*, 1(32), 5–10. [Bibik, I. V., Loskutova, E. V. (2014). Scientific basis for the quantity of dihydroquercetin used in the development of "Grape" kvass technology. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1(32), 5–10. (In Russian)]
35. Бабий, Н. В., Соловьева, Е. Н., Помозова, В. А., Киселева, Т. Ф. (2013). Тонизирующие напитки с функциональными свойствами. *Техника и технология пищевых производств*, 3(30), 101–105. [Babiy, N. V., Solovyova, E. N., Pomozova, V. A., Kiseleva, T. F. (2013). Tonics with functional properties. *Food Processing: Techniques and Technology*, 3(30), 101–105. (In Russian)]
36. Гернет, М. В., Грибкова, И. Н., Кобелев, К. В. (2019). Биотехнологические аспекты получения напитков брожения на растительном сырье с повышенным сроком хранения. *Пищевая промышленность*, 4, 33–34. [Gernet, M. V., Gribkova, I. N., Kobelev, K. V. (2019). Biotechnological aspects of obtaining fermentation beverages on vegetable raw materials with increased shelf life. *Food Industry*, 4, 33–34. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10015
37. Ковалева, И. Л., Соболева, О. А. (2019). Напитки биокорригирующего действия в рационе профилактического оздоровительного питания. *Пищевая промышленность*, 2, 23–25. [Kovaleva, I. L., Soboleva, O. A. (2019). Beverages biocorrective action in the diet of preventive health food. *Food Industry,* 2, 23–25. (In Russian)]
38. Погосян, Д. Г. (2014). Молочные продукты с пролонгированным сроком годности. *Молочная промышленность*, 3, 60–61. [Poghosyan, D. G. (2014). Milk products with extended shelf life. *Dairy Industry*, 3, 60–61 (In Russian)]
39. El-Hadad, S. S., Tikhomirova, N. A. (2018). Physicochemical properties and oxidative stability of butter oil supplemented with corn oil and dihydroquercetin. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(10), Article e13765. https://doi.org/10.1111/jfpp.13765
40. Коренкова, А. А. (2006). Изменение жирнокислотного состава молочных продуктов с фитодобавками при хранении. *Известия вузов. Пищевая технология*, 6(295), 98–99. [Korenkova, A. A. (2006). Change fatty-acidic composition of dairy products with fitoadditives at storage. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 6(295), 98–99. (In Russian)]
41. Роздова, В. Ф., Кулаков, Т. А., Ожгихина, Н. Н. (2009). Пищевые добавки с антиокислительным действием для увеличения сроков годности плавленых сыров. *Сыроделие и маслоделие*, 4, 20–22. [Rozdova, V. F., Kulakov, T. A., Ojgihina, N. N. (2009). Food supplements with antioxidative action for extending shelf life of processed cheese. *Cheese- and Buttermaking*, 4, 20–22. (In Russian)]
42. Дунаев, А. В. (2013). Дигидрокверцетин в молочной промышленности. *Переработка молока*, 10(168), 16–17. [Dunaev, A. V. (2013). Dihydroquercetin in the dairy industry. *Milk Processing*, 10(168), 16–17. (In Russian)]
43. Дунаев, А. В., Иванова, Н. В., Смирнова, О. И. (2019). *Дигидрокверцетин и арабиногалактан — натуральные пищевые добавки в продуктах сыроделия и маслоделия.* Научные подходы к решению актуальных вопросов в области переработки молока. Сборник научных трудов к 75-летию со дня основания ВНИИМС. — Углич, ВНИИМС — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, 2019. [Dunaev, A. V., Ivanova, N. V., Smirnova, O. I. (2019). *Dihydroquercetin and arabinogalactan — natural food additives in products of cheese making and butter making.* Scientific approaches to solving topical problems in the field of milk processing. Proceedings of the scientific works to the 75th anniversary of the foundation of VNIIMS. Uglich, VNIIMS — Branch of Gorbatov Research Center for Food Systems, 2019 (In Russian)]
44. Погосян, Д. Г. (2019). Влияние дигидрокверцетина на сроки годности кисломолочных продуктов. *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс,* 4, 8(4(48)), 188–192. [Poghosyan, D. G. (2019). The influence of dihydroquercetin on the expiration date whole milk products. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus,* 8(4(48)), 188–192. (In Russian)]
45. Радаева, И. А. (2008). Биофлавоноиды в молочной промышленности. *Молочная промышленность*, 3, 68–71. [Radaeva, I. A. (2008). Bioflavonoids in the dairy industry. *Dairy Industry*, 3, 68–71. (In Russian)]
46. Гусева, Т. Б., Караньян, О. М., Куликовская, Т. С., Рассоха, С. Н., Радаева, И. А. (2017). Применение природного антиокислителя дигидрокверцетина для увеличения срока годности молочных консервов. *Пищевая промышленность*, 8, 54–56. [Guseva, T. B., Karanyan, O. M., Kulikovskaya, T. S., Rassokha, S. N., Radaeva, I. A. (2017). The use of a natural antioxidant dihydroquercetin to increase the shelf life of dairy products. *Food Industry*, 8, 54–56. (In Russian)]
47. Ивкова, И. А., Пиляева, А. С., Копылов, Г. М. (2014). Разработка технологии сухого кисломолочного (сметанного) продукта. *Техника и технология пищевых производств*, 1, 35–39. [Ivkova, I. A., Pilyaeva, A. S., Kopylov, G. M. (2014). Development of dry fermented milk (sour cream) product technology. *Food Processing: Techniques and Technology*, 1, 35–39. (In Russian)]
48. Решетник, Е. И., Водолагина, Е. Ю., Максимюк, В. А. (2014). Исследование влияния растительных компонентов на функциональные свойства сывороточно-растительного продукта. *Техника и технология пищевых производств*, 5, 50–56. [Reshetnik, E. I., Vodolagina, E. Yu., Maksimyuk, V. A. (2014). Influence of plant components on functional properties of whey- plant product. *Food Processing: Techniques and Technology* 5, 50–56. (In Russian)]
49. Илларионова, Е. Е., Радаева, И. А., Туровская, С. Н., Караньян, О. М. (2018). Влияние дигидрокверцетина на устойчивость молочного жира к окислению. *Молочная промышленность*, 2, 67–68. [Illarionova, E. E., Radaeva, I. A., Turovskaya, S. N., Karanyan, O. M. (2018). Effects of dehydroquercetine on milk fat stability against oxidation. *Dairy Industry*, 2, 67–68. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2018-2-67-68
50. Илларионова, Е. Е., Туровская, С. Н., Радаева, И. А. (2020). К вопросу увеличения срока годности молочных консервов. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством,* 1, 225–230. [Illarionova, E. E., Turovskaya, S. N., Radaeva, I. A. (2020). To the question of increasing of canned milk storage life. *Actual Issues of the Dairy Industry, Intersectoral Technologies and Quality Management Systems,* 1, 225–230. (In Russian)] https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-225-230
51. Gama, M. I., Adam, S., Adams, S., Allen, H., Ashmore, C., Bailey, S. et al. (2022). Suitability and allocation of protein-containing foods according to protein tolerance in PKU: A 2022 UK National Consensus. *Nutrients*, 14(23), Article 4987. https://doi.org/10.3390/nu14234987

52. Елисеева, Л. Г., Юрина, О. В., Луценко, Л. М. (2015). Эффективность использования природных антиоксидантов для увеличения срока хранения ореховых снеков. *Пищевая промышленность*, 12, 30–34. [Eliseeva, L. G., Yurina, O. V., Lutsenko, L. M. (2015). The efficiency of use natural antioxidants to increase the shelf life of nut snacks. *Food Industry*, 12, 30–34. (In Russian)]
53. 刘妍, 王遂. (2011). 二氢槲皮素的提取及抗氧化性研究. *化学研究与应用*, 23(*1*), 107–111. [Liu, Y., Wang, S. (2011). Extraction and antioxidant properties of dihydroquercetin. *Chemistry Research and Applications*, 23(01), 107–111. (In Chinese)]
54. Коренкова, А. А., Сенькина, Е. А., Мун, А. Л. (2006). Органолептическая оценка молочных продуктов с фитодобавками при хранении. *Пищевая промышленность*, 11, 66–67. [Korenkova, A. A., Senkina, E. A., Moon, A. L. (2006). Organoleptic estimation of dairy products with fitoadditives at storage. *Food Industry*, 11, 66–67. (In Russian)]
55. Радаева, И. А., Галстян, А. Г., Туровская, С. Н., Илларионова, Е. Е. (2017). Изучение технологических свойств дигидрокверцетина. *Молочная промышленность*, 3, 67–68. [Radaeva, I. A., Galstyan, A. G., Turovskaya, S. N., Illarionova, E. E. (2017). Study of the technological properties of dihydroquercetin. *Dairy Industry*, 3, 67–68. (In Russian)]
56. Блинова, Т. Е., Радаева, И. А., Здоровцова, А. Н. (2008). Влияние дигидрокверцетина на молочнокислые бактерии. *Молочная промышленность*, 5, 57–59. [Blinova, T. E., Radaeva, I. A., Zdorovtsova, A. N. (2008). Effect of dihydroquercetin on the lactic acid bacteria. *Dairy Industry*, 5, 57–59. (In Russian)]
57. Yang, D., Zhu, R., Xu, H.-X., Zhang, Q.-F. (2023). Antibacterial mechanism of taxifolin and its application in milk preservation. *Food Bioscience*, 53, Article 102811. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102811
58. Rokaityte, A., Zaborskiene, G., Baliukoniene, V., Macioniene, I., Stimbirys, A. (2017). Effect of lactic acid and bioactive component mixtures on the quality of minced pork meat. *Italian Journal of Food Science*, 29(2), 253–265.
59. El-Hadad, S. S., Tikhomirova, N. A., Abd El-Aziz, M. (2020). Biological activities of dihydroquercetin and its effect on the oxidative stability of butter oil. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), Article e14519. https://doi.org/10.1111/jfpp.14519
60. 蔡瑾, 闫然, 王梦亮, 王琪. (2023). 二氢槲皮素对大肠杆菌的抑菌作用机理. *食品科学*, 44(19), 18–26. [Cai, J., Yan, R., Wang, M., Wang, Q. (2023). The antibacterial effect mechanism of dihydroquercetin on Escherichia coli. *Food Science*, 44(19), 18–26. (In Chinese)
61. Костыря, О. В., Корнеева, О. С. (2015). О перспективах применения дигидрокверцетина при производстве продуктов с пролонгированным сроком годности. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 4, 165–170. [Kostyrya, O. V., Korneeva, O. S. (2015). Application of dihydroquercetin in the production of products with prolonged shelf life. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 4, 165–170. (In Russian)]
62. An, H.-J., Yoon, Y.-K., Lee, J.-D., Jeong, N.-H. (2022). Antioxidant and antimicrobial properties of dihydroquercetin esters. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 58, Article e190800. https://doi.org/10.1590/s2175-97902022e190800
63. Akinmoladun, A. C., Famusiwa, C. D., Josiah, S. S., Lawal, A. O., Olaleye, M. T., Akindahunsi, A. A. (2022). Dihydroquercetin improves rotenone-induced Parkinsonism by regulating NF-κB-mediated inflammation pathway in rats. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 36(5), Article e23022. https://doi.org/10.1002/jbt.23022
64. Delporte, C., Backhouse, N., Erazo, S., Negrete, R., Vidal, P., Silva, X. et al. (2005). Analgesic–antiinflammatory properties of Proustia pyrifolia. *Journal of Ethnopharmacology*, 99(1), 119–124. https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.02.012
65. Guo, H., Zhang, X., Cui, Y., Zhou, H., Xu, D., Shan, T. et al. (2015). Taxifolin protects against cardiac hypertrophy and fibrosis during biomechanical stress of pressure overload. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 287(2), 168–177. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.06.002
66. 孙春梅, 唐玲, 庹玉平. (2023). 二氢槲皮素对心力衰竭大鼠心功能的保护作用及其作用机制. *中西医结合心脑血管病杂志*, 21(21), 3941–3947. [Sun, C., Tang, L., Tuo, Y. (2023). Protective effect of dihydroquercetin on cardiac function in rats with heart failure and its mechanism. *Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine for Cardiovascular and Cerebrovascular Diseases*, 21(21), 3941–3947. (In Chinese)]
67. Bernatova, I., Liskova, S. (2021). Mechanisms modified by (−)-epicatechin and taxifolin relevant for the treatment of hypertension and viral infection: Knowledge from preclinical studies. *Antioxidants*, 10(3), Article 467. https://doi.org/10.3390/antiox10030467
68. Chen, W., Deng, W., Chen, S. (2020). Inactivation of Nf-κb pathway by taxifolin attenuates sepsis-induced acute lung injury. *Current Topics in Nutraceutical Research*, 18(2), 176–182. https://doi.org/10.37290/ctnr2641-452X.18:176-182
69. Ding, T., Wang, S., Zhang, X., Zai, W., Fan, J., Chen, W. et al. (2018). Kidney protection effects of dihydroquercetin on diabetic nephropathy through suppressing ROS and NLRP3 inflammasome. *Phytomedicine*, 41, 45–53. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2018.01.026
70. Althunibat, O. Y., Abukhalil, M. H., Jghef, M. M., Alfwuaires, M. A., Algefare, A. I., Alsuwayt, B. et al. (2023). Hepatoprotective effect of taxifolin on cyclophosphamide-induced oxidative stress, inflammation, and apoptosis in mice: Involvement of Nrf2/HO-1 signaling. *Biomolecules and Biomedicine*, 23(4), 649–660. https://doi.org/10.17305/bb.2022.8743
71. Galochkina, A. V., Anikin, V. B., Babkin, V. A., Ostrouhova, L. A., Zarubaev, V. V. (2016). Virus-inhibiting activity of dihydroquercetin, a flavonoid from Larix sibirica, against coxsackievirus B4 in a model of viral pancreatitis. *Archives of Virology*, 161(4), 929–938. https://doi.org/10.1007/s00705-016-2749-3
72. Cai, C., Liu, C., Zhao, L., Liu, H., Li, W., Guan, H. et al. (2018). Effects of Taxifolin on Osteoclastogenesis in vitro and in vivo. *Frontiers in Pharmacology*, 9, Article 1286. https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01286
73. Shinozaki, F., Kamei, A., Shimada, K., Matsuura, H., Shibata, T., Ikeuchi, M. et al. (2023). Ingestion of taxifolin-rich foods affects brain activity, mental fatigue, and the whole blood transcriptome in healthy young adults: A randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Food and Function*, 14(8), 3600–3612. https://doi.org/10.1039/d2fo03151e
74. Zhang, Y., Yu, J., Dong, X.-D., Ji, H.-Y. (2018). Research on characteristics, antioxidnt and antitumor activities of dihydroquercetin and its complexes. *Molecules*, 23(1), Article 20. https://doi.org/10.3390/molecules23010020
75. Дрюцкая, С. М., Толстенок, И. В. (20 апреля, 2016). *Применение экстракта лиственницы даурской в пищевой промышленности*. Теоретические и практические вопросы интеграции химической науки, технологии и образования: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: материалы конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2016. [Dryutskaya, S. M., Tolstenok, I. V. (2016). Applications extract Dahurian in the food industry. Theoretical and practical questions of integration of chemical science, technology and education: All-Russian scientific-practical conference with international participation: Proceedings of the conference. Ulan-Ude: Publishing House ESSUTM, 2016. (In Russian)]
76. Бутуханов, В. Л., Ломанов, Р. С., Чеченина, С. В., Флюг, С. Е. (2016). Оценка растворимости дигидрокверцетина в нейтральных и слабокислых растворах. *Символ науки: международный научный журнал*, 8–2 (20), 41–44. [Butukhanov, V. L., Lomanov, R. S., Chechenina, S. V., Flug, S. E. (2016). Assessment of solubility of dihydroquercetin in neutral and weakly acidic solutions. *Symbol of Science: International Scientific Journal*, 8–2 (20), 41–44. (In Russian)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ушкалова Анастасия Андреевна — аспирант, Институт пищевых наук и инженерии, Цзилиньский университет Китай, Цзилинь, Чанчунь, ул. Цинлун, 818 Тел.: +861–672–201–99–99 E-mail: ushkalova23@mails.jlu.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8460-378X * автор для контактов	**Anastasiia A. Ushkalova**, Postgraduate (Doctoral) Student, College of Food Science and Engineering, Jilin University 18, Qinglong, Changchun, Jilin, China Tel.: + 861–672–201–99–99 E-mail: ushkalova23@mails.jlu.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8460-378X * corresponding author
Чжан Техуа — доктор технических наук, профессор, декан, Институт пищевых наук и инженерии, Цзилиньский университет Китай, Цзилинь, Чанчунь, ул. Цинлун, 818 Тел.: +861–375–607–30–39 E-mail: zhangth@jlu.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4299-6160	**Tiehua Zhang**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean, College of Food Science and Engineering, Jilin University 18, Qinglong, Changchun, Jilin, China Tel.: +861–375–607–30–39 E-mail: zhangth@jlu.edu.cn ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4299-6160
Баочэнь Лигэнь — аспирант, Институт пищевых наук и инженерии, Цзилиньский университет Китай, Цзилинь, Чанчунь, ул. Цинлун, 818 Тел.: +861–894–313–91–86 E-mail: bao98294@163.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7563-7856	**Ligen Baochen**, Postgraduate (Doctoral) Student, College of Food Science and Engineering, Jilin University 18, Qinglong, Changchun, Jilin, China Tel.: +861–894–313–91–86 E-mail: bao98294@163.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7563-7856
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-363-367

Received 26.04.2024
Accepted in revised 07.08.2024
Accepted for publication 12.08.2024
© Smuda S. S., Mohamed R. M., Abedelmaksoud T. G., 2024
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE PASTA WITH CHICKPEAS AS A WHEAT FLOUR SUBSTITUTE AND FORTIFIED WITH CAROB, BEETROOT, AND SPINACH

Sayed S. Smuda*, Reda M. Mohamed, Tarek G. Abedelmaksoud
Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

KEY WORDS:
gluten-free pasta, celiac disease, chickpea, carob, beetroot and spinach

ABSTRACT
The study aimed to develop pasta dough using chickpeas as a substitute for wheat flour and fortified with carob, beetroot, and spinach. Three formulations of gluten-free pasta were prepared: F1 (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2 (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%) and F3 (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%). Physical, chemical, rheological, and sensory characteristics of chickpea pasta were evaluated and compared to semolina flour (CS) as a control. In comparison with conventional wheat pasta, chickpea pasta has a higher content of protein, fiber, and polyphenolic compounds. The results indicated that the incorporation of chickpea as a main ingredient significantly increased the content of protein in the formulations of gluten-free pasta (17.50, 15.05 and 14.88% in F1, F3, and F2, respectively) compared to CS (12.10%). A similar trend was observed for the fiber content (0.45, 1.89, 2.16, and 2.29 in CS, F1, F2, and F3, respectively) and polyphenolic compounds (109.14, 112.14, 141.89, and 178.96 in CS, F1, F2, and F3, respectively). Chickpea pasta demonstrated strong acceptance across all sensory criteria, including texture, odor, shape, and taste. Therefore, this study suggests that chickpeas can serve as an effective substitute for wheat, thereby increasing the availability of healthy options for everyone, particularly for those with celiac disease, obesity, or diabetes.

Поступила 16.04.2024
Поступила после рецензирования 07.08.2024
Принята в печать 12.08.2024
© Смуда С. С., Мохамед Р. М., Абедельмаксуд Т. Г., 2024
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

РАЗРАБОТКА БЕЗГЛЮТЕНОВЫХ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С НУТОМ КАК ЗАМЕНИТЕЛЕМ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ И ФОРТИФИЦИРОВАННЫХ РОЖКОВЫМ ДЕРЕВОМ, СВЕКЛОЙ И ШПИНАТОМ

Смуда С. С.*, Мохамед Р. М., Абедельмаксуд Т. Г.
[1]Факультет науки о пище, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
безглютеновые макаронные изделия, целиакия, нут, рожковое дерево, свекла и шпинат

АННОТАЦИЯ
Целью исследования была разработка макаронных изделий, используя нут как заменитель пшеничной муки и фортификацию рожковым деревом, свеклой и шпинатом. Было приготовлено три рецептуры безглютеновых макаронных изделий: F1 (нутовая мука 97% + порошок рожкового дерева 2% + карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) 1%), F2 (нутовая мука 87% + порошок рожкового дерева 2% + порошок свеклы 10% + КМЦ 1%) и F3 (нутовая мука 87% + порошок рожкового дерева 2% + порошок шпината 10% + КМЦ 1%). Оценивали физические, химические, реологические и сенсорные показатели макаронных изделий с нутом по сравнению с образцом из муки из твёрдой пшеницы (CS) в качестве контроля. По сравнению с обычными пшеничными макаронными изделиями, макаронные изделия с нутом имели более высокое содержание белка, клетчатки и полифенольных соединений. Результаты показали, что введение нута как основного ингредиента существенно увеличивало содержание белка в различных рецептурах безглютеновых макаронных изделий (17,50; 15,05 и 14,88% в F1, F3 и F2, соответственно) по сравнению с CS (12,10%). Аналогичная тенденция наблюдалась и для содержания клетчатки (0,45; 1,89; 2,16 и 2,29 в CS, F1, F2, и F3, соответственно) и полифенольных соединений (109,14; 112,14; 141,89 и 178,96 в CS, F1, F2, и F3, соответственно). Макаронные изделия с нутом также показали хорошую приемлемость для всех сенсорных показателей, включая текстуру, запах, форму и вкус. Таким образом, данное исследование говорит о том, что нут может быть использован как эффективная замена пшеницы, повышая доступность полезных вариантов для каждого и особенно для тех, кто имеет целиакию, ожирение или диабет.

1. Introduction

Pasta is widely consumed worldwide and is considered a vital component of human nutrition since it is affordable, easily stored, palatable, and manageable [1].

Traditionally, durum wheat semolina is used to make pasta. However, a number of studies have been done to improve the nutritional content of pasta by partially or entirely substituting durum wheat flour with flour from other sources, such as cereal or pulses [2]. It has gluten, which is a kind of protein present in rye, barley, and wheat. Gluten is generally well tolerated and causes no issues for most individuals. But for those with celiac disease, consuming gluten-containing foods can set off an immunological reaction that damages tiny intestinal cells [3]. Glyadin is one of the two proteins that make up wheat gluten, and its consumption can lead to celiac disease. It has been discovered that gliadin triggers mucosal injury, an immune reaction, in those who are genetically predisposed. Its withdrawal has resolved the issue [4]. The typical form of celiac disease, which is caused by proteins found in wheat, rye, and barley, is characterized in children by malabsorption and stunted growth. It is an autoimmune kind of gastrointestinal illness that affects those who are genetically predisposed [5].

Pasta is made mostly of wheat semolina and is a very popular cuisine throughout the globe. Pasta that is made commercially has a high protein and carbohydrate content. The nutritional profile of pasta was improved

FOR CITATION: **Smuda, S.S., Mohamed, R.M., Abedelmaksoud, T.G.** (2024). Development of gluten-free pasta with chickpeas as a wheat flour substitute and fortified with carob, beetroot, and spinach. *Food Systems,* 7(3), 363–367. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-363-367

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Смуда, С.С., Мохамед, Р.М., Абедельмаксуд, Т.Г.** (2024). Разработка безглютеновых макаронных изделий с нутом как заменителем пшеничной муки и фортифицированных рожковым деревом, свеклой и шпинатом. *Пищевые системы*, 7(3), 363–367. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-363-367

with the inclusion of chickpea, carob, beetroot, and spinach compared to the control pasta. The stringent gluten-free diet poses a major issue due to the poor nutritional content and several nutrient deficiencies, such as the decreased absorption of iron, calcium, vitamins A, D, E, and K, and folate [6].

Additionally, it is well known that gluten-free food items are more expensive than gluten-containing ones. For these reasons, it is imperative to create gluten-free foods that are both nutritious and capable of supporting a full diet [7,8].

Achieving identical product attributes and quality to ordinary gluten-containing pasta is the true objective of crafting high-grade gluten-free items. Thus, it would be beneficial to compare the properties of the produced gluten-free "dough" and pasta with those of a real, comparable gluten-containing system [9].

Substances rich in protein and dietary fiber, such as pulse flours, can serve as substitutes for gluten in pasta production. Chickpeas (*Cicer arietinum*) are a great source of protein because they are high in unsaturated fatty acids and complex carbohydrates, abundant in vitamins and minerals, and generally free of antinutritional elements [10]. Additionally, pasta with chickpea flour has been shown to have a significantly lower glycemic index (GI) compared with traditional durum.

During the development of gluten-free products, it was suggested to use hydrocolloids as a soluble fiber, joining starch granules together and achieving high water absorption capacity. The use of xanthan gum (XG) is very widespread among gluten-free technologies.

Carob is rich in dietary fiber (30–40%) and phytochemical compounds (i. e., polyphenols, flavonoids, and tannins). It is an excellent reservoir of potassium and calcium and contains the seven essential amino acids. It has anti-tumor, anti-proliferative and apoptotic activities, anti-diarrheal and anti-hyperlipidemic effects, and low glycemic index [11,12].

In the same line, beetroot is rich in potassium, phenolic compounds, sugars and natural colorants (Betalain). It exhibits chemopreventive effects as well as antioxidant and anti-inflammatory activities. It also possesses nutritional agents for the prevention and treatment of hypertension and cardiovascular diseases, and increased resistance to the oxidation of low-density lipoprotein [13].

Spinach is a great source of iron, magnesium and protein. It has antioxidants that help in diabetes management, cancer prevention, asthma prevention, blood pressure reduction, and promotion of digestive regularity [14].

Therefore, the present study aims to develop gluten-free pasta using chickpeas as a flour substitute, fortified with carob, beetroot, and spinach.

2. Materials and methods

2.1. Sample preparation

Chickpea pulses (*Cicer arietinum*), carob (*Ceratoniasiliqua linn*), beetroot (*Beta vulgaris*) and spinach (*Spinacia oleracea*) were purchased from a local market, then washed with tap water, dried using a laboratory tray dryer at 60 °C for 24 hrs. The dried samples were ground into a powder using a hammer mill and then passed through a 0.5 mm sieve to obtain flour. The flour samples were stored until analysis and use. Pasta samples were prepared according to the addition ratios shown in Table 1.

Table 1. **Development of pasta ingredient formula (%)**

Таблица 1. **Разработка состава ингредиентов макаронных изделий (%)**

Ingredients (%)	Control and chickpea pasta			
	CS	F1	F2	F3
Semolina flour	100	—	—	—
Chickpea flour	—	97	87	87
Carob powder	—	2	2	2
Beetroot powder	—	—	10	—
Spinach powder	—	—	—	10
CMC		1	1	1

CMC: Carboxymethylcellulose, CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%).

2.2. Chickpea pasta processing

Chickpea pasta formulas were prepared using various mixtures and manufactured into macaroni with an Imperia Trading S. R.I. 10098 RIVOLI (TO) machine, located at C.so Susa, 242. The pasta samples were then dried at 45–50 °C for 24 hours. Additionally, a control batch of pasta made solely with semolina was also prepared.

2.3. Quality characteristics of pasta samples

2.3.1. Rheological characteristics of pasta dough using Mixolab

The dough rheological behavior of pasta samples was investigated using Mixolab (Chopin, Tripette et Renaud, Paris, France). This simultaneously establishes the properties of the dough while it is being mixed at a steady temperature and while it is being heated and cooled.

Using the input values for both flour moisture and water absorption, the Mixolab software calculated the amount of flour required for analysis. The usual Mixolab Chopin methodology was used for all measurements, as stated by Mohsen et al. [15] and Tlay et al. [16].

2.3.2. Sensory evaluation of pasta samples

The Food Sciences Department Faculty of Agriculture Cairo University, Giza, Egypt, provided ten qualified judges to assist in the evaluation of the pasta's sensory qualities (color, texture, odor, and taste) based on a nine-point hedonic scale [17].

2.3.3. Cooking quality of pasta samples

Optimal cooking time is the shortest amount of time required for the starch to gelatinize, and it was determined by timing the disappearance of the pasta's starchy white center [18]. Pasta cooking experiments were conducted in triplicate, with weight gain and cooking loss measurements taken as well. The pasta's cooking loss and weight gain were computed using the methodology described by Gull et al. [19].

$$\text{Weight gain (\%)} = [(\text{weight of cooked pasta} - 10)/10] \times 100$$

$$\text{Cooking loss (\%)} = [(\text{weight of dried residue in cooking water}/10)] \times 100$$

2.3.4. Chemical composition of pasta samples

The moisture, crude protein, lipid, crude fiber, and ash contents in the samples of dry pasta were assessed using the AOAC [18] procedures. The amount of carbohydrates was computed via difference.

2.3.5. Phytochemical profiles of pasta samples

The total phenol content of pasta samples was measured calorimetrically using the Folin–Ciocalteu reagent in accordance with Abedelmaksoud et al. [20]. The absorbance of the mixture was measured spectrophotometrically at 725 nm against a blank on a spectrophotometer (Uv-Vis spectrophotometer, Labomed Inc., USA). The standard utilized was gallic acid. On a dry weight basis, phenols were represented as mg gallic acid equivalent GAE/g sample.

The method for determining the total flavonoid content was based on Zhishen et al. [21]. Using catechin as a reference chemical, the calibration curve was created. On a dry weight basis, the total flavonoid concentration was determined as mg CE/g.

Quantitative determination of tannins was carried out as described by Price et al. [22] followed by minor modification by Osman [23]. The standard curve was prepared using catechin. Tannins were measured on a dry weight basis and expressed as mg of catechin equivalent (CE)/g.

According to Brand-Williams et al. [24], the radical scavenging capacity of pasta extracts in reaction with the stable 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical was used to measure their antioxidant activity. The following equation was used to determine the antioxidant activity as a percentage of radical scavenging:

$$\%\ \text{radical scavenging} = [(A_0 - A_1/A_0)] \times 100 \quad (1)$$

Where:

A_0 = the absorbance of the control reaction (containing all reagents except the test compounds);

A_1 = the absorbance in the presence of the tested extracts after 30 min.

2.4. Statistical analysis

Using XLSTAT software (Addinsoft, New York, USA), a statistical analysis of the results was performed with the use of Duncan's multiple range analyses, analysis of variance (ANOVA), and the least significant difference (LSD, 95%) test.

3. Results and Discussion

3.1. Sensory evaluation

Evaluation of sensory quality of gluten-free pasta can be a crucial first step in exploring the viability of an industrial and commercial strategy. In this study, sensory analysis was done using a 9-point hedonic scale. The results of sensory evaluation of gluten-free pasta made with chickpea flour as the main substitute for semolina flour with the three formulas are presented in Table 2 for color, taste, odor and chewiness of pasta. Based on color, formulas two and three showed higher acceptability because of their attractive colors. The other sensory indicators were similar in all formulas and significantly higher than those in the control, especially the chewiness and texture characteristics as the high fiber content of chickpea significantly enhanced these characteristics. Overall acceptability of formula two

Table 2. Sensory scores of the gluten-free pasta samples and the control

Таблица 2. **Сенсорные баллы для образцов безглютеновых макаронных изделий и контроля**

Sample	Color (9)	Texture (9)	Odor (9)	Taste (9)	Overall acceptability (9)	Overall quality score (45)
CS	7.3±0.0^{c}	7.1±0.33^{c}	7.0±0.45^{c}	6.7±0.0^{c}	7.0±0.25^{b}	35.1±0.22^{b}
F1	7.2±0.84^{c}	7.6±0.89^{b}	7.5±0.45^{b}	7.2±0.87^{bc}	7.3±0.76^{b}	36.8±3.54^{b}
F2	8.6±0.76^{a}	8.7±0.19^{a}	8.1±0.42^{a}	8.4±1.04^{a}	8.8±0.89^{a}	42.6±0.28^{a}
F3	8.0±0.0^{b}	8.1±0.32^{ab}	8.3±0.35^{a}	7.9±0.55^{b}	8.5±0.61^{a}	40.8±0.24^{a}

CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%). Values are means of three replicates ± SD. Means followed by different superscripts within the same column are significantly different at 0.05 level.

Table 3. **Chemical composition (% on dry weight basis) of gluten-free pasta compared to the control**

Таблица 3. **Химический состав (% на сухую массу) безглютеновых макаронных изделий по сравнению с контролем**

Formulas	Parameters %					
	Moisture	Ash	Fiber	Protein	Fat	TC
CS	6.24±0.67^{c}	0.52±0.03^{c}	0.45±0.07^{c}	12.10±1.13^{c}	1.16±0.09^{c}	85.77±4.21^{a}
F1	7.32±0.72^{b}	2.09±0.07^{b}	1.89±0.03^{b}	17.50±1.02^{a}	5.58±0.14^{a}	71.94±6.23^{c}
F2	8.77±0.23^{a}	2.31±0.05^{a}	2.16±0.21^{a}	14.88±1.32^{b}	4.75±0.17^{b}	75.9±3.09^{b}
F3	8.41±3.10^{a}	2.45±0.08^{a}	2.29±0.12^{a}	15.05±1.34^{b}	4.58±0.15^{b}	75.63±4.11^{b}

CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%), TC: total carbohydrates (%). Different letters (a, b, c) mean statistically significant difference ($p<0.05$); the results represent the mean ± standard deviation.

was the highest followed by formula three then one and all the formulas had a significant difference from the control as illustrated in Table 2.

It can be observed from data in Table 2 that the color score of pasta increased significantly with increasing beet root substitution levels (F2, 10% beet root). The semolina control (CS) and F1 pasta samples had the lowest color score (7.2 and 7.3, respectively).

In terms of texture appreciation, analysis of variance showed that there was no significant difference among different pasta samples except for the control pasta sample. In the same trend, there were no significant differences in odor characteristics between F2 and F3 pasta samples. On the other hand, the pasta control sample (CS) recorded the lowest score followed by the F1 pasta sample.

The results also indicated that the F3 and F1 pasta samples had no significant effect on the taste score (7.9 and 7.2, respectively) compared with CS pasta (6.7). Meanwhile, the taste score of the F2 pasta sample showed the highest value (8.4).

Gökçe et al. [25] studied the organoleptic attributes of some bakery products and concluded that the addition of xanthan gum, guar gum, locust bean, carob gum and their mixtures in gluten-free bakery products increases the emulsion stability and the nutritive value of bakery products.

3.2. Chemical composition of prepared pasta samples

The presented results in Table 3 show significant changes in the chemical profiles of gluten-free pasta compared to the control (semolina pasta). The incorporation of beetroot and spinach increased the moisture content in F2 and F3. This means that the free water is bound by nutrients and thus participates in increasing shelf life and the time needed for drying.

The chemical composition of the pasta samples presented in Table 3 indicated that the incorporation of chickpea as a main ingredient increased significantly the content of protein in the different pasta formulations (17.50, 15.05, and 14.88% in F1, F3 and F2, respectively) compared to CS (12.10%). This means that the protein content of the gluten-free pasta was higher than that of semolina pasta as a control. The highest protein content is reported for F1 followed by F3 then F2. The results also indicated a slight decrease in the fat content in all gluten-free pasta samples compared to CS. The fat content increased when semolina was replaced with chickpea flour. The lowest fat content was reported in CS followed by F2 then F3 and the highest one was in F1. The ash content increased in different formulations of gluten-free pasta relative to semolina wheat flour pasta as a control. Furthermore, significant differences in the crude fiber content were observed among all prepared pasta samples under study. Among pasta samples, the lowest value of fiber content (0.45%) was observed in the control pasta. On the other hand, the highest fiber percent was identified in F3 and F2 followed by F1. The high fiber content in gluten-free pasta improved the sensory characteristics. Furthermore, dietary fiber has beneficial health effects such as improvement of the digestion ability and treatment of colonic disorders [26]. In this respect, Mudgil et al. [27] reported that chickpea flour is predominantly composed of insoluble dietary fiber (IDF), which may enhance intestinal transit. The results for ash content, representing mineral content, indicated that F3, which consists of 87% chickpea, 2% carob, and 10% spinach, had the highest mineral content. This is attributed to the high mineral content found in spinach (Table 3).

Furthermore, the carbohydrate content of gluten-free pasta was significantly lower compared to the wheat flour pasta control. A similar finding was reported by El-Demery et al. [28].

3.3. Phytochemical profiles

The results presented in Table 4 indicate significant changes in the phytochemical profiles of gluten-free pasta compared to the control (semolina wheat pasta). The total phenolic content for the different formulas is expressed as milligrams of gallic acid equivalent per 100 g of sample. Formula F3 exhibited the highest phenolic content at 178.96 mg/100 g, followed by F2 at 141.89 mg/100 g. Formula F1's content was similar to that of the control. This suggests that the incorporation of spinach and beetroot increased the phenolic content by boosting the bioactive compounds. Similarly, Ahmad et al. [29] reported that adding spinach leaves to noodles enhanced antioxidant activity, as well as phenolic and flavonoid compounds.

Table 4. **Phytochemical profiles of gluten-free pasta compared to the control**

Таблица 4. **Фитохимические профили безглютеновых макаронных изделий по сравнению с контролем**

Parameters	Total phenolic compounds (mg/100 g)	Total flavonoids (mg/100 g)	Tannins (mg/100 g)	Antioxidants (%)
CS	109.14±2.22^{c}	50.11±2.11^{d}	17.62±0.85^{c}	19.23±2.34^{d}
F1	112.14±3.34^{c}	61.18±1.43^{c}	19.95±0.72^{b}	28.94±1.98^{c}
F2	141.89±1.90^{b}	72.16±2.45^{b}	17.87±1.94^{c}	35.90±2.23^{b}
F3	178.96±4.66^{a}	86.45±1.23^{a}	26.54±1.54^{a}	46.58±1.56^{a}

CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%). Values are means of three replicates ± SD. Means followed by different superscripts within the same column are significantly different at 0.05 level.

The results revealed that total flavonoids, which are reported as mg catechin equivalent (CE)/g on a dry weight basis were significantly different. The results also showed that F3 had the highest value of flavonoid content (86.45 mg/100 g sample) followed by F2 (72.16 mg/100 g sample), while the control sample had the lowest content of flavonoids (50.11 mg / 100 g sample). Tannins are reported as mg catechin equivalent (CE)/g on a dry weight basis. Fortification of the base formula with spinach increased the tannin content, which acts as a preservative and significantly increases the shelf life. The antioxidant activity expressed as inhibition percent of DPPH is illustrated in Table 4. The results showed significant differences between the gluten-free pasta and the control. The antioxidant activity significantly increased in F3, followed by F2 and F1, with all formulations showing higher activity than the control. Therefore, F3 is recommended for its potential

anticancer and anti-inflammatory properties. The results indicate that fortifying gluten-free pasta made from chickpea flour with carob, beetroot, and spinach enhances both the quality characteristics and the nutritional value of the final product, as well as its phytochemical profile. The primary use of beetroot is as a food ingredient. The beetroot, in particular its betalains, or betanin, has been drawing more and more attention due to its potent biological activity that reduces LDL, scavenges DPPH, eliminates oxidative stress, and prevents DNA damage [30].

3.4. Cooking properties

The presented results in Table 5 show significant changes in the cooking characteristics of the gluten-free pasta compared to the control (semolina pasta).

Table 5. **Cooking properties of gluten-free pasta compared to the control**

Таблица 5. **Свойства безглютеновых макаронных изделий при варке по сравнению с контролем**

Parameters	OCT min.	Water absorption %	Cooking loss %
CS	10±0.04^b	146.92±3.34^a	5.23±0.05^c
F1	14±0.05^a	132.71±2.34^b	8.44±0.04^a
F2	13±0.02^a	121.23±3.09^c	6.77±0.05^b
F3	13±0.05^a	119.89±2.07^c	6.23±0.02^b

* CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%). OCT = optimal cooking time (min). Values are means of three replicates ± SD. Means followed by different superscripts within the same column are significantly different at 0.05 level.

Cooking quality of pasta is the most important attribute from a consumer point of view. It is defined by the physical parameter along with the chemical and nutritional parameters. Pasta quality and cooking characteristics are dependent upon the protein starch matrix of a pasta product [31]. The results of the various cooking quality parameters for the pasta formulations including optimal cooking time (min), cooking loss (%) and weight gain (%) are given in Table 5.

The cooking time of the pasta samples ranged from 10 to 14 minutes. The optimal cooking time depends primarily on the rates of water penetration and starch gelatinization. Gluten-free pasta (F1, F2 and F3, respectively) exhibited higher optimal cooking time than the semolina pasta control (CS). It was observed that cooking time was shorter at relatively lower protein levels than at higher protein content, when it takes longer for water to penetrate the protein network. Therefore, the hydration levels were high in the samples containing higher levels of chickpea flour [32].

Cooking loss, which refers to the amount of residue left in the water after cooking pasta, is a key indicator of the overall quality of the pasta. It is primarily influenced by the dissolution and release of gelatinized starches from the pasta surface into the cooking water. The quality of pasta is indicated by the low amount of residue left in the cooking water [33]. The cooking loss increased significantly in all gluten-free pasta, while the semolina pasta control had the lowest cooking loss value (5.23%). These results were likely obtained because chickpeas could not form a strong network of starch and protein that holds the pasta together; thus, this led to more solids leaching into the cooking water. An increase in cooking losses in all gluten-free pasta samples might be related to the disruption of the protein matrix by the chickpea particles [34]. On the other hand, gluten-free pasta samples presented the weight gain percentage (from 119.89 to 132.71%) that was significantly lower than the semolina pasta control (146.92%).

3.5. Dough rheological characteristics of pasta dough samples using Mixolab

Table 6 lists the rheological parameters of the dough pasta samples: water absorption percentage (the amount of water needed to achieve a consistency level sufficient to achieve an atorque of C1=1.1±0.05 Nm using the standard Chopin + protocol), dough development time (DDT) (the amount of time needed to reach C1), dough weakening (C2), and starch gelatinization (C3). It explains the behavior of starch, which is seen as a rise in dough consistency with a degree of an increase depending on the starch quality. A drop in viscosity in the fourth stage is linked to amylase activity and the physical disintegration of the starch granules. The torque at (C4) provides information on the stability of the heated gel that is generated as well as the pace of enzymatic hydrolysis. The less stable starch gel has a lower value.

The torque (C5) suggests how shelf stable a flour product will be and is a sign of retrogradation or the rearranging of starch molecules during the chilling process.

Finally, dough stability is a measure of dough resistance to kneading. The long period is referred to stronger dough.

Table 6 shows that water absorption, DDT and C1 values of pasta dough samples were in a range from 53.90%, 5.69 min and 1.05 Nm (for F1) to 61.28%, 6.67 min and 1.09 Nm (for F3), respectively. The free-gluten formula F3 recorded the highest value of DDT and C1, while F1 recorded the lowest one. It takes longer to make stronger flour. The findings demonstrate that gluten characteristics, flour particle size, and protein all had a significant impact on DDT [35]. This means that an increase in protein incorporation in the pasta formula increased the DDT.

Table 6. **Rheological characteristics of gluten-free pasta compared to the control**

Таблица 6. **Реологические характеристики безглютеновых макаронных изделий по сравнению с контролем**

Treatment	Water absorption (%)	DDT (min)	Torque (Nm)					Stability (min)
			C1	C2	C3	C4	C5	
CS	56.98	5.76	1.06	0.58	1.74	1.88	2.73	8.30
F1	53.90	5.69	1.05	0.55	1.73	1.63	2.86	5.23
F2	59.23	6.45	1.07	0.61	1.65	1.54	3.44	7.23
F3	61.28	6.67	1.09	0.63	1.70	1.57	3.39	6.14

* CS: semolina control, F1: gluten-free pasta (chickpea flour 97% + carob powder 2% + CMC1%), F2: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + beetroot powder 10% + CMC1%), F3: gluten-free pasta (chickpea flour 87% + carob powder 2% + spinach powder 10% + CMC1%). Values are means of three replicates ± SD. Means followed by different superscripts within the same column are significantly different at 0.05 level.

On the other hand, C2 of pasta dough samples ranged from 0.55 to 0.63 Nm, and C3 ranged from 1.65 to 1.74 Nm. Regarding C4, CS pasta dough had the highest value of 1.88 Nm, implying the most stable gel in the hot phase. CS and F1 pasta doughs had the lowest value of C5 (2.73 and 2.86 Nm, respectively). Concerning dough stability, it was observed that the control pasta dough had the highest dough stability (8.30 min).

The decreased water absorption in F1 dough appeared to have an impact on its development and stability. Protein quality and its capacity to withstand kneading pressures are the primary factors affecting dough stability. In this respect, Šimurina et al. [36] discovered that adding protein from legumes enhances the dough ability to combine when made with whole grain spelt flour. Its increased stability and improved water absorption are the main causes of this improvement.

4. Conclusion

The study successfully developed gluten-free pasta using chickpea flour, fortified with carob, beetroot, and spinach powders, offering a nutritious alternative to conventional wheat pasta. The results demonstrated that chickpea-based pasta formulations significantly increased protein, fiber, and polyphenolic compound content compared to the semolina control. Chickpea-based pasta formulations (F1, F2, and F3) showed higher protein, fiber, and polyphenolic content compared to conventional semolina pasta. Sensory evaluation indicated good acceptance across all criteria, including texture, odor, shape, and taste. These findings suggest that chickpea-based pasta is not only a viable alternative for those with celiac disease but also offers a healthier option for individuals seeking to manage obesity and diabetes. Overall, chickpea pasta presents a nutritious and well-accepted alternative to traditional wheat pasta.

REFERENCES

1. Meydani, M. (2009). Omega-3 fatty acids alter soluble markers of endothelial function in coronary heart disease patients. *Nutrition Reviews*, 58(2), 56–59. https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2000.tb07812.x
2. Chillo, S., Monro, J. A., Mishra, S., Henry, C. J. (2010). Effect of incorporating legume flour into semolina spaghetti on its cooking quality and glycaemic impact measured in vitro. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 61(2), 149–160. https://doi.org/10.3109/09637480903476423
3. Schalk, K., Lexhaller, B., Koehler, P., Scherf, K. A. (2017). Isolation and characterization of gluten protein types from wheat, rye, barley and oats for use as

reference materials. *PLOS One*, *12*(2), Article e0172819. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172819
4. Van Buiten, C. B., Elias, R. J. (2021). Gliadin sequestration as a novel therapy for celiac disease: A prospective application for polyphenols. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(2), Article 595. https://doi.org/10.3390/ijms22020595
5. Mäki, M., Mustalahti, K., Kokkonen, J., Kulmala, P., Haapalahti, M., Karttunen, T. et al. (2003). Prevalence of celiac disease among children in Finland. *New England Journal of Medicine*, 348(25), 2517–2524. https://doi.org/10.1056/nejmoa021687
6. Vici, G., Belli, L., Biondi, M., Polzonetti, V. (2016). Gluten free diet and nutrient deficiencies: A review. *Clinical Nutrition*, 35(6), 1236–1241.
7. Jnawali, P., Kumar, V., Tanwar, B. (2016). Celiac disease: Overview and considerations for development of gluten-free foods. *Food Science and Human Wellness*, 5(4), 169–176. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.09.003
8. Thuy, N. M., Yen, T. H., Tien, V. Q., Giau, T. N., Minh, V. Q., Tai, N. V. (2023). Formulation and quality characteristics of macaroni substituted with chickpea and banana flour. *Food Science and Technology*, 43, Article e129622. https://doi.org/10.5327/fst.129622
9. Aguilar, N., Albanell, E., Miñarro, B., Capellas, M. (2015). Chickpea and tiger nut flours as alternatives to emulsifier and shortening in gluten-free bread. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 225–232. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.045
10. Muzquiz, M., Wood, J. A. (2007). Antinutritional factors. Chapter in a book: Chickpea breeding and management. Wallingford, UK: CABI, 2007. http://doi.org/10.1079/9781845932138.006
11. Fidan, H., Stankov, S., Petkova, N., Petkova, Z., Iliev, A., Stoyanova, M., Ivanova, T. et al. (2020). Evaluation of chemical composition, antioxidant potential and functional properties of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2404–2413. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04274-z
12. Brassesco, M. E., Brandão, T. R., Silva, C. L., Pintado, M. (2021). Carob bean (*Ceratonia siliqua* L.): A new perspective for functional food. *Trends in Food Science and Technology*, 114, 310–322. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.037
13. Mudgal, D., Puja, Singh, S., Singh, B. R., Samsher (2022). Nutritional composition and value-added products of beetroot: A review. *Journal of Current Research in Food Science*, 3(1), 01–09.
14. Waseem, M., Akhtar, S., Manzoor, M. F., Mirani, A. A., Ali, Z., Ismail, T. et al. (2021). Nutritional characterization and food value addition properties of dehydrated spinach powder. *Food Science and Nutrition*, 9(2), 1213–1221. https://doi.org/10.1002/fsn3.2110
15. Mohsen S. M., Ashraf A., Ahmed S. S., Abedelmaksoud T. G. (2024). Biscuits enriched with the edible powder of Angoumois grain moth (Sitotroga cerealella): Optimization, characterization and consumer perception assessment. *Food Systems*, 7(1),165–178. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-165-178
16. Tlay R. H., Abdul-Abbas S.J., El-Maksoud 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
17. Škrobot, D., Pezo, L., Tomić, J., Pestorić, M., Sakač, M., Mandić, A. (2022). Insights into sensory and hedonic perception of wholegrain buckwheat enriched pasta. *LWT*, 153, Article 112528. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112528
18. AOAC (2023). Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists international.18th Ed. Association of Official Analytical Chemists, Maryland, DC.32. Cereal Foods, 2023.
19. Gull, A., Prasad, K., Kumar, P. (2018). Nutritional, antioxidant, microstructural and pasting properties of functional pasta. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 147–153. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.03.002
20. Abedelmaksoud, T. G., Smuda, S. S., Altemimi, A. B., Mohamed, R. M., Pratap-Singh, A., Ali, M. R. (2021). Sunroot snack bar: Optimization, characterization, consumer perception, and storage stability assessment. *Food Science and Nutrition*, 9(8), 4394–4407. https://doi.org/10.1002/fsn3.2412
21. Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555–559. https://doi.org/10.1016/s0308-8146(98)00102-2
22. Price, M. L., Van Scoyoc, S., Butler, L. G. (1978). A ctirical evaluation of reaction as assay for tannin in sorghum grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 26(5), 1214–1218. https://doi.org/10.1021/jf60219a031
23. Osman, M. A. (2004). Chemical and nutrient analysis of baobab (*Adansonia digitata*) fruit and seed protein solubility. *Plant Foods for Human Nutrition*, 59(1), 29–33. https://doi.org/10.1007/s11130-004-0034-1
24. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5
25. Gökçe, C., Bozkurt, H., Maskan, M. (2023). The use of carob flour and stevia as sugar substitutes in sponge cake: Optimization for reducing sugar and wheat flour in cake formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, Article 100732. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100732
26. Sarriá, B., Martínez-López, S., Fernández-Espinosa, A., Gómez-Juaristi, M., Goya, L., Mateos, R. et al. (2012). Effects of regularly consuming dietary fibre rich soluble cocoa products on bowel habits in healthy subjects: A free-living, two-stage, randomized, crossover, single-blind intervention. *Nutrition and Metabolism*, 9, Article 33. https://doi.org/10.1186/1743-7075-9-33
27. Mudgil, D., Barak, S. (2013). Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 61, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.06.044
28. El-Demery, M., Lotfy, L. (2015). Quality characteristics of pan bread enriched with defatted germinated pumpkin seed flour. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, 12(1), 29–38. https://doi.org/10.12816/0025354
29. Ahmad, M. M., El-Kader, A., Amal, E., Abozed, S. S. (2021). Optimization of Flaxseed Cake Pectin Extraction and Shelf-Life Prediction Model for Pear Fruit Preserved by Pectin Edible Coating. *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(12), 7481–7493. https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.74519.3678
30. Chen, L., Zhu, Y., Hu, Z., Wu, S., Jin, C. (2021). Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. *Food Science and Nutrition*, 9(11), 6406–6420. https://doi.org/10.1002/fsn3.2577
31. Brennan, C. S., Tudorica, C. M. (2007). Fresh pasta quality as affected by enrichment of nonstarch polysaccharides. *Journal of Food Science*, 72(9), S659-S665. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00541.x
32. Santos, F. G., Fratelli, C., Muniz, D. G., Capriles, V. D. (2021). The impact of dough hydration level on gluten-free bread quality: A case study with chickpea flour. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 26, Article 100434. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100434
33. Del Nobile, M. A., Baiano, A., Conte, A., Mocci, G. (2005). Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 41(3), 347–356. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.12.003
34. Suo, X., Dall'Asta, M., Giuberti, G., Minucciani, M., Wang, Z., Vittadini, E. (2024). Effect of "shape" on technological properties and nutritional quality of chickpea-corn-rice gluten free pasta. *LWT*, 192, Article 115661. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115661
35. Rasper, V. F., Walker, C. E. (2000). Quality evaluation of cereals and cereal products. Chapter in a book: Handbook of Cereal Science and Technology, Revised and Expanded. CRC Press, 2000. https://doi.org/10.1201/9781420027228-51
36. Šimurina, O., Filipčev, B., Belić, Z., Jambrec, D., Krulj, J., Brkljača, J. et al. (2016). The influence of plant protein on the properties of dough and the quality of wholemeal spelt bread. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 8(2), 107–111. https://doi.org/10.17508/cjfst.2016.8.2.10

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Sayed S. Smuda, Assistant Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–1115–001–33–07 E-mail: sayedsaad1910@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7713-0693 * corresponding author	**Смуда Сайед С.** — старший преподаватель, кафедра науки о питании, сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Tel.: +2–1115–001–33–07 E-mail: sayedsaad1910@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7713-0693 * автор для контактов
Reda M. Mohamed, Associate Professor, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, 12613, Giza, Egypt Tel.: +2–0115–659–47–47 E-mail: reda_karrim@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5817-9187	**Мохамед Р. М.** — адъюнкт-профессор, кафедра науки о питании, сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0115–659–47–47 E-mail: reda_karrim@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5817-9187
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	**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
Contribution	**Критерии авторства**
Authors 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/10.21323/2618-9771-2024-7-3-368-374

Поступила 16.04.2024
Поступила после рецензирования 07.08.2024
Принята в печать 12.08.2024
© Беляева Л. И., Пружин М. К., Остапенко А. В., Власенко А. С., 2024

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

ДИОКСИД СЕРЫ В БЕЛОМ САХАРЕ: ИСТОЧНИК ПОСТУПЛЕНИЯ, РЕФЕРЕНТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Беляева Л. И.*, Пружин М. К., Остапенко А. В., Власенко А. С.
Курский федеральный аграрный научный центр, Курск, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *свекловичный сахар, пищевая система, диоксид серы, сульфит, технологическое вспомогательное средство, аддитивное влияние, референтное значение*

АННОТАЦИЯ
Диоксид серы относится к классическим обязательным ТВС, применяемым в современной технологии производства белого свекловичного сахара. Обосновано технологическое и безопасное применение сульфитов (диоксида серы, сульфита натрия и гидросульфита натрия) при формировании пищевой системы технологического потока сахарного производства, показано их функциональное действие. Установлено, что изменение содержания диоксида серы в белом сахаре под влиянием пеногасителя, антинакипина и деколоранта в применяемых дозах в утфеле происходило в соответствии с принципом аддитивности. Наличие аддитивного свойства подтверждено максимальным приближением алгебраической суммы эффектов влияния каждого средства, составляющей 5,6%, к размаху варьирования значений содержания диоксида серы — 5,9 при уровне значимости p=0,05. Установлена зависимость содержания диоксида серы в белом сахаре в пределах 0–6,5 мг/кг от влияния деколоранта и пеногасителя в диапазоне доз 100–200 и 4–6 г/т утфеля. Выявлено, что увеличение минимальной оптимальной дозы деколоранта до максимальной приводит к повышению содержания диоксида серы в белом сахаре в 1,7 раза. Доверительные интервалы для генеральной средней рассчитывали на основе предположения о нормальном распределении данных и уровне значимости 0,05. Референтные значения содержания диоксида серы в белом сахаре четырех категорий составили 1,28–2,69 мг/кг, а верхний предельный уровень с учетом доверительного интервала — 1,39–3,01 мг/кг. Установленные референтные значения могут быть использованы на сахарных заводах в системе производственного контроля, а также являются доказательной базой сравнения и оценки этого показателя безопасности белого сахара для промышленных потребителей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», № FGZU-2023-002.

Received 16.04.2024
Accepted in revised 07.08.2024
Accepted for publication 12.08.2024
© Belyaeva L. I., Pruzhin M. K, Ostapenko A. V., Vlasenko A. S., 2024

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

SULFUR DIOXIDE IN WHITE SUGAR: SOURCE OF INCOME, REFERENCE VALUES

Lyubov I. Belyaeva*, Mikhail K. Pruzhin, Alla V. Ostapenko, Anna S. Vlasenko
Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, Russia

KEY WORDS: *beet sugar, food system, sulfur dioxide, sulfite, technological processing aid, additive effect, reference value*

ABSTRACT
Sulfur dioxide is one of the classic essential technological processing aids used in modern technology for the production of white beet sugar. The technological and safe use of sulfites (sulfur dioxide, sodium sulfite and sodium hydrosulfite) in the formation of the food system of the sugar production process flow has been substantiated, and their functional effect is shown. It has been established that the change in the content of sulfur dioxide in white sugar under the influence of an antifoam, antiscale agent and decolorant in the doses used in massecuite occurred in accordance with the principle of additivity. The presence of the additive property was confirmed by the maximum approximation of the algebraic sum of the effects of each agent, amounting to 5.6%, to the range of variation in the values of the sulfur dioxide content (5.9) at a significance level of p=0.05. The dependence of the sulfur dioxide content in white sugar in a range of 0 to 6.5 mg/kg on the influence of the decolorant and defoamer in a dose range of 100 to 200 and of 4 to 6 g/t of massecuite was established. It has been revealed that increasing the minimum optimal dose of the decolorant to the maximum leads to an increase in the content of sulfur dioxide in white sugar by 1.7 times. Confidence intervals for the general mean were calculated based on the assumption of normal data distribution and a significance level of p=0.05. The reference values for the sulfur dioxide content in white sugar of the four categories were 1.28–2.69 mg/kg, and the upper limit level with consideration for the confidence interval was 1.39–3.01 mg/kg. The established reference values can be used at sugar factories in the production control system, and also provide an evidence base for comparison and assessment of this indicator of the white sugar safety for industrial consumers.

FUNDING: This research was funded by state assignment of the Federal Agricultural Kursk Research Center, No FGZU-2023-002.

1. Введение

Диоксид серы, а также соли сернистой кислоты относят к сульфитсодержащим реагентам (сульфитам); они входят в наиболее распространенные группы пищевых добавок — искусственные консерванты, антиокислители и отбеливатели. Их используют в производстве широкого спектра пищевых продуктов — безалкогольных напитков, соков, пива, вина, кондитерских изделий, крахмалов, муки, некоторых мясных продуктов, сушеных фруктов и овощей, морепродуктов. Диоксид серы в пиве способствует сохранению вкусовых качеств и продлению срока годности благодаря взаимодействию с карбонильными группами и подавлению окислительных ферментов [1]. Введение в виноградное сусло перед брожением сернистой кислоты способствует образованию большего количества ароматических соединений за счет снижения активности роста природных штаммов молочнокислых

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Беляева, Л. И., Пружин, М. К., Остапенко, А. В., Власенко, А. С.** (2024). Диоксид серы в белом сахаре: источник поступления, референтные значения. *Пищевые системы*, 7(3), 368–374. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-368-374

FOR CITATION: **Belyaeva, L. I., Pruzhin, M. K, Ostapenko, A. V., Vlasenko, A. S.** (2024). Sulfur dioxide in white sugar: Source of income, reference values. *Food Systems*, 7(3), 368–374. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-368-374

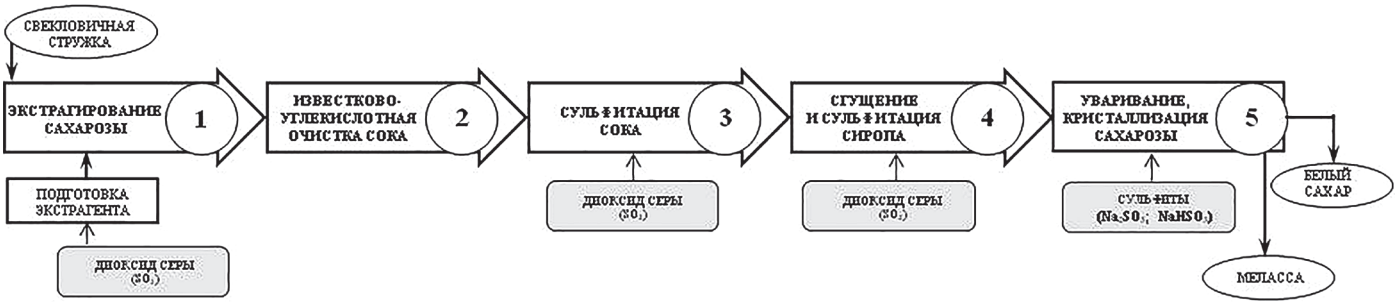


Рисунок 1. **Структурная схема поступления сульфитов в процессы производства свекловичного сахара, формирующие пищевую систему в виде полуфабрикатов: 1 — диффузионного сока, 2 — фильтрованного сока второй сатурации, 3 — очищенного сока, 4 — сиропа, 5 — утфелей I, II, III ступеней кристаллизации**

Figure 1. **Structural diagram of the entry of sulfites into the processes of beet sugar production, forming the food system in the form of semi-finished products: 1 — diffusion juice, 2 — filtered juice of the second saturation, 3 — purified juice, 4 — syrup, 5 — massecuite I, II, III stages of crystallization**

бактерий, при этом способность их к размножению не утрачивается [2]. В производстве мармелада, зефира, пастилы, пряников и печенья с фруктовыми начинками и сухофруктами диоксид серы обеспечивает длительное сохранение натурального цвета фруктового сырья [3]. В мясе, отдельных мясных продуктах диоксид серы ингибирует развитие гнилостных процессов, стабилизирует цвет продукта и внешний вид [4]. Обработка ракообразных сульфитами позволяет улучшить их товарный вид, устраняя темные пятна на панцире, и увеличить срок годности готовой продукции [5] Популярность применения этих химических веществ в пищевой индустрии обусловлена разными, одновременно выполняемыми ими в пищевой системе технологическими функциями — предотвращение и замедление роста и развития микроорганизмов (бактерий, плесневых грибов, дрожжей), защита от окисления, стабилизация цвета, препятствие потемнению, а также небольшими материальными затратами [6,7]. Применение сульфитов в качестве пищевой добавки Е220–Е228 разрешено практически во всех странах Европейского и Евразийского союзов [8].

Действующее вещество сульфитов выражено через диоксид серы, который представляет потенциальный риск для здоровья человека: он обладает аллергенностью, токсичностью, способностью разрушать некоторые витамины (тиамин, фолиевая кислота) [6,7]. При этом диоксид серы не накапливается в организме человека, быстро окисляется ферментами сульфитоксидазами до сульфата и выводится естественным путем. Безопасная суточная норма потребления диоксида серы составляет 0,7 мг/ кг массы тела. Негативное влияние его на здоровье людей, особенно склонных к аллергическим заболеваниям, проявляется при избыточном употреблении. Поэтому содержание диоксида серы отнесено к показателям безопасности пищевой продукции, а его максимально допустимый уровень для каждого вида продукта регламентируется ТР ТС 029/2012[1]. Кроме того, если содержание сульфитов (в пересчете на диоксид серы) в пищевом продукте составляет более 10 мг/кг (л), то его указывают в маркировке. Учитывая потенциальное содержание диоксида серы в упомянутых продуктах и его возможное аллергенное воздействие на организм человека, необходим регулярный контроль количества этого вещества в пищевой продукции [9,10,11].

В практике производства белого свекловичного сахара сульфиты — диоксид серы, сульфит и гидросульфит натрия — используют не в качестве пищевой добавки, а как технологическое вспомогательное средство (ТВС). Диоксид серы отнесен к классическим обязательным ТВС, применяемым в современной технологии сахара. Сульфит и гидросульфит натрия используют в качестве деколорантов в отдельных случаях, когда необходимы дополнительные приемы для получения белого сахара требуемого качества. Являясь основным источником появления диоксида серы в белом сахаре [12], эти химические реагенты играют важную роль в формировании технологического процесса его производства. Это обусловлено тем, что ключевыми характеристиками белого сахара, определяющими его потребительские свойства и идентификацию, являются цвет (органолептический показатель) и цветность в растворе (физико-химический показатель).

Согласно ГОСТ 33222–2015[2], цвет белого сахара категорий экстра, ТС1, ТС2 должен быть белым чистым, для белого сахара категории ТС3 допускается желтоватый оттенок; цветность в растворе по категориям должна составлять соответственно не более 45,0, 60,0, 104,0, 195,0 ед. ICUMSA. Поэтому вся технология сахара направлена на решение задачи формирования в нем белого цвета. В основе ее лежит получение бесцветных прозрачных кристаллов сахарозы, которые, обладая значительной способностью светоотражения, при действии света воспринимаются как имеющие белый цвет. Свекловичный сок, находящийся в клетках ткани корнеплодов, бесцветен. Синтез красящих веществ в нем начинается с момента извлечения и продолжается по всему продуктовому технологическому потоку под действием кислорода воздуха, температуры процессов, наличия ферментов и различных соединений — продуцентов красящих веществ. В общей массе образующихся красящих веществ присутствуют характерные для полуфабрикатов сахарного производства группы: полифенольные комплексы, меланины, меланоидины, продукты карамелизации сахарозы. В технологическом потоке используют различные приемы уменьшения массы и цвета красящих веществ, к основному из них отнесено применение сульфитсодержащих реагентов.

На Рисунке 1 представлена структурная схема поступления сульфитов в процессы производства свекловичного сахара, формирующие пищевую систему, выраженную через полуфабрикаты технологического потока. Диоксид серы (сульфитационный газ) используют при формировании пищевой системы следующих полуфабрикатов: диффузионного сока (при подготовке экстрагента), очищенного сока и сиропа; сульфит натрия или гидросульфит применяют при получении утфелей I, II, III ступеней кристаллизации. Остаточные количества применяемых сульфитов регламентированы в белом сахаре: максимальный допустимый уровень диоксида серы — 15 мг/кг.

Функциональное действие сульфитов на локальные элементы пищевой системы сахарного производства имеет двойственный характер, заключающийся в переводе части содержавшихся красящих веществ в бесцветную форму и в ингибировании появления новых красящих веществ [13]. Технологический эффект возникает благодаря образующимся свободным сульфит-ионам, концентрация которых в пищевой системе составляет 0,001–0,003% от массы продукта. Механизм их действия заключается в разрушении двойных связей с непредельными хромофорными группами в красящих веществах и в переходе их в бесцветные лейкосоединения; в блокировании реакционноспособных альдегидных и кетонных групп редуцирующих соединений (моносахаридов, триоз и др.) и в торможении реакции Майяра. При этом химическая структура красящих веществ остается неизменной, изменяется только цвет. Кроме того, свободные сульфит-ионы стабилизируют реакцию среды и способствуют снижению вязкости пищевой системы. Благодаря указанным механизмам, для пищевой системы характерно нахождение в устойчивом состоянии, способствующем более эффективному протеканию технологических процессов, в т. ч. формированию белого цвета вырабатываемого сахара.

Сульфитационный газ используют с начала формирования технологии сахара, которая в целом остается неизменной в настоящее время. Сульфитационный газ получают на сахарном заводе сжиганием комовой или гранулированной серы в специальной печи при общем расходе серы 0,25–0,35 кг/т свеклы. Он содержит 12–15% диоксида серы, остальное — воздух; эффективность его использования в жидкоструйных сульфитаторах составляет 93–95%. Непрореагировавший диоксид серы по технологическому потоку удаляется с воздухом в атмосферу и вместе с фильтрационным осадком несахаров, а некоторая часть его переходит в мелассу. Средние выбросы

[1] Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 029/2012. (2012). «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств». Принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 10 июля 2012 года № 58.

[2] ГОСТ 33222–2015 «Сахар белый. Технические условия». Москва.: Стандартинформ, 2019. — 22 с.

диоксида серы в атмосферу от технологической линии свеклосахарного завода, по статистическим данным, не превышают предельно допустимый уровень (0,018 кг/т свеклы) [14]. Остаточные количества диоксида серы в белом сахаре и мелассе, по литературным данным [12,15], находятся в диапазоне, соответственно, 2–3 мг/кг и 150–315 мг/кг. В целом технологическая, безопасная и экологическая обоснованность применения диоксида серы в производстве белого сахара подтверждена двухсотлетней практикой его использования.

Сульфит натрия и гидросульфит используют в отдельных случаях как деколоранты в пищевой системе (утфели) в качестве дополнительных приемов улучшения цвета белого сахара [16]. Их применение вызвано наиболее интенсивно протекающими реакциями образования красящих веществ в утфеле. До 80% красящих веществ попадает в кристаллы сахарозы, в основном это меланоидины и продукты карамелизации сахарозы, для которых характерен цвет от соломенно-желтого до красно- и темно-коричневого. При этом красящие вещества в кристаллы сахарозы включаются по-разному: некоторые продукты карамелизации с отрицательно заряженными частицами легко адсорбируются посредством адгезии на поверхности кристаллов; меланоидины, обладая большей адсорбционной способностью по отношению к сахарозе, включаются в кристаллы за счет инклюзии. Благодаря обесцвечивающему действию сульфитов создаются оптимальные условия для формирования белого цвета у вырабатываемого кристаллического сахара. Использование их при формировании утфеля I кристаллизации способствует приданию белизны кристаллам белого сахара. Вместе с тем получение утфеля необходимого качества предусматривает введение пеногасителя для снижения пенообразования [17] и ПАВ для уменьшения вязкости [18]. Кроме того, в утфеле присутствуют остаточные количества антинакипина (до 30% от вводимой дозы), используемого при получении сиропа [19]. В результате утфель формируется под совместным воздействием разных ТВС, между которыми возможно аддитивное влияние [20]. Использование деколорантов на последней стадии получения белого сахара создает потенциальный риск увеличения содержания диоксида серы в нем, что может быть связано как с непосредственным включением в кристаллы сахара, так и с аддитивным взаимодействием применяемых ТВС. Поскольку содержание диоксида серы в белом сахаре, используемом непосредственно в пищу и в качестве сырьевого ингредиента для получения других продуктов, относится к нормируемым показателям его безопасности, возникает необходимость установления статистически значимых пределов его содержания и варьирования.

Цель исследования направлена на выявление аддитивного влияния функциональных ТВС в заданном диапазоне их доз на содержание диоксида серы в белом сахаре при формировании пищевой системы, а также на установление референтных значений данного показателя безопасности.

2. Объекты и методы

Объектом исследований являлись:

- утфель, формируемый при совместном применении пеногасителя, деколоранта и антинакипина, и полученный из него белый сахар;
- промышленные образцы белого свекловичного сахара четырех категорий (экстра, ТС1, ТС2, ТС3) по ГОСТ 33222–2015[2].

Предметом исследований было содержание диоксида серы и показатели цветовой характеристики: цветность раствора сахара и цветность утфеля. Содержание диоксида серы определяли по ГОСТ 34201–2017[3] йодометрическим методом; цветность сахара в растворе — по ГОСТ 12572–2015[4] на фотометре однолучевом Coloromat 100 (Schmidt ± Hatsch, Германия) при длине волны 420 нм; цветность утфеля — на фотометре КФК-3 («ЗОМ 3», Россия) при длине волны 560 нм и содержании массовой доли сухих веществ 15 ± 0,2% по рефрактометру DUR-SW (Schmidt ± Hatsch, Германия) согласно общепринятой в сахарном производстве методике[5].

В качестве материала для исследований послужили собственные, ранее полученные и опубликованные данные численного эксперимента об изменении указанных показателей белого сахара и утфеля (содержание диоксида серы в белом сахаре — Y_1, цветность раствора сахара — Y_2, цветность утфеля — Y_3) при совместном действии ТВС в процессе кристаллизации сахарозы [21], которые рассмотрены с точки зрения аддитивного подхода. В качестве ТВС были использованы следующие препараты в применяемых дозах: пеногаситель Лапрол ПС-7 по ТУ 2226–090–10488057–2016[6] — 4, 5 и 6 г/т утфеля; деколорант сахара сульфит натрия Е221 по ГОСТ Р 54956–2012[7] — 0, 100 и 200 г/т утфеля; антинакипин Kebo DS (Keller and Bohacec GmbH Co, Германия) — 0, 15 и 30 г/м^3 сока. Аддитивный подход включал расчет аддитивных функций для кодированных и натуральных значений переменных и оценку уровня их адекватности; выявление эффектов действия изучаемых факторов (А – пеногаситель Лапрол ПС-7, В — антинакипин Kebo DS, С — деколорант сульфит натрия) с последующей оценкой проявления аддитивности.

Исследования проводили с использованием практических положений теории планирования эксперимента на основе алгоритмов регрессионного и дисперсионного анализа. Статистическую значимость коэффициентов регрессии на уровне $p = 0,05$ определяли путем сравнения их численных значений с доверительным интервалом. Адекватность уравнений регрессии определяли по F-критерию Фишера путем проверки статистической гипотезы на основе соотношения дисперсий адекватности и воспроизводимости. Коэффициент детерминации (R^2) характеризовал совокупную долю вклада в вариацию отклика всех вошедших в модель факторов, а его численное значение, близкое к 1,0, считали индикатором степени соответствия модели расчетным данным. Эффекты влияния изучаемых ТВС рассчитывали при помощи алгоритма Йетса.

Для установления референтных значений содержания диоксида серы в белом сахаре категорий экстра, ТС1, ТС2, ТС3 формировали массив его количественных значений по данным мониторинга, проводимого испытательной лабораторией Курского Федерального аграрного научного центра. В выборку вошли 254 образца сахара, выработанных 58 российскими свеклосахарными заводами (90% от общего числа заводов) из 18 регионов страны (что составляет 90% регионов, где расположены заводы) в период с 2016 по 2023 гг. Выборки не содержали образцы белого сахара, полученные с использованием сульфитсодержащих деколорантов. Установление референтных значений содержания диоксида серы проводили с учетом характера распределения на основе методов математической статистики, включающих предварительное исследование функций распределения случайных величин. Гипотезу о нормальном распределении проверяли с помощью критерия Колмогорова-Смирнова ($\lambda_{эмп}$) и расчетных значений показателей асимметрии, эксцесса, выборочной средней, моды, медианы и коэффициента вариации [22,23,24]. Расчет доверительных интервалов осуществляли в соответствии с классической интервальной оценкой генеральной средней нормально распределенной случайной величины показателей при уровне значимости $p = 0,05$. Обработка и представление полученных результатов выполнены с помощью программ MS Excel, XLSTAT 2013.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Аддитивное влияние сульфитсодержащего деколоранта, пеногасителя и антинакипина на показатель безопасности белого сахара

Полученные на основе собственного численного эксперимента [21] регрессионные уравнения для кодированных переменных (1–3) адекватно отражали совокупное влияние пеногасителя Лапрол ПС-7 (фактор *A*), антинакипина Kebo DS (фактор *B*) и деколоранта сульфита натрия (фактор *C*) на содержание диоксида серы (Y_1), на цветность раствора белого сахара (Y_2) и на цветность утфеля (Y_3). Это подтверждается соответствием фактических значений критерия Фишера ($F_{факт} < F_{табл}$ при $p = 0,05$) и высокими значениями коэффициентов детерминации ($R^2 = 0,97–0,99$ и $R^2_{adj} = 0,94–1,00$):

$$Y_1 = 4,09 \pm 0,09A \pm 0,46B \pm 2,28C$$
$$F_{факт} = 1,48;\ F_{табл} = 2,80;\ R^2 = 0,97;\ R^2_{adj} = 0,94 \quad (1)$$

$$Y_2 = 66,24 - 0,48A \pm 4,30B - 26,60C \pm 16,66CC$$
$$F_{факт} = 0,11;\ F_{табл} = 2,85;\ R^2 = 0,99;\ R^2_{adj} = 1,00 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1561 - 5,00A \pm 30,25B - 231,8C \pm 108,5CC$$
$$F_{факт} = 0,14;\ F_{табл} = 2,85;\ R^2 = 0,99;\ R^2_{adj} = 1,00 \quad (3)$$

Влияние изучаемых ТВС, применяемых при получении утфеля, проявило аддитивную направленность действия. Это видно из максимального приближения алгебраических сумм эффектов влияния

[3] ГОСТ 34201–2017 «Сахар. Определение диоксида серы йодометрическим методом». Москва.: Стандартинформ, 2017. — 12 с.

[4] ГОСТ 12572–2015 «Сахар. Метод определения цветности». Москва.: Стандартинформ, 2017. — 10 с.

[5] Чернявская Л. И., Адамович В. П., Зотова Ю. А. Определение цветности сахара и продуктов сахарного производства. М.: ООО «Сахар», 2007. — 93 с.

[6] ТУ 2226–090–10488057–2016 «Лапрол ПС-7. Технические условия». Нижнекамск: ОАО «Нижнекамснефтехим», 1994.

[7] ГОСТ Р 54956–2012 «Добавки пищевые. Консерванты пищевых продуктов. Термины и определения». Москва: Стандартинформ, 2019. —16 с.

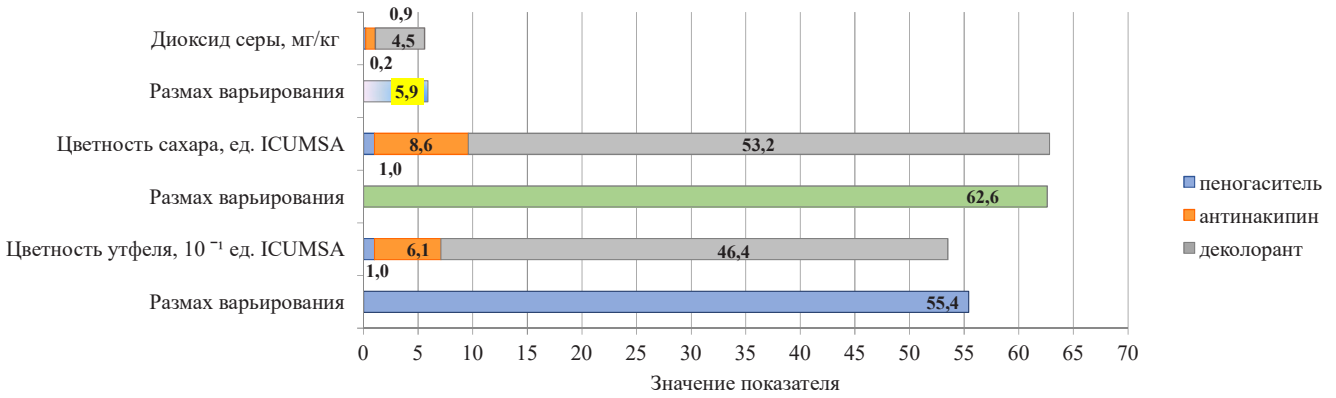


Рисунок 2. **Эффекты аддитивного влияния изучаемых ТВС на изменение уровня содержания диоксида серы в белом сахаре, цветности сахара и утфеля (p=0,05)**

Figure 2. **Effects of the additive influence of the studied technological processing aids on changes in the level of the sulfur dioxide content in white sugar, color of sugar and massecuite (p=0.05)**

каждого средства в отдельности на показатели к размаху их варьирования (Рисунок 2). Сумма эффектов действия Лапрола ПС-7, Kebo DS и сульфита натрия на изменение содержания диоксида серы и цветности раствора белого сахара, цветности утфеля составила соответственно 5,6%, 62,8% и 53,4%; размах варьирования показателей был равен соответственно 5,9, 62,6 и 55,4, а различия не превышали $НСР_{0,05}$. При этом аддитивное влияние ТВС на показатели белого сахара и утфеля наиболее заметно проявилось на максимальных уровнях дозирования средств.

Аддитивное технологическое влияние указанных ТВС на рассматриваемые показатели можно объяснить следующим. С точки зрения формирования белого цвета сахара доминирующим в композиции средств был деколорант. Выполняя свое функциональное обесцвечивающее действие, он приводил к изменению окраски красящих веществ жидкой фазы утфеля, в результате цветовые показатели утфеля и белого сахара значительно улучшились — снизилась их цветность. В работе [25] показана эффективность применения деколорантов при получении высококачественного сахара — сахара высокой поляризации и низкой цветности. Пеногаситель, выполняя свои основные функции (снижение пенообразования и вязкости), оказывал незначительное положительное влияние на эффективность действия деколоранта. Действие антинакипина, направленное на дефлокуляцию, приводило к появлению мутности в виде нерастворимых диспергированных солей кальция как в жидкой, так и в твердой фазе утфеля. В работах [26,27] отмечено, что эти соли кальция представлены карбонатами, сульфатами и оксалатами, что обусловлено известково-углекислотной и сульфитационной очистками свекловичного сока. Указанное приводило к повышению содержания золы и к ухудшению цветовой характеристики утфеля и, соответственно, белого сахара. Полученные результаты сопоставимы с данными [28] о прямой взаимосвязи содержания золы в сахаре и его цветности, что объясняется наибольшим содержанием зольных элементов и красящих веществ в пленке, находящейся на поверхности кристаллов. В итоге антинакипин вызывал снижение результативности функционального действия деколоранта.

На Рисунке 3 показана динамика изменения цветности утфеля от влияния деколоранта сахара и антинакипина на фоне пеногасителя при дозе 5 г/т утфеля. Отраженная на Рисунке 3 поверхность отклика свидетельствовала о закономерном значительном снижении цветности утфеля при увеличении дозы деколоранта. Антинакипин, присутствующий в утфеле, отрицательно влиял на его цветность и в дальнейшем способствовал увеличению цветности раствора белого сахара. Эти данные согласуются с результатами других исследователей [28,29].

С точки зрения безопасности белого сахара в изучаемой композиции (Рисунок 2) также главным выступает деколорант, который обеспечивает поступление диоксида серы в кристаллы. Попадание диоксида серы в сахар возможно, как показано в работе [30], за счет инклюзий — адсорбции на поверхности растущих кристаллов сахарозы различных химических соединений межкристального раствора утфеля, в т. ч. сульфитов, и окклюзий — механического включения образующимися и растущими кристаллами межкристального раствора. Динамика изменения содержания диоксида серы в белом сахаре под влиянием деколоранта сахара (С) и пеногасителя (А) на фоне антинакипина (В) при дозе 30 г/м^3 сока показана на Рисунке 4. Из Рисунка 4 видно, что с повышением дозы деколоранта содержание диоксида серы в белом сахаре плавно возрастало. Соблюдение оптимальных доз введенного в пищевую систему сульфита натрия в интервале 100–200 г/т утфеля позволяло избежать превышения допустимого уровня содержания диоксида серы в белом сахаре (10 мг/кг). При этом увеличение минимальной оптимальной дозы деколоранта до максимальной приводило к повышению содержания диоксида серы в белом сахаре в 1,7 раза.

Полученные данные могут быть использованы при применении деколорантов в практике промышленного производства белого сахара.

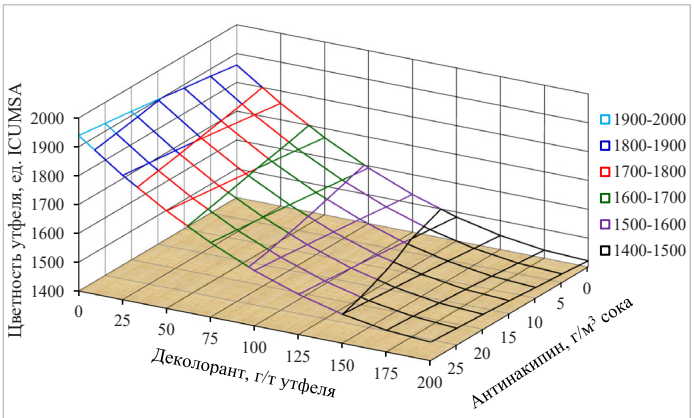


Рисунок 3. **Зависимость цветности утфеля от влияния деколоранта и антинакипина на фоне пеногасителя в дозе 5 г/т утфеля (p=0,05)**

Figure 3. **Dependence of massecuite color on the influence of the decolorant and anti-scale agent against the background of the defoamer at a dose of 5 g/t of massecuite (p=0.05)**

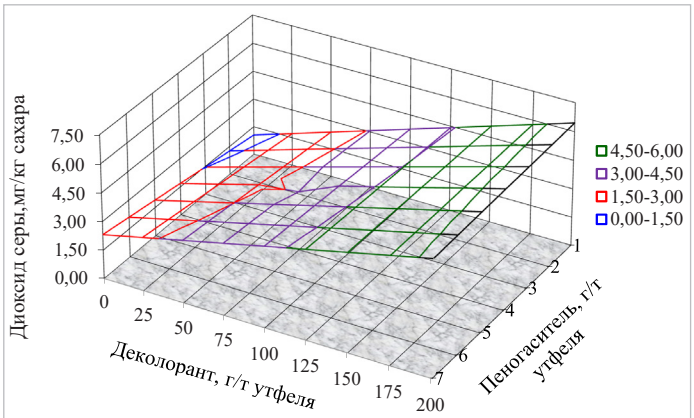


Рисунок 4. **Зависимость содержания диоксида серы в белом сахаре от влияния деколоранта и пеногасителя на фоне антинакипина в дозе 30 г/м^3 сока (p=0,05)**

Figure 4. **Dependence of the sulfur dioxide content in white sugar on the influence of the decolorant and defoamer against the background of the anti-scale agent at a dose of 30 g/m^3 of juice (p=0.05)**

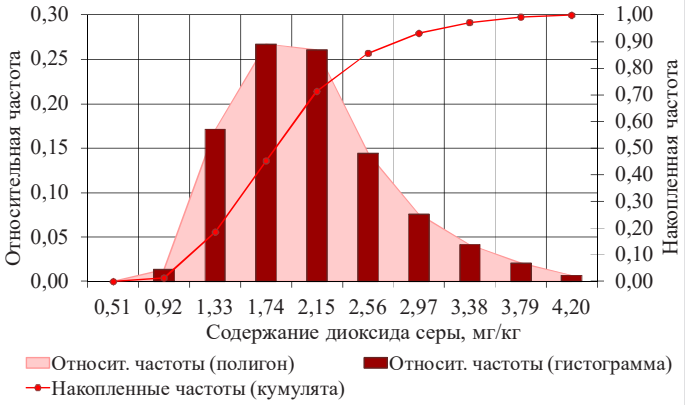


Рисунок 5. **Распределение значений вариационного ряда содержания диоксида серы в белом сахаре категории ТС2**

Figure 5. **Distribution of values of the variation series of the sulfur dioxide content in white sugar of TC2 category**

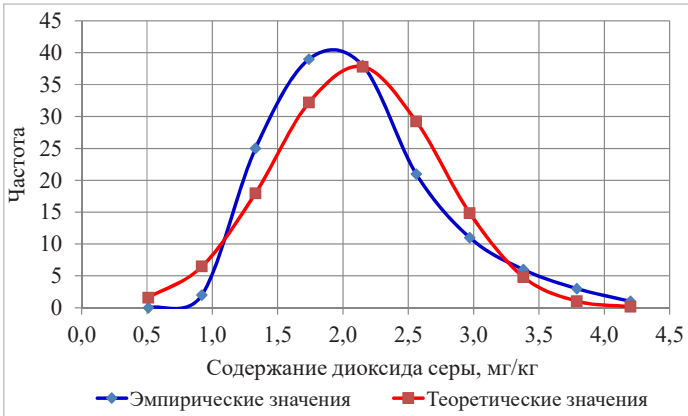


Рисунок 6. **Эмпирические и теоретические частоты значений вариационного ряда содержания диоксида серы в белом сахаре категории ТС2**

Figure 6. **Empirical and theoretical frequencies of values of the variation series of the sulfur dioxide content in white sugar of TC2 category**

3.2. Референтные значения содержания диоксида серы в белом сахаре

По результатам обработки интервальных вариационных рядов получены диаграммы и графики распределения содержания диоксида серы в белом сахаре по каждой из четырех категорий для их визуального анализа. На Рисунке 5 представлены гистограмма, кумулята и полигон распределения для белого сахара категории ТС2. Из Рисунка видно, что полигон полученного распределения частот по форме близок к колоколообразной кривой нормального распределения.

Степень согласованности этих же мониторинговых данных с законом нормального распределения показана на Рисунке 6. Кривые графиков свидетельствовали о близости абсолютных значений эмпирических и теоретических частот, характеризующих степень проявления нормального закона.

В целом визуальный анализ характера распределения содержания диоксида серы в белом сахаре всех категорий показал соответствие их нормальному.

Результаты проверки нулевой гипотезы о соответствии фактического распределения вариационных рядов содержания диоксида серы в белом сахаре четырех категорий нормальному распределению приведены в Таблице 1. Из данных следует, что подтвержденная нулевая гипотеза непараметрического теста Колмогорова-Смирнова указывала на соответствие распределений нормальному закону. Также наличие нормального распределения подтверждено близкими значениями среднего арифметического, медианы и моды; коэффициент вариации не превышал предельного уровня 35%.

К другим числовым характеристикам, на основе которых можно определить степень соответствия вариационного ряда закону нормального распределения, относят коэффициенты асимметрии и эксцесса. Приведенные в Таблице 2 статистические критерии дополнительно демонстрировали заметную степень сходимости фактических и теоретических частот нормального распределения, т. е. имели асимптотически нормальные распределения.

Полученные данные о характере распределения вариационных рядов содержания диоксида серы в белом сахаре позволили определить величину доверительного интервала для математического ожидания референтных значений (Таблица 3).

Из данных Таблицы видно, что референтные значения содержания диоксида серы в белом сахаре по мере снижения его категории имели тенденцию к увеличению. При этом они ниже пороговых значений — максимального допустимого уровня 15 мг/кг и уровня, указываемого в маркировке 10 мг/кг, а также уровня для производств алкогольных напитков и напитков длительного хранения 6 мг/кг [31].

Установленные референтные значения могут быть использованы на сахарных заводах в системе производственного контроля. Также они будут служить доказательной базой сравнения и оценки показателя безопасности белого сахара для промышленных потребителей. Дальнейшие исследования будут направлены на определение референтных интервалов остаточных количеств других применяемых ТВС в белом сахаре.

4. Выводы

Обосновано технологическое и безопасное применение сульфитов (диоксида серы, сульфита натрия и гидросульфита натрия) в пищевой системе производства белого свекловичного сахара. В численном эксперименте изменение содержания диоксида серы

Таблица 1. **Оценка вариационного ряда содержания диоксида серы в белом сахаре (мг/кг) на соответствие нормальному распределению по тесту Колмогорова-Смирнова и параметрическим критериям**

Table 1. **Assessment of the variation series of the sulfur dioxide content in white sugar (mg/kg) for compliance with normal distribution using the Kolomogorov-Smirnov test and parametric criteria**

Категория сахара	По относительным значениям частот			Косвенные параметрические статистические критерии			
	$\lambda_{эмп}$	$\lambda_{крит}$ (p=0,05)	H_0 (нулевая гипотеза)	Среднее	Медиана	Мода	Коэффициент вариации, %
Экстра	–0,129	0,248	Да	1,28	1,25	1,00	23,5
ТС1	–0,140	0,430	Да	1,48	1,40	1,45	31,2
ТС2	0,052	0,109	Да	1,89	1,80	1,90	33,3
ТС3	–0,187	0,248	Да	2,69	2,70	2,70	30,6

Примечание: в графе Таблицы словом «да» обозначено принятие нулевой гипотезы при $\lambda_{эмп} < \lambda_{крит}$, p=0,05.

Таблица 2. **Оценка вариационного ряда содержания диоксида серы в белом сахаре (мг/кг) на соответствие нормальному распределению по коэффициентам асимметрии и эксцесса**

Table 2. **Assessment of the variation series of the sulfur dioxide content in white sugar (mg/kg) for compliance with the normal distribution according to the coefficients of skewness and kurtosis**

Категория сахара	Коэффициент асимметрии (A_s)	Ошибка A_s	H_0 (нулевая гипотеза) $tA_s < 3$	H_0 (нулевая гипотеза) $A_s < A_{s\,крит.}$	Эксцесс (E_x)	Ошибка E_x	H_0 (нулевая гипотеза) $tE_x < 3$	H_0 (нулевая гипотеза) $E_x < E_{x\,крит.}$
Экстра	0,65	0,414	Да	Да	–0,82	0,688	Да	Да
ТС1	0,46	0,661	Да	Да	–0,26	0,768	Да	Да
ТС2	0,54	0,213	Да	Да	–0,20	0,375	Да	Да
ТС3	0,53	0,441	Да	Да	1,29	0,713	Да	Да

Примечание: показано сопоставление эмпирических коэффициентов с критическими значениями при p=0,05.

Таблица 3. **Референтные значения (РЗ) и доверительные интервалы (ДИ) массовой доли диоксида серы (мг/кг) в белом сахаре**

Table 3. **Reference values (RV) and confidence intervals (CI) for the mass fraction of sulfur dioxide (mg/kg) in white sugar**

Категория сахара	Референтное значение	Доверительный интервал (p=0,05)	Нижнее предельное значение	Верхнее предельное значение
Экстра	1,28	0,11	1,18	1,39
ТС1	1,48	0,31	1,17	1,79
ТС2	1,89	0,10	1,79	2,00
ТС3	2,69	0,32	2,37	3,01

Примечание: доверительный интервал представлен в виде произведения критерия Стьюдента ($t_{0,05}$) и стандартной ошибки при p=0,05.

в белом сахаре под влиянием пеногасителя Лапрола ПС-7, антинакипина Kebo DS и деколоранта сульфита натрия в применяемых дозах в утфеле происходило в соответствии с принципом аддитивности. Наличие аддитивного свойства подтверждено максимальным приближением алгебраической суммы эффектов влияния каждого средства, составляющей 5,6%, к размаху варьирования значений содержания диоксида серы — 5,9 при уровне значимости p=0,05. Установлена зависимость содержания диоксида серы в белом сахаре в пределах 0–6,5 мг/кг от влияния деколоранта и пеногасителя в диапазоне доз 100–200 и 4–6 г/т утфеля. Выявлено, что увеличение минимальной оптимальной дозы деколоранта до максимальной приводило к повышению содержания диоксида серы в белом сахаре в 1,7 раза. Рассчитаны референтные интервалы содержания диоксида серы в белом сахаре четырех категорий — 1,17–3,01 мг/кг, выполнено их сравнение с пороговыми уровнями. Полученные значения оказались ниже максимального допустимого уровня для белого сахара (15 мг/кг), уровня, указываемого в маркировке пищевой продукции (10 мг/кг), и требуемого уровня для производств алкогольных напитков и напитков длительного хранения (6 мг/кг). С учетом полученных результатов необходимо проведение дальнейших исследований для установления статистически значимых пределов остаточных количеств действующих веществ других функциональных ТВС в белом сахаре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Guido, L. F. (2016). Sulfites in beer: Reviewing regulation, analysis and role. *Scientia Agricola*, 73(2), 189–197. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0290
2. Танащук, Т. Н., Шаламитский, М. Ю., Загоруйко, В. И., Семенова, К. А., Иванова, Е. В., Кишковская, С. А. (2022). Влияние диоксида серы на рост природных штаммов молочнокислых бактерий вина. *Магарач. Виноградарство и виноделие*, 24(4), 381–386. [Tanashchuk, T. N., Shalamitsky, M. Yu., Zagoruiko, V. I., Semenova, K. A., Ivanova, E. V., Kishkovskaya, S. A. (2022). The effect of sulfur dioxide on the growth of original strains of lactic acid bacteria in wine. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 24(4), 381–386. (In Russian)] https://doi.org/10.34919/IM.2022.88.74.012
3. Кондратьев, Н. Б., Казанцев, Е. В., Осипов, М. В., Руденко, О. С., Крылова, Э. Н. (2018). Определение источников поступления диоксида серы в кондитерские изделия. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий,* 80(4), 203–208. [Kondratyev, N. B., Kazantsev, E. V., Osipov, M. V., Rudenko, O. S., Krylova, E. N. (2018). Determination of sources of sulfur dioxide in confectionery. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(4), 203–208 (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-203-208
4. D'Amore, T., Di Taranto, A., Berardi, G., Vita, V., Marchesani, G., Chiaravalle, A. E. et al. (2020). Sulfites in meat: Occurrence, activity, toxicity, regulation, and detection. A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5), 2701–2720. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12607
5. Berardi, G., Di Taranto, A., Vita, V., Marchesani, G., Iammarino, M. (2022). Effect of different cooking treatments on the residual level of sulphites in shrimps. *Italian Journal of Food Safety*, 11(3), Article 10029. https://doi.org/10.4081/ijfs.2022.10029
6. Егорова, О. С., Акбулатова, Д. Р., Шилкин, А. А. (2023). Факторы, влияющие на качество и сроки годности напитков брожения из плодового сырья: обзор предметного поля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2, 14–32. [Egorova, O. S., Akbulatova, D. R., Shilkin, A. A. (2023). Factors affecting the quality and shelf life of fermented beverages from fruit raw materials: Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, 2, 14–32. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2023.447
7. Popescu, C., Postolache, E., Ciubucă, A., Rapeanu, G., Hopulele, T. (2010). Influence of sulfitation on the dynamics of the activity of oxidizing enzymes in white grapes. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering,* 11(2), 277–288.
8. Демченко, Е. А. (2022). Анализ стандартов Евразийского экономического союза на кондитерские изделия. *Техника и технология пищевых производств*, 52(4), 819–834. [Demchenko, E. A. (2022). Confectionery standards in the Eurasian Economic Union. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 819–834 (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2409
9. Zhang, J., Zhong, S., Zhao, K., Liu, Z., Dang, Z., Liu, Y. (2022). Sulfite may disrupt estrogen homeostasis in human via inhibition of steroid arylsulfatase. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 19913–19917. https://doi.org/10.1007/s11356-021-18416-z
10. Lou, T., Huang, W., Wu, X., Wang, M., Zhou, L., Lu, B. et al. (2017). Monitoring, exposure and risk assessment of sulfur dioxide residues in fresh or dried fruits and vegetables in China. *Food Additives and Contaminants: Part A,* 34(6), 918–927. https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1313458
11. Шевченко, С. Е. (2019). Мониторинг продукции переработки фруктов и овощей. *Контроль качества продукции*, 12, 53–60. [Shevchenko, S. E. (2019). Monitoring of products processed from fruit and vegetables. *Production Quality Control*, 12, 53–60. (In Russian)]
12. Егорова, М. И., Широких, Е. В., Кретова, Я. А. (2016). Результаты мониторинга содержания диоксида серы в сахаре. *Сахар*, 7, 39–41. [Egorova, M. I., Shirokikh, E. V., Kretova, Y. A. (2016). Results of monitoring of the sulfur dioxide content in sugar. *Sugar*, 7, 39–41. (In Russian)]
13. Даишева, Н. М., Городецкий, В. О., Семенихин, С. О., Усманов, М. М. (2022). Влияние сульфитационной обработки полупродуктов свеклосахарного производства на процесс ингибирования образования интенсивно окрашенных высокомолекулярных соединений. *Новые технологии*, 18(3), 24–35. [Daisheva, N. M., Gorodetsky, V. O., Semenikhin, S. O., Usmanov, M. M. (2022). The effect of sulfitation treatment of beet-sugar production semi-products on the process of intensively colored high molecular compounds inhibition. *New Technologies*, 18(3), 24–35. (In Russian)] https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-3-24-35
14. Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., Тужилкин, В. И. (2022). Экологическая оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух свеклосахарными заводами. *Экология и промышленность России*, 26(3), 10–16. [Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Tuzhilkin, V. I. (2022). Environmental assessment of emissions of pollutants into the atmospheric air by sugar beet factories. *Ecology and Industry of Russia*, 26(3), 10–16. (In Russian)] https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-3-10-16
15. Егорова, М. И., Широких, Е. В., Кретова, Я. А., Райник, В. В. (2016). Йодометрия при исследовании сахаросодержащих растворов. *Сахар*, 10, 36–39. [Egorova, M. I., Shirokikh, E. V., Kretova, Y. A., Raynik, V. V. (2016). Iodimetry in investigation of sugar containing solutions. *Sugar*, 10, 36–39. (In Russian)]
16. Беляева, Л. И., Остапенко, А. В., Лабузова, В. Н. Сысоева, Т. И. (2018). Деколоранты сахара — новая функциональная группа технологических вспомогательных средств. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4(364), 33–35. [Belyaeva, L. I., Ostapenko, A. V., Labuzova, V. N. Sysoeva, T. I. (2018). Sugar decolorants — new functional group of technological supporting means. *Izvestiya Vuzov. Food Technology,* 4(364), 33–35. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2018.4.8
17. Костенко, Т. И., Коноплева, Н. С., Короткова, Н. П., Рудич, Т. В., Стрельников, С. Ю. (2017). Новый пеногаситель для сахарного производства марки «Лапрол ПС-7» от компании «Макромер». *Сахар*, 4, 26–27. [Kostenko, T. I., Konopleva, N. S., Korotkova, N. P., Rudich, T. V., Strelnikov, S. Yu. (2017). New defoamer for sugar production of the brand "Laprol PS-7" from the company "Macromer". *Sugar*, 4, 26–27. (In Russian)]
18. Славянский, А. А., Грибкова, В. А., Николаева, Н. В., Митрошина, Д. П. (2021). Физико-химические основы промышленной кристаллизация сахарозы. *Сахар*, 4, 28–33. [Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A., Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P. (2021). Physico-chemical foundations of industrial crystallization of saccharose. *Sugar*, 4, 28–33. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-4-28-33
19. Беляева, Л. И., Остапенко, А. В., Лабузова, В. Н., Сысоева, Т. И. (2018). Состояние пищевой системы утфеля I кристаллизации при совокупном действии ПАВ, деколоранта сахара, антинакипина. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 80(4), 151–155. [Belyaeva, L. I., Ostapenko, A. V., Labuzova, V. N., Sysoeva, T. I. (2018). The state of the I crystallization massecuite food system with the cumulative effect of surfactants, sugar decolorant, descaling agent. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(4), 151–155. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-4-151-155
20. Беляева, Л. И., Пружин, М. К., Остапенко, А. В., Сысоева, Т. И. (2022). Выявление аддитивного влияния технологических вспомогательных средств в производстве свекловичного белого сахара. *Достижения науки и техники АПК*, 36(10), 84–88. [Belyaeva, L. I., Pruzhin, M. K., Ostapenko, A. V., Sysoeva, T. I. (2022). Identification of the additive effect of technological aids in the production of beet white sugar. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 36(10), 84–88. (In Russian)]
21. Беляева, Л. И., Пружин, М. К., Остапенко, А. В. (2022). Оценка влияния технологических вспомогательных средств на процесс кристаллизации сахарозы посредством метода численного эксперимента. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 4(388), 30–36. [Belyaeva, L. I., Pruzhin, M. K., Ostapenko, A. V. (2022). Evaluation of the effect of technological aids on the process of sucrose crystallization by the method of numerical experiment. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(388), 30–36. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.4.5
22. Лемешко, Б. Ю., Лемешко, С. Б. (2021). Проблемы применения непараметрических критериев согласия в задачах обработки результатов измерений. *Системы анализа и обработки данных,* 2(82), 47–66. [Lemeshko, B. Yu., Lemeshko, S. B. (2021). Problems of nonparametric goodness-of-fit test application in tasks of measurement results processing. *Analysis and Data Processing Systems*, 2(82), 47–66. (In Russian)] https://doi.org/10.17212/2782-2001-2021-2-47-66
23. Александровская, Л. Н., Кириллин, А. В., Кербер, О. Б. (2017). Выбор ряда критериев проверки отклонения распределения вероятностей от нормального закона в практике инженерного статистического анализа. *Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления*, 1, 42–52. [Aleksandrovskaya, L. N., Kirillin, A. V., Kerber, O. B. (2017). Choice of some criteria of checking a deviation of the probability distribution from the normal probability law in practice of engineering statistical analysis. *Works of Federal State Unitary-Enterprise Academician Pilyugin Scientific-Production Center of Automatics and Instrument-Vaking*, 1, 42–52. (In Russian)]
24. Durakovic, B. (2017). Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Scinces*, 5(3), 421–439. http://doi.org/10.21533/pen.v5i3.145
25. Sarir, E. M., Pabon, B. R. (2017). High performance decolorants and color precipitants for VHP sugar production. *International Sugar Journal*, 119, Article 1421.
26. Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., Тужилкин, В. И., Филатов, С. Л. (2017). Повышение качества свекловичного сахара до экспортного уровня. *Сахар*, 5, 30–33. [Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Tuzhilkin, V. I., Filatov, S. L. (2017). Increasing quality of beet sugar to the export value. *Sugar*, 5, 30–33. (In Russian)]
27. Abdel-Rahman, El-S., Floeter, E. (2016). Physico-chemical characterization of turbidity-causing particles in beet sugar solutions. *International Journal of Food Engineering*, 12(2), 127–137. https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0129

28. Чернявская, Л. И. (2017). Как добиться качества сахара экспортного потенциала? *Сахар*, 6, 22–27. [Chernyavskaya, L. I. (2017). How to achieve sugar quality of the export potential? *Sugar*, 6, 22–27. (In Russian)]
29. Савостин, А. В., Городецкий, В. О. (2014). Сравнительная оценка эффективности действия антинакипинов при выпаривании соков свеклосахарного производства. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6, 102–106. [Savostin, A. V., Gorodetskiy, V. O. (2014). Comparative evaluation of effectiveness antiscales on evaporation of juice of beet sugar production. *Izvestiya Vusov. Food Technology*, 5–6, 102–106. (In Russian)]
30. Николаева, Н. В., Митрошина, Д. П., Славянский, А. А., Грибкова, В. А., Лебедева, Н. Н. (2021). Кристаллы сахарозы как основа сахаросодержащих продуктов. *Сахар*, 8, 34–38. [Nikolaeva, N. V., Mitroshina, D. P., Slavyansky, A. A., Gribkova, V. A., Lebedeva, N. N. (2021). Кристаллы сахарозы как основа сахаросодержащих продуктов. *Sugar*, 8, 34–38. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2413-5518-2021-8-34-38
31. Чернявская, Л. И. (2009). Контроль сахарного производства в зависимости от требований потребителей сахара: технологические аспекты. *Сахар*, 7, 39–47. [Chernyavskaya, L. I. (2009). Control of sugar production depending on the requirements of sugar consumers: Technological aspects. *Sugar*, 7, 39–47. (In Russian)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Беляева Любовь Ивановна — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория технологий сахара и методов контроля продукции, Курский федеральный аграрный научный центр 305021, Россия, Курск, ул. Карла Маркса, 70б Тел.: +7–4712–58–05–62 E-mail: belyaeva_li@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-6063 * автор для контактов	**Lyubov I. Belyaeva,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Laboratory of Sugar Technologies and Product Control Methods, Leading Researcher, Federal Agricultural Kursk Research Center 70b, Karla Marksa Str., 305021, Kursk, Russia Tel.: +7–4712–58–05–62 E-mail: belyaeva_li@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6099-6063 * corresponding author
Пружин Михаил Константинович — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, старший научный сотрудник, лаборатория технологий сахара и методов контроля продукции, Курский федеральный аграрный научный центр 305021, Россия, Курск, ул. Карла Маркса, 70б Tel.: +7–960–673–23–24 E-mail: mihailpruzin@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5977-771X	**Mikhail K. Pruzhin,** Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Senior Researcher, Laboratory of Sugar Technologies and Product Control Methods, Federal Agricultural Kursk Research Center 70 b, Karla Marksa Str., 305021, Kursk, Russia Tel.: +7–960–673–23–24 E-mail: mihailpruzin@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5977-771X
Остапенко Алла Владимировна — старший научный сотрудник, лаборатория технологий сахара и методов контроля продукции, Курский федеральный аграрный научный центр 305021, Россия, Курск, ул. Карла Маркса, 70б Tel.: +7–951–312–94–22 E-mail: ostapenko.al@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7111-9939	**Alla V. Ostapenko,** Senior Researcher, Laboratory of Sugar Technologies and Product Control Methods, Federal Agricultural Kursk Research Center 70 b, Karla Marksa Str., 305021, Kursk, Russia Tel.: +7–951–312–94–22 E-mail: ostapenko.al@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7111-9939
Власенко Анна Сергеевна — младший научный сотрудник, лаборатория технологий сахара и методов контроля продукции, Курский федеральный аграрный научный центр 305021, Россия, Курск, ул. Карла Маркса, 70б Tel.: +7–4712–53–74–01 E-mail: aniuta.kurdiuckova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5998-8699	**Anna S. Vlasenko,** Junior Researcher, Laboratory of Sugar Technologies and Product Control Methods, Federal Agricultural Kursk Research Center 70 b, Karla Marksa Str., 305021, Kursk, Russia Tel.: +7–4712–53–74–01 E-mail: aniuta.kurdiuckova@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5998-8699
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-375-383

Поступила 25.04.2024
Поступила после рецензирования 14.08.2024
Принята в печать 16.08.2024
© Ситникова П. Б., Казакова Н. В., 2024

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

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПАРТИКУЛЯТОВ СЫВОРОТОЧНЫХ БЕЛКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ МОРОЖЕНОГО И ДРУГИХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Ситникова П. Б.*, Казакова Н. В.

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
мороженое, микропартикулят сывороточных белков, жирность, молочные продукты

АННОТАЦИЯ

Целью настоящей статьи является систематизация данных о применении микропартикулятов сывороточных белков (МПСБ) в производстве мороженого и других молочных продуктов. Приведена информация о сущности процесса микропартикуляции и о способах производства МПСБ, а также данные о составе и физико-химических свойствах жидких и сухих МПСБ. Описано влияние размеров частиц МПСБ на качественные показатели продуктов с их использованием. В большинстве проанализированных работ указано, что диаметр частиц составляет 1,0–2,5 мкм. Однако по этому показателю получены противоречивые данные — если учесть результаты всех работ, то размер конгломератов может быть от 0,5 до 12 мкм. Такие размеры сопоставимы с параметрами жировых шариков, что позволяет рецепторам ротовой полости человека воспринимать их идентично. Благодаря этому, МПСБ можно использовать в качестве имитатора молочного жира. Отмечено, что процесс микропартикуляции позволяет создавать МПСБ с заданными функциональными свойствами, а именно с определенными характеристиками по показателям «растворимость», «влагоудерживающая способность», «гелеобразование», «эмульгирующие и пенообразующие свойства». Отражены сведения об особенностях применения и дозировках МПСБ в таких кисломолочных продуктах, как йогурт, кефир, творог и сыр. Особое внимание уделено результатам исследований применения МПСБ в мороженом. Отмечено, что чаще всего ученые использовали МПСБ с целью восполнения ощущения жирности в обезжиренных и нежирных молочных продуктах. Выделена способность МПСБ повышать биологическую ценность пищевых продуктов. Сделан вывод о том, что МПСБ позволяет сформировать в маложирных молочных продуктах мягкую и эластичную структуру, интенсифицировать молочный цвет и ограничить рост кристаллов льда в замороженных десертах посредством связывания и равномерного распределения влаги. Получены данные о клиническом исследовании влияния мороженого, содержащего МПСБ, на здоровье детей и взрослых. Отрицательного влияния МПСБ на показатели клинических анализов людей и на их здоровье не выявлено.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию FGUS-2022-0013 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 25.04.2024
Accepted in revised 14.08.2024
Accepted for publication 16.08.2024
© Sitnikova P. B., Kazakova, N. V., 2024

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

APPLICATION OF WHEY PROTEIN MICROPARTICULATES IN THE PRODUCTION OF ICE CREAM AND OTHER DAIRY PRODUCTS

Polina B. Sitnikova*, Natalia V. Kazakova

All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, Moscow, Russia

KEY WORDS:
ice cream, whey protein microparticulate, fat content, dairy products

ABSTRACT

The aim of this paper is to systemize data on the use of whey protein microparticulates (WPMP) in production of ice cream and other dairy products. Information about the essence of the microparticulation process and methods for WPMP production is given. Data on the composition and physico-chemical properties of liquid and dry WPMP are presented. An effect of sizes of WPMP particles on quality characteristics of products made with their use is described. The majority of the analyzed studies indicate that the diameter of particles is 1.0–2.5 μm. However, contradictory data were obtained for this indicator — if the results of all studies are taken into consideration, a size of conglomerates can be 0.5 to 12 μm. These sizes are comparable with parameters of fat globules, which allow receptors of the human oral cavity to perceive them identically. Due to this, WPMP can be used as an imitator of milk fat. It is noted that the microparticulation process enables producing WPMP with targeted functional properties, namely, with particular characteristics by indicators “solubility”, “water holding capacity”, “gel formation”, “emulsifying and foam forming properties”. Information about the specific features of using and dosing WPMP in fermented milk products, such yogurt, kefir, curd cheese and cheese, is given. A special attention is paid to the results of the investigation of using WPMP in ice cream. It is noted that most often scientists used WPMP to make up for the sensation of fatness in defatted and nonfat dairy products. The ability of WPMP to increase the biological value of food products is highlighted. It has been concluded that WPMP enables formation of soft and elastic structure in low-fat dairy products, intensification of milky color and restriction of ice crystal growth in frozen desserts by binding and equally distributing moisture. The data were obtained about the clinical investigation of an effect of ice cream with WPMP on the health of children and adults. The negative effect of WPMP on the indicators of clinical analyses of humans and their health was not revealed.

FUNDING: The article is prepared as part of the research under the state assignment No. FGUS-2022-0013 of V. M. Gorbatov Federal State Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Ситникова, П. Б., Казакова, Н. В.** (2024). Применение микропартикулятов сывороточных белков в производстве мороженого и других молочных продуктов. *Пищевые системы*, 7(3), 375–383. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-375-383

FOR CITATION: **Sitnikova, P. B., Kazakova, N. V.** (2024). Application of whey protein microparticulates in the production of ice cream and other dairy products. *Food Systems*, 7(3), 375–383. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-375-383

1. Введение

Данная статья продолжает публикацию [1], посвященную анализу научной литературы о результатах обогащения мороженого сывороточными и молочными белками, в качестве источников которых рассмотрены подсырная и творожная сыворотка, концентраты, изоляты и гидролизаты сывороточных белков, мицелярный казеин. Однако, наряду с упомянутыми ресурсами, в качестве источников сывороточных белков в пищевой промышленности применяют также микропартикуляты сывороточных белков (МПСБ).

МПСБ представляют собой концентраты сывороточных белков, состав и свойства которых модифицированы с применением процесса микропартикуляции.

Наиболее перспективным направлением их применения является использование в составе маложирных продуктов питания, обладающих востребованными потребительскими свойствами.

Идею использовать микрогранулированный белок в качестве имитатора жира предложили в 1984 г. канадские изобретатели Norman S. Singer, Shoji Yamamoto и Joseph Latella, которые установили, что частицы сферической формы размером 1 мкм ощущаются при разжевывании так же, как жир [2,3].

Уже в 1990 г. вышла статья, в которой охарактеризованы органолептические особенности МПСБ в роли заменителей жира. Автор работы предполагает, что сопоставимость сенсорного восприятия жира и МПСБ позволяет производителям разрабатывать продукты с низким содержанием жира, но органолептически воспринимаемые потребителем как традиционные продукты питания [4]. В 1998 году было исследовано влияние замены жировой составляющей на МПСБ на органолептические показатели и структуру мороженого [5].

В период с 2009 по 2023 год по тематике, связанной с производством МПСБ и с его использованием в молочных продуктах, написано и защищено 2 докторских и 5 кандидатских диссертаций [6–12].

Существуют обзорные статьи, посвященные производству и применению МПСБ в составе пищевых продуктов. Практически в каждой из них констатируется способность МПСБ повышать биологическую ценность пищевых продуктов и возможность использования их в качестве заменителя жира [13–15].

При этом, по данным, представленным в работах [16–19], функциональная роль МПСБ значительно шире. В частности, МПСБ способен замещать казеин в продуктах спортивного питания, стимулировать за счет пребиотической активности развитие пробиотических микроорганизмов при производстве кисломолочных продуктов и поддерживать естественную микрофлору ЖКТ. Пребиотическая активность МПСБ сопоставима с аналогичной активностью инулина. Помимо этого, МПСБ повышает инсулиноподобный фактор роста и снижает содержание холестерина в организме человека.

Существует ряд обзоров, посвященных анализу функциональной целесообразности применения МПСБ в продуктах питания. Несмотря на это, необходима систематизация представленных в них данных, а также наработок, появившихся после их публикации, применительно к молочным продуктам, включая мороженое.

2. Материалы и методы

Поиск научной литературы проводили с использованием поисковых систем Web of Science, Scopus и Google Scholar, при помощи научных электронных библиотек «КиберЛенинка» и eLIBRARY, а также открытых интернет-источников. Сбор данных осуществляли на русском и английском языках по ключевым фразам с оператором «и»: «мороженое», «микропартикулят сывороточного белка», «микропартикулят молочного белка», «молочные продукты», «микропартикулят». По поисковому запросу было найдено более 2000 источников.

В ходе работы были проанализированы полные тексты статей, соответствующих критериям поиска. Статьи, не относящиеся к теме исследования, отклоняли после изучения названия и аннотации.

Критерии использования публикации:

1. Публикация создана в период 2010–2023 гг.;
2. Источник проиндексирован в Web of Science, Scopus или РИНЦ;
3. Возможно выборочное включение статей, опубликованных ранее 2010 г., в случае отсутствия новых источников по заданным критериям поиска.

Критерии исключения:

1. Работы, не относящиеся к теме исследования;
2. Отсутствие полных текстов публикаций.

3. О процессе микропартикуляции

Микропартикуляция — это комплекс тепловой и механической обработки молочной сыворотки с целью формирования конгломератов коагулированного белка определенных размеров [19–22]. Автор публикации [23] определяет цель микропартикуляции как возможность получения более крупных, чем в нативном состоянии, частиц сывороточного белка, способных удерживаться в казеиновой структуре сыра или творога. При этом отмечено, что частицы белка должны иметь размеры от 2 до 12 мкм. Агломераты белка размером более 12 мкм негативно влияют на органолептические характеристики продукта, в составе которого они используются, а частицы белка величиной менее 2 мкм не будут удерживаться в структуре продукта и перейдут в сыворотку.

Модификация состава и свойств подсырной и творожной сыворотки включает выделение и концентрирование белков ультрафильтрацией с последующей их денатурацией и диспергированием. Сочетание термической и механической обработки способствует микрогранулированию белковых частиц в нанотрубки, схожие по размеру с шариками жира [16,24].

По консистенции образцы МПСБ представляют собой однородную слабовязкую жидкость молочно-белого цвета, внешне похожую на обезжиренное молоко. В покое они расслаиваются с образованием мелкодисперсного осадка [21].

По данным авторов публикаций [13,25], первым коммерчески доступным ингредиентом на основе МПСБ был продукт торговой марки Simplesse®, полученный путем агрегации белка, термической денатурации и резкого снижения уровня pH. Позже начали появляться другие композиции, содержащие МПСБ, например, продукт торговой марки Dairy Lo®, состоящий из смеси сывороточного белка и микрочастиц целлюлозы.

Процесс микропартикуляции позволяет создавать МПСБ с заданными функциональными свойствами, а именно с определенными характеристиками по показателям «растворимость», «влагоудерживающая способность», «гелеобразование», «эмульгирующие и пенообразующие свойства» [13,14,25–27].

3.1. Способы осуществления процесса микропартикуляции

Для придания МПСБ, получаемым в процессе микропартикуляции, желаемых свойств применяют целый ряд дополнительных технологических приемов, а именно сгущение, ультрафильтрацию, диафильтрацию для снижения уровня лактозы и минералов в сырье. Для осаждения белков в большинстве случаев используют термическую обработку, но есть работы, в которых говорится о применении с этой целью сычужной коагуляции и химического осаждения.

Патенты разработаны для получения как жидких, так и сухих МПСБ.

Помимо микропартикуляции, в литературе описаны способы получения МПСБ посредством химического осаждения белка и его сычужной коагуляции.

В 2013 году впервые в России в патентах 2011130529 и 2487550 C2 для молочной промышленности описаны устройство и способ получения продукта с помощью микропартикуляции исходной смеси, содержащей от 1,5 до 30% сывороточных белков [28,29].

Способ получения сухих МПСБ, описанный в патенте WO2020115324A1 A [30], включает сгущение, ультрафильтрацию или диафильтрацию жидкого концентрата для снижения уровня лактозы и минералов с последующей сушкой.

Метод получения МПСБ, включающий термическую и механическую обработки сывороточного белка, описан в патенте WO2008063115A1 [31]. Особенностью метода является применение насоса высокого давления, через который пропускают белковый концентрат. В дальнейшем концентрат подвергается обработке — термической при повышенном давлении и механической с дальнейшим получением МПСБ.

В работе [32] описана методика получения МПСБ. Подсырную сыворотку очищают сепарированием от казеиновой пыли и жира, подвергают ультрафильтрации при давлении 0,5–1 МПа до достижения массовой доли сухих веществ 18%. Затем полученный концентрат нагревают при 95 °C в течение 10 мин и диспергируют при 30000–40000 $с^{-1}$ в течение 1,5 мин.

В статье [33] описан схожий способ получения МПСБ. На первом этапе проводят концентрирование молочной сыворотки на ультрафильтрационной установке с мембранами УПМ-450С при давлении 0,4 МПа до достижения массовой доли сухих веществ 18 ± 0,5%. Полученный УФ-концентрат подвергают микропартикуляции, включающей тепловую обработку при температуре 90–95 °C в течение 10 минут, гомогенизацию при 3000 $с^{-1}$ в течение 90 секунд и охлаждение до 8 ± 2 °C.

Эффективное сочетание тепловой и механической обработки при получении МПСБ приводит к образованию пищевой композиции с уникальными свойствами, имитирующими органолептический профиль молочного жира [24,34–36].

Помимо тепловой микропартикуляции, в литературе описаны способы получения МПСБ посредством химического осаждения белка и его сычужной коагуляции.

Авторы привели в работе [37] химический способ получения МПСБ без применения высокого давления или температуры. Химическая обработка используется для коррекции уровня pH, который должен находиться в интервале от 4 до 7.

В статьях [38,39] описано исследование, по результатам которого предложен способ получения МПСБ с помощью сычужной коагуляции. Отработаны дозировки внесения фермента и технологические параметры процесса. В результате получен МПСБ с оптимальным размером частиц 1 мкм, частицы не слиплись в агломераты, что соответствует требованиям к МПСБ.

3.2. Размеры частиц МПСБ

По представленным в литературе данным, средний диаметр белковых конгломератов МПСБ различен. Он может составлять 2,5 мкм [2,20,40,41], от 1,0 до 1,5 мкм [21], от 0,8 до 4,5 мкм [42] и т. д. При этом размер частиц сопоставим с параметрами жировых шариков, формирующих потребительские свойства конкретного пищевого продукта, для которого предназначен МПСБ [11,12,28,43,44].

В статье [42] приведены результаты исследований физико-химических свойств частиц МПСБ, полученных в результате одновременной термической и механической обработки концентрата сывороточных белков (КСБ). При одинаковых технологических параметрах обработки КСБ из подсырной и творожной сыворотки микропартикуляты отличались как по компонентному составу, так и по степени дисперсности белковых частиц. В микропартикулятах из подсырной сыворотки размер частиц составлял от 0,8 до 4,5 мкм, из творожной — от 0,9 до 11,0 мкм. Вероятно, в МПСБ из творожной сыворотки за счет более высокой кислотности формируются более крупные белковые агломераты. Этому также могут способствовать ионы кальция, магния и фосфора, влияющие на скорость агрегации белковых молекул и на размер частиц.

В работах [14,45] оптимальный размер частиц МПСБ для применения в продуктах питания указан в диапазоне от 0,1 до 10,0 мкм.

В работе Torres и соавторов [46] представлена информация о распределении частиц по размерам в двух образцах сухих МПСБ, произведенных компанией Arla Foods Ingredients с использованием разных технологических процессов, что обусловило различия в их химических и физических характеристиках. Образцы значительно отличались массовой долей белка 34% в одном образце и 43% в другом, а также массовой долей лактозы 47% и 40% соответственно. При изучении распределения частиц по размерам установлено, что 10% всех частиц имели размер до 0,63 ± 0,03 мкм в одном образце и до 2,16 ± 0,20 мкм во втором образце МПСБ; 50% всех частиц имели размер до 3,75 ± 0,09 мкм в одном образце и до 17,47 ± 3,66 мкм во втором образце; 90% всех частиц имели размер до 13,86 ± 1,93 мкм в первом образце и до 55,25 ± 1,63 мкм во втором образце.

В публикации [47] приведены особенности применения МПСБ в зависимости от размера сформированных в них частиц:

- МПСБ с размером частиц < 0,5 мкм могут использоваться в качестве белкового обогатителя. В жидком виде они обладают нейтральным вкусом;
- МПСБ с размером частиц от 0,5 до 5,0 мкм могут применяться в качестве имитаторов жира;
- МПСБ с размером частиц от 5,0 до 10,0 мкм рекомендуется использовать в сыроделии в качестве имитатора молочного жира и регуляторов структуры.

Отмечено, что МПСБ с размером частиц > 10,0 мкм придают структуре молочных продуктов крупитчатость, что ограничивает область их применения [47]. При этом подчеркнуто, что, независимо от размера частиц, МПСБ обладают влагоудерживающими, эмульгирующими и текстурирующими свойствами.

3.3. Состав и физико-химические свойства МПСБ

МПСБ получают и используют как в жидком, так и в сухом виде [18,32]. Состав и физико-химические свойства МПСБ приведены в Таблице 1.

Восстановленные образцы МПСБ характеризуются более высокой устойчивостью к нагреванию, чем КСБ [55].

Таким образом, анализ литературных данных позволяет сделать вывод о том, что функциональные свойства МПСБ зависят от вида используемого для его получения сырья и от технологии его обработки.

Таблица 1. **Состав и физико-химические свойства МПСБ**

Table 1. **Composition and physico-chemical properties of WPMP**

Показатель	Жидкие МПСБ [6,20,21,40,42,48–53]	Сухие МПСБ [46,54]
Массовая доля влаги, %	82–91,5	3–6
Массовая доля сухих веществ, %, в том числе	8,5–18,0	94,0–97,0
Массовая доля белка, %	3,5–10,5	33,7–47,1
В том числе сывороточных белков	3,0–8,9	2,7–14,4
Массовая доля жира, %	0,05–2,0	2,4–4,1
Массовая доля лактозы, %	3,9–5,8	37,0–50,7
Массовая доля минеральных веществ, %	0,5–0,6	4,9–7,9
В том числе мг/100 г:		
Калий	74–212	1270–1760
Кальций	66–132	430–1110
Магний	8–15,5	90–140
Фосфор	40–277	—
Натрий	—	410–770
Активная кислотность, ед. pH	4,3–6,5	6,3–6,8
Титруемая кислотность, °T	21–90	Нет данных
Плотность, кг/м3	1043–1048	Нет данных
Вязкость, мПа·с	10,1–27	Нет данных

4. Применение МПСБ в молочных продуктах

В проанализированном объеме информации пристальное внимание уделено работам, освещающим вопросы применения МПСБ в производстве молочных продуктов, так как мороженое является одним из них.

Отмечены работы, посвященные результатам применения МПСБ при производстве синбиотического продукта, обогащенного витаминно-минеральными комплексами [56], кисломолочного синбиотического продукта [18,57], йогуртов [46,53,54], кефира [53,58], творога [2,53,59,60], термокислотных, мягких кислотно-сычужных и рассольных сыров [2,59], плавленых сыров [39,52,61], молока нежирного сгущенного с сахаром [2], высокобелковой молочной смеси для профилактики остеопении у детей и подростков с целиакией [62].

В ряде работ [29,31,32,63,64] подчеркнута высокая эффективность использования МПСБ в качестве имитатора молочного жира в таких кисломолочных продуктах, как йогурт, кефир, творог и сметана.

В публикации [65] подчеркнуто, что применение МПСБ в пищевых продуктах, в частности в молочных, позволяет снизить в них массовую долю жира и калорийность без ущерба для органолептических характеристик, включая структуру, что позволяет в определенной степени нивелировать дефицит молока-сырья.

По данным, приведенным в работе [42], использование МПСБ в производстве йогуртов, десертов, мороженого, молочных напитков, сырных и творожных продуктов, помимо снижения калорийности продуктов, позволяет сформировать в них мягкую и эластичную структуру, создать гармоничный вкус и интенсифицировать молочный цвет, а также ограничить рост кристаллов льда в замороженных десертах посредством связывания и равномерного распределения влаги.

В работе [43] отмечено, что для изготовления некоторых продуктов, например, мороженого, нет необходимости в отдельном технологическом этапе восстановления МПСБ, однако при производстве продуктов из пахты оно требуется и проводится в следующей последовательности: в пахту при температуре 40 °C и непрерывном перемешивании вносят 2,0% МПСБ, затем полученную смесь выдерживают в течение 0,5–6 ч при 10–12 °C, далее ее вновь подвергают тепловой обработке и направляют на выработку белковых продуктов. При этом отмечено, что увеличение продолжительности выдержки смеси пахты с МПСБ до 4 ч приводит к повышению степени использования сухих веществ сырья на 0,8–1,0% [66].

Авторы публикации [36] приводят данные о том, что применение МПСБ в йогурте обеспечивает более высокую влагоудерживающую способность сгустка, в том числе в процессе хранения, по сравнению с использованием для этих же целей КСБ. При этом констатировано, что предварительная гидратация частиц МПСБ перед тепловой обработкой в течение 60 мин повышает прочность образуемого геля.

В работе [54] отмечено, что МПСБ эффективнее повышают кажущуюся вязкость, эластичность и механическую устойчивость йогуртов при перемешивании, нежели изоляты сывороточных белков.

В публикациях [67,68] сделано утверждение о том, что использование микропартикулята творожной сыворотки оказывает существенное влияние на процессы коагуляции и гелеобразования кисломолочных напитков, создавая тем самым условия для формирования более прочных структурных связей кисломолочного сгустка. Кроме того, в статьях отмечено, что применение МПСБ способствует образованию более мягких, сливочных сгустков, что особенно важно при производстве нежирных продуктов, для которых характерно образование излишне грубых и прочных гелей. Подчеркнуто, что при увеличении массовой доли МПСБ в продукте образующийся кисломолочный сгусток описывается как более густой, вязкий, с усиленным сливочным вкусом.

В патенте 2607035 C1, полученном коллективом под руководством Мельниковой Е. И., описаны способ получения и рецептура кисломолочного напитка с использованием МПСБ. Предложенное решение подразумевает добавление МПСБ в цельное молоко после гомогенизации, пастеризации, охлаждения до температуры 38–40 °С и внесение сахара-песка и закваски. Массовая доля МПСБ в продукте при этом составляет 10,0% [44].

Авторы патента 2465774 C1 предложили технологию производства кисломолочного напитка с использованием микропартикулята белков молока. Этот микропартикулят получают методом комбинированной коагуляции хлоридом кальция (CaCl2) и сычужным ферментом, что приводит к биохимической модификации нативных белков молока до структур, способных имитировать ощущение жира (микрогранулированный казеин). В целях улучшения свойств получаемого микрогранулированного казеина и стабилизации молочной смеси водный раствор хлорида кальция добавляют в молоко перед пастеризацией [64].

В статье [58] представлена новая технология обогащения кефира микропартикулятом творожной сыворотки в количестве 10,0%. Данный подход позволяет повысить антагонистическую активность кефирной закваски в отношении патогенных микроорганизмов и имитировать в продукте органолептические характеристики, присущие кефиру с высокой массовой долей жира.

В патенте 2422030 C1, полученном группой ГОУ ВПО ВГТА под руководством Мельниковой Е. И., приведен способ приготовления продукта, имитирующего сливки. Он включает в себя восстановление сухого обезжиренного молока, смешивание с МПСБ, пастеризацию полученной смеси при температуре 80±2 °С с выдержкой 15–20 с, охлаждение до температуры 4–6 °С, розлив и упаковку. Расход сырьевых компонентов на 1 т готового продукта при этом составил: МПСБ — 690–710 кг, сухого обезжиренного молока — 55–57 кг, воды питьевой — 233–255 кг. Предложенный способ приготовления продукта, имитирующего сливки, позволяет осуществить замену двух дорогостоящих рецептурных ингредиентов (молока цельного и сливок) одной модифицированной формой подсырной сыворотки. Это позволяет снизить калорийность и себестоимость, повысить биологическую ценность продукта, исключить из его состава насыщенные жирные кислоты и расширить ассортимент молочных продуктов с низким содержанием жира и улучшенными органолептическими свойствами [32].

В патенте 2668165 C2 излагается способ производства высокобелкового молочного коктейля с использованием источников белка, в том числе МПСБ в количестве от 1,0 до 20,0% от массы молочной основы [69].

Авторы работ [20,48] предложили использовать МПСБ для интенсификации процесса сквашивания в технологии производства творога. Наиболее активный рост титруемой и активной кислотности наблюдался у образцов творожных сгустков с массовой долей МПСБ от 10,0 до 15,0%. Расчет лактосбраживающей активности позволил авторам сделать вывод о том, что с увеличением массовой доли МПСБ в продукте возрастает содержание молочной кислоты, а следовательно, и количество сброженной лактозы.

Исследованием, результаты которого приведены в статье [40], установлено, что на прочность сгустка при производстве творога существенное влияние оказывает размер частиц используемого МПСБ. Так, частицы диаметром более 8 мкм способствуют формированию мягкого сгустка, а частицы диаметром менее 8 мкм рассматриваются как «неактивный наполнитель», не оказывающий негативного влияния на процесс образования и на качество сгустка. Установленная рациональная массовая доля МПСБ в продукте составляет 10,0%. Она обеспечивает получение обезжиренного творога стандартного качества, сенсорно ощущаемого более жирным продуктом с достаточно плотным, способным к синерезису сгустком. В то же время выявлено, что при увеличении массовой доли белка более 3,8–4,0% частицы МПСБ перестают активно встраиваться в пространственную структуру сгустка и переходят в сыворотку.

В работе [70] представлено исследование влияния МПСБ на коагуляционные свойства молока при производстве творога и сыра. В частности, оценивалось влияние на продолжительность сычужной коагуляции, на уплотнение сгустка и на его плотность через 30 минут после внесения сычужного фермента. Отмечено, что добавление МПСБ к молоку приводит к незначительному увеличению продолжительности процесса коагуляции, что необходимо учитывать, особенно при введении МПСБ в рецептуры сыров с низкой массовой долей жира.

В публикации [47] описано применение МПСБ в производстве полутвердых, мягких сыров с термокислотной коагуляцией белков молока и творога. Установлено, что при подготовке смеси восстановление МПСБ целесообразно осуществлять в течение 3–4 ч, что позволяет интенсифицировать сливочный привкус в продукте.

Разработанная рецептура плавленого сыра с полной заменой жиросодержащих компонентов (сметана, сливочное масло) на МПСБ позволила снизить содержание молочного жира в продукте на 61% при одновременном увеличении количества белка на 18% [52].

В статье [19] отмечено, что при внесении МПСБ в рецептуру сыров конечный продукт содержит существенно меньше жира, но не теряет при этом вкусовых достоинств. Так, сыр с низкой массовой долей жира (от 11,0 до 17,0%), произведенный с использованием МПСБ, обладает теми же органолептическими характеристиками, что и традиционные сыры с массовой долей жира от 30,0 до 40,0%. Доля МПСБ в объеме сырья, используемого для производства таких сыров, может достигать 5,0% для твердых и полутвердых сыров и 10,0% для сыров типа моцарелла.

Ученые из Китая [70] разработали композиции для имитации молочного жира, которые получили из сывороточных белков, подвергнутых ультрафильтрации (50–75%), раствора ксантановой камеди (15–32%) и раствора пектина (6–9%). Растворы готовят в соотношении с водой 1:30–1:35 и кипятят 2–4 мин. Дополнительно в них вводят одну из двух приведенных ниже смесей:

- смесь № 1 — сорбит 4,0–8,0%, моноглицериды жирных кислот (дистиллированные) 0,2–0,5%, эфир сахарозы и жирных кислот 0,2–0,5%;
- смесь № 2 — пищевой глицерин 4,0–8,0%, соевый лецитин 0,2–0,6%.

Представлены характеристики составов полученных продуктов и их свойств:

- МПСБ 75%, раствор ксантановой камеди 15%, раствор пектина 6%, сорбит 3,6%, моноглицериды 0,2%, эфир сахарозы и жирных кислот 0,2% — комплексный миметик жира с приятным вкусом;
- МПСБ 51%, раствор ксантановой камеди 32%, раствор пектина 9%, пищевой глицерин 7,5%, соевый лецитин 0,5% — заменитель жира с высокой пластичностью;
- МПСБ 60%, раствор ксантановой камеди 27%, раствор пектина 7%, сорбит 4,3%, моноглицериды 0,8%, эфир сахарозы и жирных кислот 0,9% — комплексный миметик жира с высокой стабильностью;
- МПСБ 68%, раствор ксантановой камеди 20%, раствор пектина 7%, пищевой глицерин 4,6%, соевый лецитин 0,4% — миметик имитатор жира с высокой пластичностью.

В Таблице 2 представлены дозировки и вид МПСБ, рекомендованные в научной литературе для использования в производстве определенных молочных продуктов.

5. Применение МПСБ в технологии мороженого

В ряде работ [25,73,74] отмечено, что мороженое, изготовленное с использованием концентратов сывороточных белков с диаметром частиц, превышающим 5 мкм, имеет более высокую плотность и на 10% меньшую взбитость, чем мороженое, произведенное с применением МПСБ. Отмечено, что среди заменителей жира на белковой основе МПСБ по вкусовым ощущениям воспринимаются как наиболее похожие на жировые шарики и придают продукту кремообразную текстуру.

В патенте 2616366 C1, полученном группой авторов под руководством Евдокимова И. А., запатентованы способ производства и рецептура маложирного кисломолочного мороженого с МПСБ. Технологический процесс включает этапы приготовления смеси, содержащей молоко, сливки, сахар и стабилизатор, а также этапы ее пастеризации, охлаждения, сквашивания и фризерования, расфасовки и закаливания мороженого. Перед пастеризацией в смесь вносят сахар (15–17%), МПСБ (2–4%), а также полисахариды (1–3%), в качестве которых используют инулин, пектин, арабиногалактан, каррагинан или агар. После сквашивания в смесь добавляют пребиотик в виде олигосахаридов лактулозы, галактоолигосахаридов

Таблица 2. **Вид и дозировка МПСБ для молочных продуктов**
Table 2. **Type and dosage of WPMP for dairy products**

Наименование продукта	Вид добавки	Дозировка, %	Ссылка
Обезжиренный творог	Simplesse 100, ProMilk 630M и МПСБ, полученный на пилотной установке GEA	1–2	[47]
	МПСБ, полученный на лабораторной установке Pilotplant-VF-Microparticulation	10	[40]
Творог	МПСБ, полученный на лабораторной установке	10	[48]
		5–15	[50]
Кефир	МПСБ, полученный на лабораторной установке	10	[58]
Йогурт	МПСБ, полученный на лабораторной установке	3:7 Обезжиренное молоко: микропартикулят (сухих веществ 18%)	[18]
Напиток из пахты	МПСБ, полученный на лабораторной установке	2	[66]
Кисломолочный напиток	МПСБ, полученный на лабораторной установке	80:20 и 70:30 Обезжиренное молоко: микропартикулят	[21]
Плавленые сыры	МПСБ, полученный на лабораторной установке	15	[49]
		35	[52]
Маложирные плавленые сыры	Simplesse 100	2,0	[61]
Твердые и полутвердые сыры	МПСБ, полученный на установке «Кизельманн ЭКОПРОТ+»	5	[19]
Твердые сыры	Simplesse 100, ProMilk 630M и МПСБ, полученный на пилотной установке GEA	2	[47]
Сыры типа российский	МПСБ, полученный в аппаратном цехе ПАО Молочный комбинат «Воронежский»	10,0	[53]
Сыр качотта	МПСБ, полученный на лабораторной установке	2–4	[72]
Мягкий сыр с термокислотной коагуляцией	Simplesse 100, ProMilk 630M и МПСБ, полученный на пилотной установке GEA	2	[47]

или фруктоолигосахаридов (1–3%). Автор предлагает использовать МПСБ в качестве замены жировой составляющей в рецептуре [43].

В статье [75] приведены результаты исследований замещения жировой составляющей в мороженом МПСБ трех торговых марок. Показано, что замена не влияет на интенсивность выраженности ванильного аромата, но усиливает привкусы кукурузного сиропа, сыворотки и перепастеризации в сравнении с контрольными образцами.

В работе Aykan и Sezgin [76] и Guzel-Seydim [77] приведены результаты исследований использования МПСБ торговой марки Simplesse в композиции с инулином при производстве мороженого без жира и мороженого с низкой массовой долей жира. В ходе эксперимента отмечено увеличение вязкости смесей для мороженого, улучшение текстуры, повышение формоустойчивости и снижение скорости таяния продукта. Сделано предположение, что полученные эффекты достигнуты за счет не только воздействия МПСБ, но и посредством увеличения общей массовой доли сухих веществ в готовом мороженом.

В статье [78] отмечена тенденция к повышению криоскопической температуры и температуры стеклования, а также скорости таяния мороженого при частичной замене жира на МПСБ.

Авторы публикаций [79,80] рассматривают возможность использования МПСБ в качестве имитатора молочного жира в мороженом для диабетического и диетического питания, мотивируя указанное повышением биологической ценности продукта. При этом одновременно с МПСБ при изготовлении мороженого применяли заменители молочного жира торговой марки «СОЮЗ 52 L», а в качестве контрольного использовали образец с гидрогенизированным лауриновым жиром Loders Croklaan. На основании результатов проделанной работы авторы сделали выводы о способности МПСБ регулировать функционально-технологические характеристики мороженого, имитировать наличие сливочного вкуса при отсутствии в рецептуре молочного жира, обогащать продукт ценными нутриентами и снижать его калорийность. Расчеты показали, что, заменив молочный жир в рецептуре мороженого на 66,0% и сахарозу на 40,0%, калорийность продукта можно снизить на 38,0%.

Авторы работы [50] предложили рецептурное решение для низкокалорийного мороженого, в котором массовая доля сухих веществ составляет от 22,0 до 25,0%, массовая доля жира — от 1,0 до 6,0%, pH — от 6,5 до 6,6 и, по мнению авторов, присутствует максимально возможная массовая доля белка.

В Таблице 3 представлены состав, физико-химические показатели мороженого пломбир, которое рассматривали в качестве контрольного образца, и образца мороженого с использованием МПСБ [20,81].

Таблица 3. **Состав, физико-химические и микробиологические показатели мороженого [20,81]**
Table 3. **Composition, physico-chemical and microbiological indicators of ice cream [20,81]**

Показатель	Мороженое пломбир (контроль)	Мороженое с МПСБ
Массовая доля сухих веществ, %, в том числе:	40,0	30,6
Белка	3,7	7,85
Жира	15,0	5,0
Лактозы	5,6	0,5
Сахарозы	15,0	9,0
Массовая доля витаминов, мг %:		
Рибофлавин (B2)	0,043	0,15
Ниацин (PP)	1,16	1,31
Пиридоксин (B6)	0,22	0,34
Аскорбиновая кислота (C)	5,71	8,12
Токоферол (E)	1,03	0,45
Взбитость, %	80,0	95,0
Вязкость, мПа·с	17,8	27,0
Продолжительность полного таяния, мин	46	55
Титруемая кислотность, °Т	18,0	20,0
Криоскопическая температура, °C:		
расчетная	Минус 2,51	Минус 2,30
установленная экспериментально	Минус 2,41	Минус 2,21
Показатель активности воды, ед.	0,976	0,978

В образце с МПСБ с целью снижения массовой доли сахарозы в мороженом проведен гидролиз лактозы. Высказано предположение, что указанные действия позволят снизить массовую долю молочного жира в продукте на 66,0–69,0%, сахарозы — на 40,0–43,0%, калорийность — на 38,0–40,0% [20,50,81,82].

Те же авторы приводят данные о среднем размере кристаллов льда: в образце мороженого с МПСБ он составил 23 мкм, а в контрольном образце — 35 мкм [81].

В работе [82] представлены результаты эксперимента, в котором вследствие частичной замены жира в мороженом на МПСБ содержание лактозы увеличилось на 29%. С целью нивелирования указанных последствий осуществлена биоконверсия лактозы с использованием фермента β-галактозидаза Maxilact в дозировке 0,68 г/дм^3.

В публикации [83] установлена рациональная для мороженого дозировка МПСБ в количестве 3%. Авторы считают, что МПСБ

в мороженом выполняет функции имитатора жира, стабилизатора и эмульгатора. В качестве имитатора жира МПСБ могут использоваться благодаря способности их частиц обволакивать поверхность крупных кристаллов льда, выполняя тем самым роль смазки и нивелируя излишний охлаждающий эффект. Кроме того, применение МПСБ напрямую влияет на органолептические показатели мороженого, создавая ощущение сливочности текстуры и усиливая вкусовые качества, что особенно важно для мороженого с низкой массовой долей жира.

В статье [33] для использования в мороженом предложена композиция пектина и МПСБ в количестве 3%. При этом массовая доля МПСБ не приведена, но указано, что увеличение количества пектина в смеси приводит к формированию неоднородной, песчанистой консистенции с наличием ощутимых комочков стабилизатора.

В работе [84] авторы сравнили влияние МПСБ торговых марок Simplesse Dry 500 и Dairy Lo на показатели шоколадного маложирного и обезжиренного мороженого. Выявлено, что в мороженом с использованием МПСБ торговой марки Simplesse Dry 500 ощущение наличия жира после закаливания выражено ярче, чем в образце с применением МПСБ торговой марки Dairy Lo. В течение последующих 12 недель хранения мороженого МПСБ торговой марки Simplesse Dry 500 эффективнее замедлял рост кристаллов льда по сравнению с МПСБ торговой марки Dairy Lo.

Результаты сравнения характеристик мороженого с применением различных марок МПСБ приведены в статье [85]. Показано, что маложирное мороженое с МПСБ торговой марки Simplesse и контрольный образец мороженого со стандартной массовой долей жира имели схожие органолептические показатели, в то время как мороженое, содержащее МПСБ торговой марки Litesse, по вкусовым характеристикам больше походило на мороженое с низким содержанием жира. Отмечено, что при использовании композиции МПСБ торговых марок Litesse и Simplesse полученное мороженое по вкусовому профилю ближе к пищевому льду, а по структуре — к мороженому с высоким содержанием жира. Установлено, что МПСБ торговой марки Simplesse является лучшим миметиком жира для воспроизведения органолептических характеристик, в том числе вкусовых и структурных профилей мороженого с полноценной массовой долей жира.

В исследовании, результаты которого опубликованы в работе [45], рассмотрено влияние применения двух видов экструдированного МПСБ на качество мороженого. У первого образца размеры более половины частиц МПСБ составляют менее 3 мкм, у второго — более 5 мкм. При этом установлено, что продукт с использованием МПСБ, содержащего в основном частицы размером менее 3 мкм, имел более мягкую консистенцию и большую взбитость по сравнению с мороженым с использованием МПСБ с размером частиц более 5 мкм.

В Таблице 4 представлены дозировки и виды МПСБ, описанные в научной литературе при исследовании показателей качества мороженого.

Таблица 4. **Экспериментальные дозировки МПСБ в мороженом**
Table 4. **Experimental dosages of WPMP in ice cream**

Наименование продукта	Вид добавки	Дозировка, %	Ссылка
Обезжиренное мороженое	Dairy Lo™, Prolo 11®, Simplesse® 100	5	[65]
Обезжиренное ванильное мороженое	Simplesse	2,7	[86]
Маложирное мороженое	–	2–4	[43]
Маложирное ванильное мороженое с массовой долей жира 2%	Simplesse	0,6	[86]
Мороженое с массовой долей жира 4%	Simplesse, Litesse, Simplesse/Litesse (50/50)	6	[85]
Мороженое с массовой долей жира 6%	Simplesse	6	[45]
Шоколадное мороженое с массовой долей жира 2,5%	Simplesse Dry 500, Dairy Lo	2,5	[84]
Маложирное пробиотическое мороженое	МПСБ, полученный на лабораторной установке	3	[83]

6. Заключение

Применение микропартикулятов сывороточных белков набирает популярность в производстве мороженого и других молочных продуктов. Особенно активно рекомендуется их применение в маложирных продуктах для формирования сенсорных ощущений продукта со стандартной жирностью.

Применение микропартикулятов сывороточных белков в производстве молочных продуктов, включая мороженое, целесообразно благодаря их функциональным свойствам. Использование МПСБ позволяет создавать продукты питания с востребованными потребительскими характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Ситникова, П. Б., Казакова, Н. В. (2023). Обоснование, направления и результаты использования продуктов переработки молочной сыворотки в производстве мороженого. *Пищевые системы*, 6(4), 531–538. [Sitnikova, P. B., Kazakova, N. V. (2023). Substantiation, directions and results of using whey processed products in ice cream production. *Food Systems*, 6(4), 531–538. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-531-538
2. Смирнова, И. А., Лобачева, Е. М., Гулбани, А. Д. (2014). Использование микропартикулированных сывороточных белков в молочных продуктах *Молочная промышленность*, 6, 28–30. [Smirnova, I. A., Lobacheva, E. M., Gulbani, A. J. (2014). Applying of microparticiulated whey proteins in milk products. *Dairy Industry*, 6, 28–30. (In Russian)]
3. Singer, N. S., Moser, R. H. (1993). Microparticulated proteins as fat substitutes. Chapter in a book: Low Calorie Foods Handbook. New York, 1993.
4. Civille, G. V. (1990). The sensory properties of products made with microparticulated protein. *Journal of the American College of Nutrition*, 9(4), 427–430. https://doi.org/10.1080/07315724.1990.10720401
5. Ohmes, R. L., Marshall, R. T., Heymann, H. (1998). Sensory and physical properties of ice creams containing milk fat or fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 81(5), 1222–1228. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(98)75682-6
6. Попова, Е. Е. (2013). Получение микропартикулята сывороточных белков и его применение в технологии низкокалорийного мороженого. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж: ВГУИТ, 2013. [Popova, E. E. (2013). Production of the whey protein microparticulate and its use in the technology of low-calorie ice cream. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Voronezh, VGUIT, 2013. (In Russian)]
7. Румянцева, Е. Е. (2009). Разработка и товароведная оценка молока нежирного сгущенного с сахаром и микропартикулятом сывороточных белков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемерово, 2009. [Rumyantseva, E. E. (2009). Development and commodity evaluation of non-fat condensed milk with sugar and whey protein microparticulate. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo, KemTIPP, 2009. (In Russian)]
8. Станиславская, Е. Б. (2018). Научное и практическое обоснование модификации белкового кластера молочной сыворотки для реализации в технологии продуктов питания. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ставрополь, СКФУ, 2018. [Stanislavskaya, E. B. (2018). Scientific and practical substantiation of modification of the protein cluster of milk whey for implementation in the food technology. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences. Stavropol, SKFU, 2018. (In Russian)]
9. Подгорный, Н. А. (2013). Получение новой пищевой композиции и ее применение в технологии синбиотического напитка. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ставрополь, СКФУ, 2013. [Podgornyi, N.A. (2013). Production of the new food composition and it use in the technology of the synbiotic beverage. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Stavropol, SKFU, 2013. (In Russian)]
10. Баранов, С. А. (2023). Разработка технологии кисломолочного продукта с микропартикулятом из творожной сыворотки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ставрополь, СКФУ, 2023. [Baranov, S. A. (2023). Development of the technology of the fermented milk product with the microparticulate from quark whey. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Stavropol, SKFU, 2023. (In Russian)]
11. Дымар, О. В. (2016). Научное обоснование и разработка технологий комплексного использования продуктов переработки молока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ставрополь, СКФУ, 2016. [Dymar, O. V. (2016). Scientific substantiation and development of technologies of complex use of milk processing products. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences. Stavropol, SKFU, 2016. (In Russian)]
12. Шерстнева, Н. Е. (2022). Разработка технологии кисломолочного продукта с использованием модифицированного концентрата сывороточных белков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, 2022. [Sherstneva, N. E. (2022). Development of the technology of fermented milk products with the use of modified concentrate of whey proteins. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Foods Systems, 2022. (In Russian)]

13. Kew, B., Holmes, M., Stieger, M., Sarkar, A. (2020). Review on fat replacement using protein-based microparticulated powders or microgels: A textural perspective *Trends in Food Science and Technology*, 106, 457–468, https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.032
14. Shi, D., Li, C., Stone, A. K., Guldiken, B., Nickerson, M. T. (2021). Recent developments in processing, functionality, and food applications of microparticulated proteins. *Food Reviews International*, 39(3), 1309–1332. https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1933515
15. de Paula, I. L., Mesa, N. C., Contim, L. T., Ferreira, R. G., Pombo, A. F. W. et al. (2024). The applicability of microparticulated whey protein as an ingredient in different types of foods and its functionalities: A current patent review. *European Food Research and Technology*, 250(2), 633–647. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04402-x
16. Подгорный, Н. А., Станиславская, Е. Б. (8–12 апреля 2013 г). *Заменитель жира белковой природы для синбиотических молочных продуктов*. Сборник статей международного научного форума «Пищевые инновации и биотехнологии». Кемерово, Россия, 2013. [Podgornyi, N. A., Stanislavskaya, E. B. (April 8–12, 2013). *Fat replacer of protein nature for synbiotic dairy products.* Proceedings of the International scientific forum “Food innovations and biotechnologies”. Kemerovo, Russia, 2013. (In Russian)]
17. Каширин, Д. Н., Будрик, В. Г. (8–9 октября 2013 г). *Аспекты использования микропартикулята сывороточного белка в производстве продуктов питания функционального назначения*. Сборник материалов VII Конференции молодых ученых и специалистов Россельхозакадемии, Москва, Россия, 2013. [Kashirin, D. N., Budrik, V. G. (October 8–9, 2013). *Aspects of using the whey protein microparticulate in produciton of functional foods*. Proceedings of the 7th Conference of young scientists and specialists of Rosselkhozacademia. Moscow, Russia, 2013. (In Russian)]
18. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Подгорный, Н. А., Чуносова, Е. В. (2010). Синбиотический продукт на основе микропартикулята сывороточных белков. *Сыроделие и маслоделие,* 6, 26–27. [Mel’nikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Podgornyi, N. A., Chunosova, E. V. (2010). Synbiotic product based on whey protein microparticulate. *Cheese- and Buttermaking*, 6, 26–27. (In Russian)]
19. Баранов, С. (2014). Новое поколение установок микропартикуляции. *Молочная промышленность,* 6, 22–23. [Baranov, S. (2014). New generation of the plants for microparticulation. *Dairy Industry*, 6, 22–23. (In Russian)]
20. Пономарев, А. Н., Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Коротков, Е. Г. (2016). Влияние микропартикулята на кислотную коагуляцию белков молока при производстве творога. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий,* 3(69), 164–169. [Ponomarev, A. N., Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Korotkov, E. G. (2016). The influence of microparticulate on acid coagulation of milk proteins in curd manufacture. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 3(69), 164–169. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-3-164-169
21. Баранов, С. А., Евдокимов, И. А., Гордиенко, Л. А., Шрамко, М. И. (2020). Влияние микропартикулята сывороточных белков на показатели кисломолочных напитков. *Молочная промышленность,* 9, 59–61. [Baranov, S. A., Evdokimov, I. A., Gordienko, L. A., Shramko, M. I. (2020). The effect of whey protein microparticulate on properties of fermented milk drinks. *Dairy Industry*, 9, 59–61. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-09-59-61
22. Liu, K., Tian, Y., Stieger, M., van der Linden, E., van de Velde, F. (2016). Evidence for ball-bearing mechanism of microparticulated whey protein as fat replacer in liquid and semi-solid multi-component model foods. *Food Hydrocolloids,* 52, 403–414. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.07.016
23. Смольников, Н. (2014). Исключительное индустриальное решение для микропартикуляции сыворотки. *Молочная промышленность*, 6, 24–25. [Smolnikov, N. (2014). An exceptional industrial solution for whey microparticulation. *Dairy Industry*, 6, 24–25. (In Russian)]
24. Kelly, Ph. (2019). Manufacture of whey protein products: Concentrates, isolate, whey protein fractions and microparticulated. Chapter in a book: Whey Proteins. London: Academic Press, 2019. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812124-5.00003-5
25. Genovese, A., Balivo, A., Salvati, A, Sacchi, R. (2022). Functional ice cream health benefits and sensory implications. *Food Research International*, 161, Article 111858. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111858
26. Гурский, И. А., Творогова, А. А. (2022). Влияние концентратов сывороточных белков на технологические и органолептические показатели качества мороженого. *Техника и технология пищевых производств*, 52 (3), 439–448. [Gurskiy, I. A., Tvorogova, A. A. (2022). The effect of whey protein concentrates on technological and sensory quality indicators of ice cream. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(3), 439–448. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2376
27. Loffredi, E., Moriano, M. E., Masseroni, L., Alamprese, C. (2020). Effects of different emulsifier substitutes on artisanal ice cream quality. *LWT — Food Science and Technology,* 137, Article 110499. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110499
28. Патент № 2011130529. Способ и устройство для производства продукта путем микрожелатинизации и/или микропартикуляции исходной смеси / Буррер М. Опубл. 27.01.2013, Бюл. № 3. [Burger M. Method and device for producing a product through microgelatization and / or microparticulation of the initial mixture. Patent RF, no. 2011130529. 2013. (In Russian)]
29. Патент 2487550C2. Способ и устройство для производства продукта путем микропартикуляции исходной смеси / Буррер М. Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. [Burger M. Method and device for producing a product by microparticulation of the initial mixture. Patent RF 2487550C2. 2013. (In Russian)]
30. Tobin J., Kennedy D., Omarov M., McDonagh D. A microparticulated whey protein concentrate. Patent IE no. WO2020115324. 2020.
31. Kruesemann D., Nordanger J. A method of treating a whey protein concentrate by microparticulation. Patent DE no. WO2008063115A1. 2008.
32. Патент 2422030C1. Способ приготовления продукта, имитирующего сливки / Мельникова Е. И., Станиславская Е. Б., Подгорный Н. А. Опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. [Melnikova E. I., Stanislavskaja E. B., Podgornyj N. A. Method for production of product imitating cream. Patent RF no. 2422030C1. 2011. (In Russian)]
33. Мельникова, Е. И., Смирных, А. А., Станиславская, Е. Б., Ходасевич, Е. Е. (2011). Исследование реологических характеристик белково-углеводной композиции для мороженого. *Хранение и переработка сельхозсырья,* 10, 27–29. [Mel’nikova, Ye.I., Smirnykh, A. A., Stanislavskaya, Ye. B., Khodasevich, Ye. Ye. (2011). Study the rheological characteristics of the protein- carbohydrate composition of ice cream. *Storage and Processing of Farm Products*, 10, 27–29. (In Russian)]
34. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б. (2019). Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии полутвердых сыров. *Хранение и переработка сельхозсырья,* 4, 129–138 [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B. (2019). Application of microparticulates of whey proteins in the technology of semi-hard cheeses. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 129–138. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2019.199
35. Olivares, M. L., Shahrivar, K., de Vincente, J. (2019). Soft lubrication characteristics of microparticulated whey proteins used as fat replacers in dairy systems. *Journal of Food Engineering*, 245, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.015
36. Ipsen, R. (2017). Microparticulated whey proteins for improving dairy product texture. *International Dairy Journal*, 67, 73–79. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.08.009
37. Torres Senabre I. System and method for the microparticulation of whey protein Patent Spain, no. WO2017140922. 2018.
38. Смирнова, И. А., Штригуль, В. К., Смирнов, Д. А. (2013). Сычужная коагуляция: формирование микропартикулятов белков молока. *Сыроделие и маслоделие,* 1, 42–44. [Smirnova, I. A., Shtrigul, V. K., Smirnov, D. A. (2013). Rennet coagulation: Formation of the milk proteins microparticulates. *Cheese- and Buttermaking*, 1, 42–44. (In Russian)]
39. Смирнова, И. А., Гралевская, И. В., Штригуль, В. К., Смирнов, Д. А. (2012). Исследование способов коагуляции молока с целью формирования микропартикулятов белков молока. *Техника и технология пищевых производств,* 3, 112–120. [Smirnova, I.A., Gralevskaya, I. V., Shtrigul, V. K., Smirnov, D. A. (2012). Investigation of various ways of milk coagulation for the purpose of milk protein microparticles formation. *Food Processing: Techniques and Technology*, 3, 112–120. (In Russian)]
40. Лосев, А. Н., Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Коротков, Е. Г. (2016). Творог с микропартикулятом сывороточных белков. *Молочная промышленность,* 1, 31–33. [Losev, A. N., Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Korotkov, E. G. (2016). The curds with whey protein microparticulate. *Dairy Industry,* 1, 31–33. (In Russian)]
41. Мельникова, Е. И., Подгорный, Н. А., Станиславская, Е. Б. (2010). Имитатор молочного жира для синбиотических продуктов. *Молочная промышленность,* 7, 55–56. [Mel’nikova, E. I., Podgornyi, N. A., Stanislavskaya, E. B. (2010). Milk fat imitator for symbiotic products. *Dairy Industry*, 7, 55–56. (In Russian)]
42. Патент 2616366C1. Способ получения низкожирного мороженого с микропартикулятом сывороточных белков / Евдокимов И. А., Анисимов С. В., Куликова, И. А., Рябцева С. А., Анисимов Г. С., Медведева Г. В. и др. Опубл. 14.04.2017, Бюл. № 11. [Evdokimov I. A., Anisimov, S. V., Kulikova I. A., Ryabtseva S. A., Anisimov, G. S., Medvedeva, G. V. et al. Method for producing low-fat ice cream with microparticulate whey proteins. Patent RF no. 2616366C1. 2017. (In Russian)]
43. Патент 2607035C1. Способ получения кисломолочного продукта с микропартикулятом сывороточных белков / Мельникова Е. И., Лосев А. Н., Станиславская Е. И. Опубл. 10.01.2017, Бюл № 1. [Melnikova, E. I., Losev A. N., Stanislavskaya, E. B. Method for production of cultured milk product with whey protein microparticulate. Patent RF no. 2607035C1. 2017. (In Russian)]
44. Евдокимов, И. А., Кравцов, В. А., Федорцов, Н. М., Богоровская, М. А., Бобрышева, Т. Н., Золоторева, М. С. и др. (2021). Состав и свойства микропартикулятов сывороточных белков. *Молочная промышленность*, 4, 40–44. [Evdokimov, I. A., Kravtsov, V. A., Fedortsov, N. M., Bogorovskaya, M. A., Bobrysheva, T. N., Zolotoreva, M. S. et al. (2021). Composition and properties of whey protein microparticulates. *Dairy Industry*, 4, 40–44. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-04-40-44
45. Hossain, M. K., Petrov, M., Hensel, O., Diakité, M. (2021). Microstructure and physicochemical properties of light ice cream: Effects of extruded microparticulated whey proteins and process design. *Foods*, 10(6), Article 1433. https://doi.org/10.3390/foods10061433
46. Torres, I. C., Mutaf, G., Larsen, F. H., Ipsen, R. (2016). Effect of hydration of microparticulated whey protein ingredients on their gelling behaviour in a non-fat milk system. *Journal of Food Engineering*, 184, 31–37. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.018
47. Дымар, О. В. (2014). Технологические аспекты использования микропартикулятов сывороточных белков при производстве молочных продуктов. *Молочная промышленность,* 6, 18–21. [Dymar, O. V. (2014). Technological aspects of applying microparticulates of whey proteins at milk products manufacturing. *Dairy Industry*, 6, 18–21. (In Russian)]
48. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Хабаров, Н. С. (28–29 мая 2015). *Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии творога*. Материалы V Международной научно-практической конференции «Инновационные пищевые технологии в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья: фундаментальные и прикладные аспекты» КНИИХП, Краснодар, Россия. Ассоциация «ТППП АПК», Воронеж, 2015. [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Khabarov, N. S. (May 28–29, 2015). *Application microparticulated whey protein technology cottage cheese*. Proceedings of the 5th International scientific-practical conference “Innovative food technologies in the field of storage and processing of agricultural raw materials: fundamental and applied aspects”. Krasnodar, Russia, 123–126. (In Russian)]
49. Пономарев, А. Н., Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б. (2016). Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии плавленых сыров. *Сыроделие и маслоделие,* 5, 42–43. [Ponomarev, A. N., Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B. (2016). Whey protein microparticulate application in processed cheese technology. *Cheese- and Buttermaking*, 5, 42–43. (In Russian)]

50. Станиславская, Е. Б., Подгорный, Н. А., Мельникова, Е. И. (8 октября 2013 г.) *Получение микропартикулята сывороточных белков и его реализация в технологии молочных продуктов*. Сборник научных трудов VII конференции молодых ученых и специалистов научно-исследовательских институтов Отделения хранения и переработки сельскохозяйственной продукции Россельхозакадемии «Научный вклад молодых ученых в развитие пищевой и перерабатывающей промышленности АПК». Москва, Россия, 2013. [Stanislavskaya, E. B., Podgornyi, N. A., Melnikova, E. I. (October 8, 2013). *Production of the whey protein microparticulate and its application in the technology of dairy products*. Proceedings of the 7th Conference of young scientists and specialists of scientific-research institutes of the Department of Storage and Processing of Agricultural Products of Rosselkhozacademia “Scientific contribution of young scientists to the development of food and processing industry of AIC”. Moscow, Russia, 2013. (In Russian)]
51. Мельникова, Е. И. Попова, Е. Е., Станиславская, Е. Б. (2012). Разработка рецептуры низкокалорийного мороженого с функциональными ингредиентами. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6, 48–50. [Melnikova, E. I. Popova, E. E., Stanislavskaya, E. B. (2012). Development of a low-calorie ice cream recipe with functional ingredients. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6, 48–50. (In Russian)]
52. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Подгорный, Н. А. (2011). Плавленый сыр с микропартикулятом сывороточных белков. *Сыроделие и маслоделие*, 1, 10–11. [Mel’nikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Podgorny, N. A. (2011). Processed cheese with whey protein particulate. *Cheese- and Buttermaking*, 1, 10–11. (In Russian)]
53. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б. (2019). Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии полутвердых сыров. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 129–138. [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B. (2019). Application of microparticulates of whey proteins in the technology of semi-hard cheeses. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 129–138. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2019.199
54. Torres, I. C., Amigo, J. M., Knudsen, J. C., Tolkach, A., Mikkelsen, B. Ø., Ipsen, R. (2018). Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer. *International Dairy Journal*, 81, 62–71. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.01.004
55. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Шабалова, Е. Д. (2022). Функционально-технологические свойства термостабильного концентрата сывороточных белков». *Вестник воронежского государственного университета инженерных технологий*, 84 (2), 52–56. [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Shabalova, E. D. (2022). Functional and technological properties of thermostable whey protein concentrate. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 84 (2), 52–56. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-52-56. (In Russian)]
56. Патент 2676954C1. Способ производства синбиотического продукта, обогащенного витаминно-минеральными комплексами / Донских А. Н., Анисимов С. Г., Артамонов И. Б., Медвецкая А. В. Опубл. 11.01.2019, Бюл. № 2. [Donskikh A. N., Anisimov, S. G., Artamonov, I. B., Medvetskaya, A. V. Method for manufacturing synbiotic product enriched with vitamin and mineral complexes. Patent RF no. 2676954 C1. 2019. (In Russian)]
57. Патент 2440002C1. Способ приготовления синбиотического продукта / Мельникова Е. И., Шишацкий Ю. И., Енин В. И., Станиславская, Е.Б., Бырбыткин В. А., Бырбыткина Г. В. и др. Опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. [Melnikova, E. I., Shyshatskiy Yu. I., Stanislavskaya, E. B., Byrbytkin V. A., Byrbytkina G. V. et al. Synbiotic product preparation method. Patent RF no. 2440002C1. 2012. (In Russian)]
58. Станиславская, Е. Б., Мельникова, Е. И. (2018). Применение микропартикулята сывороточных белков в технологии кефира. *Молочная промышленность*, 8, 49–51. [Stanislavskaya, E. B., Melnikova, E. I. (2018). Application of whey proteins microparticulate in the technology of kefir production. *Dairy Industry*, 8, 49–51. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/1019-8946-2018-8-49-51
59. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б., Коротков, Е. Г. (10–12 октября 2018 г.) *Применение микропартикулятов сывороточных белков в технологии молокоемких молочных продуктов*. «Цифровизация агропромышленного комплекса» I Международная научно-практическая конференция. Тамбов, Россия, 2018. [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B., Korotkov, E. G. (October 10–12, 2018). Application of microparticles of whey proteins in technology of milk-intensive dairy products. Digitalization of the agro-industrial complex. I International Scientific and Practical Conference. Tambov, Russia, 2018. (In Russian)]
60. Melnikova, E. I., Losev, A. N., Stanislavskaya, E. B. (2017). Microparticulation of caseic whey to use in fermented milk production. *Foods and Raw Materials*, 5(2), 83–93. http://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-83-93
61. Варивода, А. А. (2015). Использование микропартикулята сывороточных белков в качестве добавки для маложирных плавленых сыров. *Труды Кубанского государственного аграрного университета,* 57, 169–175. [Varivoda, A. A. (2015). Use of whey proteins microparticullate as the additive to low-fat processed cheeses. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University,* 57, 169–175. (In Russian)]
62. Патент 2726438C2. Способ получения сухой высокобелковой молочной смеси для профилактики остеопении у детей и подростков с целиакией / Кочнева Л. Д., Климов Л. Я., Стоян М. В., Курьянинова В. А., Донских А. Н. Опубл. 14.05.2020, Бюл. № 14. [Kochneva, L. D., Klimov L. Ya., Stoyan M. V., Kuryaniniva V. A., Donskikh A. N. Method for production of a dry high protein milk mixture for prevention of osteopenia in children and adolescents with gee’s disease. Patent RF no. 2726438C2. 2020. (In Russian)]
63. Патент 2661396C1. Способ производства и состав белкового (протеинового) мороженого / Танерова Л. Н., Сурдина О. В. Опубл. 16.07.2018, Бюл. 20. [Tanerova L. N., Surdina O. V. Method of production and composition of protein ice-cream. Patent RF no. 2661396. 2017 (In Russian)]
64. Патент 2465774C1. Способ получения кисломолочного напитка / Альхамова Г. К., Ребезов М. Б., Наумова Н. Л., Амирханов И. М., Лиходумова М. А. Опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. [Alkhamova, G. K., Rebezov M. B., Amirkhanov I. M., Likhodumova M. A. Cultured milk beverage production method. Patent RF no. 2465774 C1. 2012. (In Russian)]
65. Мельникова, Е. И., Станиславская, Е. Б. (2009). Микропартикуляты сывороточных белков как имитаторы молочного жира в производстве продуктов питания. *Фундаментальные исследования*, 7, 23. Электронный ресурс: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=2108 Дата обращения: 09.06.2023. [Melnikova, E. I., Stanislavskaya, E. B. (2009). Whey protein microparticulates as imitators of milk fat in food production. *Fundamental Research*, 7, 23. Retrieved from https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=2108 Accessed 09.06.2023. (In Russian)]
66. Ефимова, Е. В., Вырина, С. И., Шлемен, М. М., Дмитрук, Е. М. (2018). Технологические особенности использования сухих микропартикулированных белков для производства белковых продуктов из пахты. *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*, 12, 77–85. [Efimova, E. V., Virina, S. I., Shlemen, M. M., Dmitruk, E. M. (2018). Technological features of the use of dry microparticulated proteins for production of protein products from buttermilk. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials,* 12, 77–85. (In Russian)]
67. Лосев, А. Н., Станиславская, Е. Б., Мельникова, Е. И. (2017). Новые технологические решения в переработке творожной сыворотки. Часть 2. Применение микропартикулятов творожной сыворотки в технологии кисломолочных напитков. *Молочная промышленность*, 4, 57–58. [Losev, A. N., Stanislavskaya, E. B., Melnikova, E. I. (2017). New technological solutions in quark whey processing. Part 2. Application of curds whey microparticulate in the technology of fermented milk products. *Dairy Industry*, 4, 57–58. (In Russian)]
68. Töpel, A. (2007). Chemistry and physics of milk. Behr, 2007. (In German)]
69. Патент 2668165C2. Способ получения высокобелкового молочного коктейля / Донских А. Н., Анисимов Г. С., Артамонов Т. Б., Метель В. С., Куликова И. К., Медвецкая А. В. Опубл. 26.09.2018, Бюл. № 27. [Donskikh A. N., Anisimov, G. S., Artamonov I. B., Metel V. S., Kulikova I. K. Medvetskaya, A. V. Method for producing a high-protein milkshake. Patent Rf2668165C2. 2018. (In Russian)]
70. Sturaro, A., Penasa, M., Cassandro, M., Varotto, A., De Marchi, M. (2014). Effect of microparticulated whey proteins on milk coagulation properties. *Journal of Dairy Science*, 97(11), 6729–6736. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8157
71. Zhang M., Chanchan S., Rui L., Tao W. Composite fat simulant and preparation method thereof. Patent CN no. 104605031A. 2015.
72. Sturaro, A., De Marchi, M., Zorzi, E., Cassandro, M. (2015). Effect of microparticulated whey protein concentration and protein-to-fat ratio on Caciotta cheese yield and composition. *International Dairy Journal*, 48, 46–52. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.02.003
73. Chung, S. J., Heymann, H., Grün, I. U. (2004). Release of artificial cherry flavor from ice creams varying in fat and fat replacers. *Journal of Sensory Studies*, 19(3), 211–236. https://doi.org/10.1111/j.1745–459x.2004.tb00145.x
74. Hossain, M. K., Keidel, J., Hensel, O., Diakité, M. (2020). The impact of extruded microparticulated whey proteins in reduced-fat, plain-type stirred yogurt: Characterization of physicochemical and sensory properties. *LWT*, 134, Article 109976. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109976
75. Ohmes, R. L., Marshall, R. T., Heymann, H. (1998). Sensory and physical properties of ice creams containing milk fat or fat replacers. *Journal of Dairy Science*, 81(5), 1222–1228. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(98)75682-6
76. Aykan, V., Sezgin, E., Guzel-Seydim, Z. B. (2008). Use of fat replacers in the production of reduced434 calorie vanilla ice cream. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(6), 516–520. https://doi.org/10.1002/ejlt.200700277
77. Ipsen, R. (2017). Microparticulated whey proteins for improving dairy product texture. *International Dairy Journal*, 67, 73–79. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.08.009
78. Fuangpaiboon, N., Kijroongrojana, K. (2017). Sensorial and physical properties of coconut-milk ice cream modified with fat replacers. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 11(02), 133–147.
79. Варивода, А. А., Патаркалашвили, Т. Г. (2015). Разработка мороженого с микропартикулятом сывороточных белков для диабетического и диетического питания. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 56, 227–232. [Varivoda, A. A., Patarkalashvili, T. G. (2015). Development of ice cream with whey proteins microparticullate for diabetic and dietary food. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University,* 56, 227–232. (In Russian)]
80. Варивода, А. А., Патаркалашвили, Т. Г. (2016). Заменители молочного жира в производстве мороженого. *Проблемы развития АПК региона*, 1–1(25), 182–184. [Varivoda, A. A., Patarkalashvili, T. G. (2016). Milk fat replacer in the ice-cream production. *Development Problems of the Regional Agro-Industrial Complex*, 1–1 (25), 182–184. (In Russian)]
81. Мельникова, Е. И., Попова, Е. Е., Станиславская, Е. Б. (2012). Низкокалорийное мороженое с микропартикулятом сывороточных белков. *Пищевая промышленность*, 10, 60–61. [Melnikova, E. I., Popova, E. E., Stanislavskaya, E. B. (2012). Low-fat ice cream with whey proteins microparticulate. *Food Industry*, 10, 60–61. (In Russian)]
82. Пономарев, А. Н., Мельникова, Е. И., Попова, Е. Е. (2015). Микропартикулят сывороточных белков в низколактозном мороженом. *Молочная промышленность*, 4, 46–47. [Ponomarev, A. N., Mel’nikova, E. I., Popova, E. E. (2015). Microparticulate of whey proteins in the low lactose ice-cream. *Dairy Industry*, 4, 46–47. (In Russian)]
83. Асланова, М. Н., Куликова, И. К., Евдокимов, И. А., Володин, Д. Н., Золотарева, М. С. (2014). Выживаемость молочнокислых микроорганизмов в низкожирном пробиотическом мороженом. *Молочная промышленность*, 10, 51–53. [Aslanova, M. N., Kulikova, I. K., Evdokimov, I. A., Volodin, D. N., Zolotareva, M. S. (2014). Viability of lactic acid microorganisms in the low fat probiotic ice-cream. *Dairy Industry*, 10, 51–53]
84. Prindiville, E. A., Marshall, R. T., Heymann, H. (2000). Effect of milk fat, cocoa butter, and whey protein fat replacers on the sensory properties of lowfat and nonfat chocolate ice cream. *Journal of Dairy Science*, 83(10), 2216–2223. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(00)75105-8

85. Liou, B. K., Grün, I. U. (2007). Effect of fat level on the perception of five flavor chemicals in ice cream with or without fat mimetics by using a descriptive test. *Journal of Food Science*, 72(8), S595–S604. https://doi.org/10.1111/j.1750–3841.2007.00494.x

86. Aykan, V., Sezgin, E., Guzel-Seydim, Z. B. (2008). Use of fat replacers in the production of reduced-calorie vanilla ice cream. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110(6), 516–520. https://doi.org/10.1002/ejlt.200700277

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Ситникова Полина Борисовна — кандидат технических наук, научный сотрудник, Лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 Тел.: +7–495–610–83–85 E-mail: sitnikova.p.b@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146	**Polina B. Sitnikova,** Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova Str., 127422, Moscow, Russia Tel.: +7–495–610–83–85 E-mail: sitnikova.p.b@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4098-9146
Казакова Наталия Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория технологии мороженого, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 Тел.: +7–495–610–83–85 E-mail: nkazak.53@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294	**Natalia V. Kazakova,** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Ice Cream Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostyakova Str., 127422, Moscow, Russia Tel.: +7–495–610–83–85 E-mail: nkazak.53@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2963-6294
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393

Поступила 01.08.2024
Поступила после рецензирования 23.08.2024
Принята в печать 27.08.2024
© Абрамова Л. С., Козин А. В., Гусева Е. С., 2024

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

НОВЫЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА: РИСКИ ПРИ МИГРАЦИИ ЛОСОСЕВЫХ ВИДОВ РЫБ. ОБЗОР

Абрамова Л. С., Козин А. В.*, Гусева Е. С.

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
лососевые виды рыб, факторы риска, сточные воды, биоаккумуляция, масс-спектрометрия, омикс-технологии

АННОТАЦИЯ

Попадание в окружающую среду загрязняющих веществ является серьезной экологической проблемой в связи со значительными рисками, которые они представляют как для экосистем, так и для здоровья человека. В обзоре рассматриваются вопросы выявления и распространения новых загрязняющих веществ, а также источники их поступления в окружающую среду и потенциальное воздействие на экосистемы. Особую актуальность проблема загрязнения сточных вод приобретает в контексте сохранения лососевых видов рыб. Фармацевтические и ветеринарные препараты, компоненты средств личной гигиены, микропластик, пер- и полифторированные вещества, бромированные антипирены, нефть и ряд других токсикантов попадают в пресные водоемы, которые особенно важны для ранних этапов развития лосося и его дальнейшей миграции. Присутствие загрязняющих веществ в водной среде зависит от источника, от способности их к биоаккумуляции, а также к деградации в процессах биологической и абиотической очистки. Для определения новых загрязнителей может быть рекомендована масс-спектрометрия высокого разрешения в сочетании с газовой или жидкостной хроматографией. Этот метод, благодаря высокой точности измерения масс и высокой избирательности, способен эффективно идентифицировать загрязнители даже в сложной рыбной матрице. При проведении нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием целесообразно использовать масс-анализаторы высокого разрешения (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), позволяющие определять целый ряд новых соединений. Перспективным направлением при комплексной оценке влияния загрязнителей на лососевые виды рыб и при выявлении индикаторов, характеризующих это влияние, является метаболомика. Она основана на изучении низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена в жидкостях и тканях организма. Метаболомное профилирование позволяет выявить важные маркеры состояния водного объекта под воздействием загрязнителей, что необходимо для разработки всеобъемлющих нормативных актов и руководств по эффективному обращению с этими загрязнителями.

Received 01.08.2024
Accepted in revised 23.08.2024
Accepted for publication 27.08.2024
© Abramova L. S., Kozin A. V., Guseva E. S., 2024

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

EMERGING POLLUTANTS: RISKS IN SALMON FISH MIGRATION. A REVIEW

Liubov S. Abramova, Andrei V. Kozin*, Elena S. Guseva

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, Russia

KEY WORDS:
salmonid fish species, risk factors, wastewater, bioaccumulation, mass spectrometry, omics technologies

ABSTRACT

The release of pollutants into the environment is a serious ecological problem due to the significant risks they pose both to ecosystems and to human health. The review considers the issues of detection and distribution of new pollutants, as well as sources of their entry into the environment and potential impact on ecosystems. The problem of wastewater pollution is especially urgent in the context of conservation of salmonid fish species. Pharmaceutical and veterinary drugs, components of personal hygiene products, microplastics, per- and polyfluorinated substances, brominated flame retardants, oil and a number of other toxicants enter freshwater bodies, which are especially important for the early stages of the salmon development and its following migration. The presence of pollutants in the aquatic environment depends on a source, their ability to bioaccumulate, as well as to degrade in the processes of biological and abiotic purification. High-resolution mass spectrometry in combination with gas or liquid chromatography can be recommended for detection of new pollutants. Due to high mass measurement accuracy and high specificity, this method is able to effectively identify pollutants even in the complex fish matrix. When conducting non-targeted and targeted screening with highly sensitive full scanning, it is advisable to use high-resolution mass analyzers (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), which allow determining a number of new compounds. A promising direction in the complex assessment of the impact of pollutants on salmon fish species and the identification of indicators characterizing this impact is metabolomics. It is based on the study of low-molecular organic compounds — metabolites, both intermediate and final metabolic products in body fluids and tissues. Metabolomic profiling allows identifying important markers of the state of a water body under the influence of pollutants, which is necessary for the development of comprehensive regulations and guidelines for the effective handling of these pollutants.

1. Введение

В последние десятилетия появление новых загрязняющих веществ (НЗВ) антропогенного или природного происхождения в водных экосистемах стало глобальной экологической проблемой, вызывающей серьезные опасения в связи с их потенциальным неблагоприятным воздействием на водные объекты [1,2]. Эти загрязняющие вещества не включены в программы мониторинга или надзорной деятельности и, следовательно, не регламентируются природоохранным законодательством. Однако предполагается, что эти загрязняющие вещества оказывают токсическое воздействие на экосистемы или здоровье человека.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Абрамова, Л. С., Козин, А. В., Гусева, Е. С.** (2024). Новые загрязняющие вещества: риски при миграции лососевых видов рыб. Обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 384–393. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393

FOR CITATION: **Abramova, L. S., Kozin, A. V., Guseva, E. S.** (2024). Emerging pollutants: Risks in salmon fish migration. A review. *Food Systems*, 7(3), 384–393. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-384-393

НЗВ можно охарактеризовать как химические вещества, полученные в результате научно-технологического прогресса и обнаруженные в окружающей среде. Их влияние на здоровье человека и природу изучено не до конца, однако известно, что они представляют потенциальную или реальную угрозу. НЗВ характеризуются обширным распространением, неконтролируемым содержанием в окружающей среде и широким спектром потенциальных угроз [3]. Помимо индивидуального воздействия, важно учитывать потенциальный риск неблагоприятных последствий от взаимодействия анализируемых веществ, таких как аддитивные, синергетические и антагонистические эффекты [4,5]. Изучение синергизма между различными загрязнителями требует проведения обширных исследований, поскольку синергетические и антагонистические эффекты зависят от дозы, от вида организма и от окружающей среды. Однако отсутствие учета последствий комбинированного воздействия может привести к недооценке риска [6].

В базе данных PubChem зарегистрировано около 118 млн химических соединений и 320 млн веществ [7], из которых 1,2 млн относятся к категории опасных [8].

Множество химических соединений принято называть химическим пространством. Выделение отдельного пространства тех или иных веществ, особенно опасных для окружающей среды, предоставляет возможности глубокого изучения связи между структурой и свойствами таких соединений и совершенствования химико-аналитических методов [8,9].

Для борьбы с загрязнением среды проводятся исследования, которые можно разделить на четыре направления: определение видов загрязняющих веществ и их распространение; источники появления и стабильность в окружающей среде; воздействие на окружающую среду и здоровье человека; оценка риска для природы и человека. Этой проблеме уделяется большое внимание во всем мире, о чем свидетельствует число публикаций, которое растет в геометрической прогрессии [10]. По одной только теме «прибрежные воды» количество статей к 2030 году должно увеличиться в два раза [11].

Кроме того, разрабатываются специальные программы мониторинга природной среды, предусматривающие выявление не только известных опасных веществ, но и новых загрязнителей. Примером является инициатива Китайской Народной Республики, в соответствии с которой разработан план действий на 2021–2025 годы. Он предусматривает осуществление контроля над наиболее распространенными и широко используемыми НЗВ, проведение оценки экологического риска для соединений, представляющих реальную угрозу здоровью человека, а также окружающей среде. Это позволит создать модернизированную систему управления новыми загрязнителями и поможет снизить их влияние [12].

НЗВ широко распространены как во внутренних водоемах, так и в океанических водах [13]. Большую опасность НЗВ представляют для таких массовых водных объектов промысла, как лососевые рыбы, которые начинают и завершают свой жизненный путь в пресных водах, а основной прирост своей биомассы получают в морской среде. Так, в 2023 году общий промышленный вылов тихоокеанских лососей на азиатском и американском побережьях составил 1,1 млн тонн. По итогам промысла на первом месте — Россия (55% общего вылова, или 608 тыс. тонн) [14], на втором — США (39%), доля Японии — 5,6%, а Канады и Республики Корея — менее 1% [15].

Изучение влияния новых загрязнителей на лососевые виды рыб имеет большое значение для определения возможной биоаккумуляции, для оценки рисков, для понимания последствий и для принятия своевременных мер по их устранению с целью сохранения этих ценных водных объектов промысла.

Цель обзора заключается в анализе новых загрязняющих веществ, методов их определения, а также в выявлении индикаторов, отражающих влияния среды обитания на состояние лососевых видов рыб в условиях антропогенной нагрузки.

2. Материалы и методы

Систематический поиск научной литературы был проведен с использованием поисковых систем PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar по ключевым фразам «лососевые рыбы/salmon», «новые загрязнители/emerging contaminants (ECs)», «нецелевой анализ/non-targeted analysis», «масс-спектрометрия высокого разрешения/high-resolution spectrometry», «метаболиты/metabolites» с включением операторов «и» и «или». Исследования были сгруппированы по тематическим областям обзора, статьи исключались на основании предварительного анализа названия и аннотации. Предпочтение отдавалось работам, опубликованным не более пяти лет назад в зарубежных журналах. Также были применены данные из источников научно-технической информации, касающиеся тематики данного обзора.

3. Основные источники распространения новых загрязняющих веществ

Биоконцентрация и биоаккумуляция загрязняющих веществ в водной среде, приводя к их накоплению в пищевых цепях, представляют серьезную проблему. Это касается как известных, так и новых загрязнителей, оказывающих негативное влияние не только на водные биоресурсы, но и на здоровье человека [16,17].

Примерами новых загрязнителей могут являться 1,4-диоксан, перфторированные соединения, полибромированые дифениловые эфиры, наночастицы, натуральные и синтетические гормоны, некоторые из которых действуют как химические вещества, нарушающие работу эндокринной системы [18]. К НЗВ относятся также химические вещества, которые ранее использовались, но лишь недавно стали рассматриваться как представляющие опасность, такие как микро- и нанопластик [19], компоненты средств личной гигиены [20] и фармацевтические препараты [21,22,23], включая традиционные эндокринные разрушители (дисрапторы) [24], разные классы пестицидов [25,26,27].

Появление новых загрязнителей — глобальная проблема, обусловленная постоянным развитием технологий производства соединений и модификацией новых заменителей. Этот процесс требует пристального внимания мирового научного сообщества [28,29]. Например, в заливе Сан-Франциско (Калифорния), представляющими опасность являются нонилфенол и этоксилаты нонилфенола, фипронил, перфтороктановый сульфонат и другие перфторалкильные вещества, наличие которых обусловлено широким использованием изделий из пластмасс и синтетических моющих средств. Однако в регионе Великих озер (система пресноводных озер в Северной Америке, на территории США и Канады) полибромдифениловые эфиры, гексабромциклододекан и короткоцепочечные хлорированные парафины стали новыми химическими загрязнителями, представляющими проблему для Канады и Соединенных Штатов. Кроме того, красители [30], эфиры фталевой кислоты [31], карбамазепин, бисфенол А, триклозан, пиретроиды [32] также были названы новыми загрязнителями, которые требуют особого изучения и контроля [33].

Несмотря на то, что многие пестициды, такие как ДДТ и фосфорорганические соединения, считаются устаревшими, некоторые из них, например, фипронил, пиретроиды, неоникотиноиды и родентициды, относятся к группе НЗВ [34].

В связи с ростом числа заболеваний кожи, вызванных солнечным излучением, потребление солнцезащитных средств в мире достигло 10 000 тонн в год. Большинство из них содержат сразу несколько химических УФ-фильтров [32,35]. Содержащееся в солнцезащитном креме соединение 4-метилбензилиденкамфора (4-МВС) было обнаружено в пробах окружающей среды на испанском побережье и в швейцарских озерах в концентрации от 2 до 125 нг/л. Оценка риска показала, что 4-МВС представляет собой потенциальную опасность для водных объектов [36]. Другие органические соединения, используемые в качестве ингредиента солнцезащитных кремов и косметики, такие как октокрилен, 3-бензилиден-камфора и бензофенон-3, также были идентифицированы в окружающей среде. Эти вещества представляют опасность для морских экосистем, оказывая стрессовое воздействие на гидробионтов [32].

В окружающей среде, особенно в водной, содержится большое количество НЗВ, которые предложено классифицировать по химическому составу и спектру применения на 4 класса (Таблица 1) [37]. В Таблице приведены примеры для каждого класса, однако спектр НЗВ намного шире.

Для лососевых видов рыб проблема воздействия НЗВ, таких как стойкие органические загрязнители, пищевые добавки и красители, фармацевтические препараты и средства личной гигиены, микро- и нанопластик и ряд других соединений, особенно актуальна в связи с особенностями их миграции и развития на начальном периоде существования в пресной речной воде, в которую и попадают указанные выше токсиканты (Рисунок 1).

Некоторые токсичные вещества могут не только препятствовать миграции, но и отклонять эти виды рыб от маршрута [38]. Выявление связи между биоаккумуляцией НЗВ и их воздействием на живые организмы остается сложной задачей, требующей современных решений. Перспективными являются методы протеомного и метаболомного профилирования, такие как хромато-масс-спектрометрия, ЯМР-спектрометрия и другие омиксные технологии, позволяющие анализировать изменения в тканях [39].

Таблица 1. **Перечень новых загрязняющих веществ НЗВ, классифицированных в зависимости от их состава и спектра применения**

Table 1. **List of new pollutants classified according to their composition and spectrum of use**

№	Класс	Подкласс	Примеры соединений
1	Органические загрязнители	Эндокринные разрушители	17-α -этинилэстрадиол, 17-β-эстрадиол, эстрон, стероидные гормоны, эфиры фталевой кислоты, бисфенолы
		Пищевые и кормовые добавки	2,6-дитрет-бутил-4-метилфенол
		Стойкие органические загрязнители	Бромированные антипирены, полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, хлорированные парафины, перфторированные соединения, полибромированные дифениловые эфиры, пер- и полифторалкильные соединения
		Фармацевтические препараты и средства личной гигиены	Дезинфицирующие средства: побочные продукты дезинфекции, хлораты, формальдегид; пентахлорфенол, его соли и эфиры; диклорфенак. Косметические средства: 2-этилгексил 4-метоксициннамат. Анальгетики и противовоспалительные средства: флумеквин, триметоприм, кеторолак, обезболивающие, запрещенные наркотические препараты, макролидные антибиотики
		Поверхностно-активные вещества	
		Органические растворители/ пластификаторы	Гексахлорбутадиен, дехлоран плюс (цис и транс изомеры), дихлорметан, хлороформ, нонилфенолы
		Пестициды и гербициды	Метиокарб, неоникотиноиды, оксадиазон, три-аллат, перхлорат, дикофол
		Цианотоксины	Микроцистин(ы), цилиндроспермопсин, анатоксин(ы), сакситоксин(ы)
2	Неорганические загрязнители	Металлы	Стронций, марганец, вольфрам, литий
		Наночастицы	
		Радионуклиды и радиоактивные отходы	H-3, Sr-90, Cs-137, Ts-99, I-129, Pu-239, Pu-240 (233, 234, 235, 238), U, Am-241
3	Биологические загрязнители	Вирусы	
		Белковые загрязнители	
		Генетически модифицированные организмы	
		Различные типы РНК	
		Пептидные комплексы	
4	Другие загрязнители	Микро- и нанопластик	
		Жидкие кристаллические мономеры	
		Устойчивые к воздействию окружающей среды свободные радикалы	
		Вещества неизвестного или изменяющегося состава, сложные продукты реакций или биологические материалы	

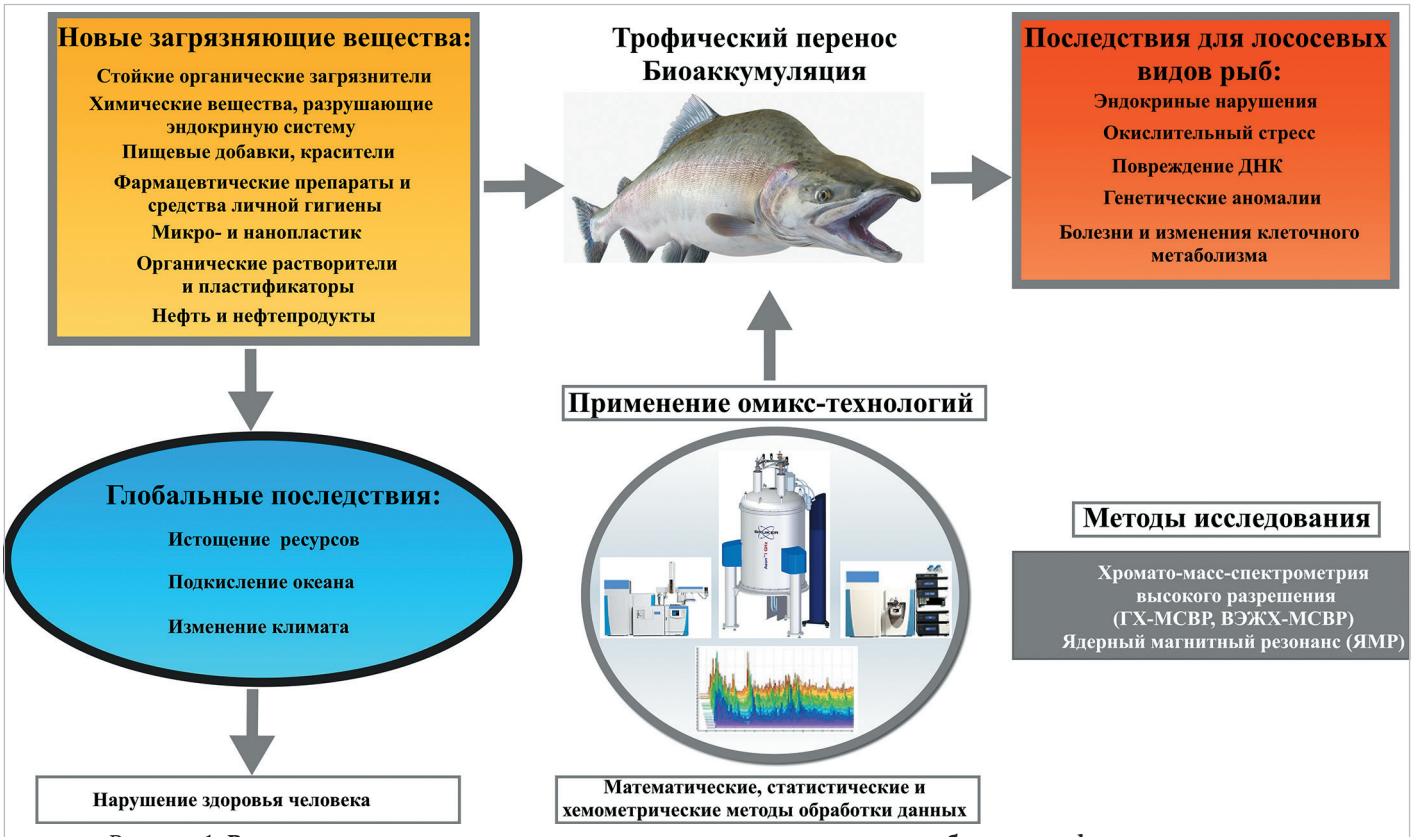


Рисунок 1. **Влияние новых загрязняющих веществ на лососевые виды рыб, пути трофического переноса и методы исследования**

Figure 1. **Effect of new pollutants on salmonid fish species, routes of trophic transfer and methods of investigation**

3.1. Сточные воды — источник распространения новых загрязняющих веществ

Городские стоки обычно загрязняются синтетическими органическими загрязнителями, металлами и неорганическими веществами, возникающими из самых разных источников. Без соответствующей очистки эти химические вещества и связанные с ними продукты трансформации переносятся в поверхностные или грунтовые воды путем преднамеренного сброса, инфильтрации или наземного стока, где они ухудшают качество воды [40]. Многие загрязнители, такие как пестициды, нефтяные углеводороды, тяжелые металлы и другие химические вещества, попадающие из городских стоков, потенциально токсичны в высоких концентрациях и представляют угрозу для окружающей среды. Очищенные или неочищенные сточные воды (СВ) являются основными источниками загрязнения водных бассейнов средствами личной гигиены человека (СЛГ) и некоторыми фармацевтическими препаратами (ФП). Использование человеком различных лекарственных препаратов приводит к попаданию ФП в виде исходных соединений или метаболитов в сточные воды через мочу и фекалии. СЛГ включают химические ингредиенты в гигиенических и косметических продуктах, таких как мыло, моющие средства, солнцезащитные кремы, увлажняющие средства, помады, краски для волос, дезодоранты, лосьоны, кремы, шампуни, зубные пасты и репелленты [41]. Эти соединения также попадают в окружающую среду с бытовыми или промышленными сточными водами.

Одним из примеров воздействия бытовых или промышленных СВ на лососевые виды рыб является повышенная смертность важных промысловых видов взрослых особей кижуча (*Oncorhynchus kisutch*). Исследования показали, что это явление не связано с типичными показателями химического состава воды (температурой, содержанием кислорода, взвешенными веществами), с болезнями, с состоянием рыб, с воздействием пестицидов, тяжелых металлов или ПАУ. Вероятно, гибель кижуча вызвана неидентифицированными токсикантами [42]. Как правило, мониторинг содержания известных загрязнителей в среде обитания объектов основан на использовании целевых маркеров, эталонных стандартов (например, ПАУ, металлов и пестицидов), часто в сочетании с контролируемым воздействием и пониманием механизмов их действия для корреляции установленных концентраций с биологическим состоянием объекта. Однако такие целевые анализы выявляют только небольшую часть присутствующих загрязнителей и могут быть ограничены отсутствием эталонных стандартов для новых загрязнителей и продуктов биоактивной трансформации.

Проведенные научные исследования показали, что N-(1,3-Диметилбутил)-N’-фенил-n-фенилендиамин (6PPD) был причиной загадочной гибели кижуча (Oncorhynchus kisutch), которая наблюдалась в нескольких местах вдоль западного побережья Северной Америки в последние десятилетия [43]. Известно, что 6PPD используется при производстве шин в качестве антиоксиданта и антиозонанта для резиновых изделий. Продукт трансформации этого соединения (его метаболит) — N-1,3-диметилбутил-N’-фенил-n-хинондиамин (6PPDQ) — также обладает стойкостью в окружающей среде и токсическим действием, что подчеркивает острую необходимость постоянного мониторинга и разработки эффективных мер для снижения последствий воздействия как на экосистему, так и на здоровье человека [44]. Это требует проведения исследований для выявления хронических последствий воздействия этих соединений даже в низких концентрациях на водные экосистемы, а также определения возможности биоаккумуляции в пищевой цепи [45]. Идентификация биомаркеров действия 6PPD и 6PPDQ позволит выявить потенциальную опасность 6PPD для рыб и человека, а также целесообразность его использования в производстве шин. Проблема стоит очень остро, так как новые исследования установили, что городские стоки с проезжей части являлись причиной смерти молоди кижуча, симы и чавычи [46,47].

Хорошо известно, что установки по очистке сточных вод выбрасывают сложные смеси химикатов в водную среду, однако токсичность этих смесей до сих пор плохо изучена. Резкое сокращение численности чавычи (Oncorhynchus tshawytscha) в регионе Пьюджет-Саунд и отсутствие признаков восстановления, несмотря на предпринятые на региональном и федеральном уровне меры, стали причиной проведения исследований [48]. Сделано предположение, что одной из причин снижения запасов молоди чавычи является химическое загрязнение СВ во время их миграции по речным коридорам и проживания в устьях рек. Для подтверждения данного предположения исследовано влияние разбавленных СВ от 0,1% до 20% на состояние молоди чавычи при десятидневном воздействии. По окончании исследования были измерены показатели, связанные с эндокринными нарушениями, функцией мозга, осморегуляцией, стрессом и обменом веществ. Воздействие СВ в значительной степени индуцировало вителлогенез, что указывало на нарушение эндокринной системы у рыб. Установлено значительное снижение уровня глюкозы в плазме, что являлось признаком стресса и изменения активности Na+/K+-АТФазы мозга — фермента (АФ), необходимого для передачи сигналов нейронами. Показано, что на метаболизм повлияло изменение общего белка, холестерина и альбумина в плазме, а также резкое снижение содержания липидов во всем организме и значительное увеличение видимых аномалий печени. Проведено сравнение концентрации загрязняющих веществ в исследуемых образцах воды с показателями токсичности основных веществ, которые, как известно, индуцируют вителлогенин или ингибируют АФ головного мозга. Концентрации большинства загрязняющих веществ в исследуемых водах были на несколько порядков ниже установленного предельно допустимого уровня [48,49]. Исключением были эстрогенные гормоны, высокая концентрация которых в исследуемых сточных водах, как было установлено ранее, приводит к образованию вителлогенина. На основании анализа данных сделан вывод, что загрязняющие вещества, определенные в этом исследовании, не могли привести к ингибированию АФ головного мозга. Однако смеси СВ содержали большое количество и необнаруженных соединений, которые, вероятно, действуют вместе, представляя угрозу для молоди чавычи. Это исследование подчеркивает необходимость улучшения очистки сточных вод для сохранения здоровья водной среды и для смягчения воздействия на виды, находящиеся под угрозой исчезновения, такие как чавыча из Пьюджет-Саунда.

3.2. Стойкие органические загрязнители

Глобальное загрязнение окружающей среды, в особенности воздействие пер- и полифторированных веществ (ПФАВ) на рыб, вызывает все большую обеспокоенность среди научного сообщества [50,51]. Хорошо известно, что перфторированные алкилсульфаты (ПФАС) повсеместно распространены в окружающей среде, очень стабильны и, следовательно, способны к биоаккумуляции [52]. Исследованиями подтверждено их широкое распространение и неблагоприятное воздействие на здоровье человека, включая дислипидемию и иммунотоксичность [53]. Агентство по охране окружающей среды США регламентировало очень низкие (< 4 нг/л) уровни некоторых ПФАВ в питьевой воде [54]. В 2020 году Европейское агентство по безопасности продуктов питания установило еженедельный допустимый предел потребления критически важных ПФАС из пищевых продуктов, включая рыбу, в размере 4,4 нг/кг массы тела человека [55].

Стойкими органическими загрязнителями являются бромированные антипирены (БА) — большая группа химических соединений, применяемых в различных бытовых и коммерческих веществах для предотвращения распространения огня. Несмотря на мировой запрет на использование наиболее распространенных бромированных антипиренов (БА), разработка и внедрение новых соединений продолжаются, а информация об их воздействии на окружающую среду остается ограниченной. Проведено исследование по содержанию двух новых БА: 1,2-бис(2,4,6-трибромфенокси)этана (БАЭ) и 2-этилгексил-2,3,4,5-тетрабромбензоата (БАБ) в молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) [56]. Оба соединения были обнаружены в мышечной ткани рыб, что указывает на накопление и метаболизм этих соединений. Анализ транскрипции генов печени с использованием секвенирования РНК показал, что хроническое 28-дневное поступление БАБ с пищей у форели подавляло один единственный ген, связанный с эндокринно-опосредованными процессами, тогда как БАЭ влиял на транскрипцию 33 генов, включая гены, участвующие в иммунном ответе, в репродукции и в окислительном стрессе. Дополнительный анализ с использованием количественной ПЦР (qRT-PCR) после 48-часового и 28-дневного воздействия подтвердил влияние БАЭ на гены, связанные с иммунной системой, печенью и головными почками. Однако активность лизоцимов, измеренная на уровне белка, не отражала транскриптомные результаты. Полученные закономерности свидетельствовали о влиянии на транскрипцию иммунозависимых генов у рыб, подвергшихся воздействию БАЭ, а также о возможном окислительном стрессе и эндокринных нарушениях.

Проведены исследования содержания короткоцепочных хлорированных парафинов (КЦХП, C_{10}-C_{13}) и среднецепочных хлорированных парафинов (СЦХП, C_{14}-C_{17}) в 122 образцах выращенного

на фермах лосося (*Salmo salar*) и в 11 образцах дикого лосося (*Oncorhynchus gorbuscha u Oncorhynchus keta*), которые были приобретены в торговой сети в Баден-Вюртемберге (Южная Германия) в рамках официальной программы контроля пищевых продуктов [57]. Полученные данные свидетельствовали о значительном количестве КЦХП в образцах рыбы, а также о накоплении СЦХП. В связи с тем, что Стокгольмская конвенция регулирует использование только КЦХП [58], для оценки рисков необходимы токсикологические исследования как КЦХП, так и СЦХП. Учитывая отсутствие данных о канцерогенности КЦХП и СЦХП, а также их доказанную способность к биоаккумуляции, требуется тщательная оценка рисков для человека. Определение максимально допустимых уровней этих веществ критически важно для обеспечения принципа превентивной защиты потребителей.

3.3. Нефтяные выбросы

Разлив нефти, связанный с разведкой и добычей нефти, представляет собой потенциальную угрозу морским организмам во всем мире. Было установлено, что водные биоресурсы на ранних стадиях развития, особенно эмбрионы и личинки, наиболее уязвимы к воздействию нефтяных загрязнений. Это связано с их обитанием в эпипелагиали — поверхностном слое воды, который подвержен наибольшему воздействию при разливах нефти [59]. После разлива нефти небольшая фракция нефти механически перемешивается в воде по всей толще под действием волн и течений, образуя водосодержащую фракцию (ВФ) нефти (т. е. физически диспергированную нефть) [60].

Для лососевых видов рыб установлено, что чувствительность эмбрионов к водорастворимой фракции нефти в пресной воде увеличивалась после их вылупления, оставаясь очень высокой до полного рассасывания желтка и перехода на активное питание. Показана максимальная токсичность сырой нефти для горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha)* и кижуча (*Oncorhynchus kisutch)* в период вылупления, в то время как предличинки оказались умеренно устойчивы, а эмбрионы — наиболее устойчивы. Различия в устойчивости объясняются наличием защитных оболочек у икры, но зависят от состава водорастворимой фракции нефти. Минимальные токсичные концентрации нефтеуглеводородов (НУ) в зависимости от химических свойств для разных видов животных составляют 0,0004–0,002 мг/л водорастворимой фракции нефти, что значительно ниже утвержденной в Российской Федерации предельно допустимой концентрации НУ в растворенном и эмульгированном состоянии для вод рыбохозяйственных водоемов [61].

Сырая нефть представляет собой сложную смесь углеводородных и неуглеводородных соединений, однако полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) считаются особенно токсичными компонентами [62,63]. Было показано, что воздействие ПАУ, полученного из сырой нефти, вызывает нарушение метаболических функций и способности плавать, а также морфологические дефекты, кардиотоксичность, замедление роста и повышенную смертность на ранних стадиях жизни морских рыб и беспозвоночных [64].

Воздействия сырой нефти на сердечную деятельность у рыб хорошо изучены на ранних стадиях жизни и включают брадикардию, аритмии, отеки перикарда, снижение ударного объема и снижение сердечной сократимости, которые оказывают влияние на воспроизводство [65,66]. Установлено, что бенз(α)пирен способен индуцировать аномальное развитие глаз у радужной форели. Опытным путем доказано, что за счет осязания рыба может обнаруживать сырую нефть и избегать ее путем изменения пути движения. С использованием электроольфактограммы выявлена реакция радужной форели на воду, загрязненную нефтеносными песками [67].

За последнее десятилетие резко возросло количество исследований, посвященных характеристике токсичности сырой нефти. В частности, основное внимание уделялось водорастворимым соединениям, присутствующим после разлива нефти, которые известны как водорастворимая фракция или водосодержащая фракция, так как рыба на ранней стадии жизни реагирует на растворенную фракцию [68], а не на капли нефти. Многочисленные исследования, проведенные на рыбах, показали, что полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) являются ключевым фактором токсического воздействия водорастворимой фракции нефти на эти организмы.

Согласно Регламенту Комиссии (ЕС) 2023/915 [69] от 25 апреля 2023 года о максимальных уровнях некоторых загрязняющих веществ в пищевых продуктах, для всей копченой рыбной продукции нормируется сумма ПАУ: бенз(α)пирен, бенз(α)антрацен, бензо(b) флуорантен и хризен, в то время как согласно действующим нормативным документам в Российской Федерации регламентируется только один из представителей ПАУ — бенз(α)пирен для копченой рыбной продукции.

3.4. Микропластик

Пластиковое загрязнение — глобальная проблема для Мирового океана. Около 300 миллионов тонн пластикового мусора плавает на поверхности, скапливается на дне и побережьях, от полюсов до экватора. Ожидается, что к 2050 году производство пластика удвоится или, возможно, даже увеличится в четыре раза. В некоторых местах численность пластика в морских экосистемах уже превышает численность зоопланктона, поэтому неудивительно, что внимание к микропластику (МП) в научных кругах и обществе расширяется [70,71]. Термин МП был впервые введен в 2004 году в контексте небольших пластиковых фрагментов. В настоящее время пластик с гранулометрическим составом 1–5 мм определяют как МП. Благодаря небольшому размеру МП попадает в водные системы разными путями, в том числе через дождь, ветер и сточные воды. Малый размер таких пластиков также представляет опасность для окружающей среды, поскольку частицы МП могут аккумулироваться водными организмами и в худшем случае могут привести к их голоданию [72].

Лабораторные эксперименты показали, что МП может поедаться различными морскими организмами, включая полихет, ракообразных, двустворчатых моллюсков и иглокожих. Благодаря своим гидрофобным свойствам микропластик также может адсорбировать некоторые классы органических загрязнителей, которые затем передаются в организмы и попадают в морские пищевые цепи [73]. Последствия действия микропластика сказываются на пищевой активности, на дыхательной функции, на репродуктивности, а также на модулировании ряда молекулярных и клеточных путей [72]. Многочисленные риски микропластика для водных ресурсов привели к тому, что эта проблема была включена в некоторые международные законы и проекты по защите морской среды, такие как Рамочная директива ЕС по морской стратегии [74] и программа Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) [75].

Получение глубоких знаний о наличии и характеристике микропластика в морских пищевых цепях стала приоритетом в исследованиях и фундаментальным шагом на пути к комплексной оценке экологических рисков.

С целью изучения содержания микропластика в организме рыб было проведено исследование с использованием трех методов анализа [76]. Ученые сравнили мышечную ткань и печень атлантического лосося, выращенного в условиях аквакультуры и выловленного в естественной среде, а также дикой горной форели. Инфракрасная микроспектроскопия с преобразованием Фурье (μFTIR)

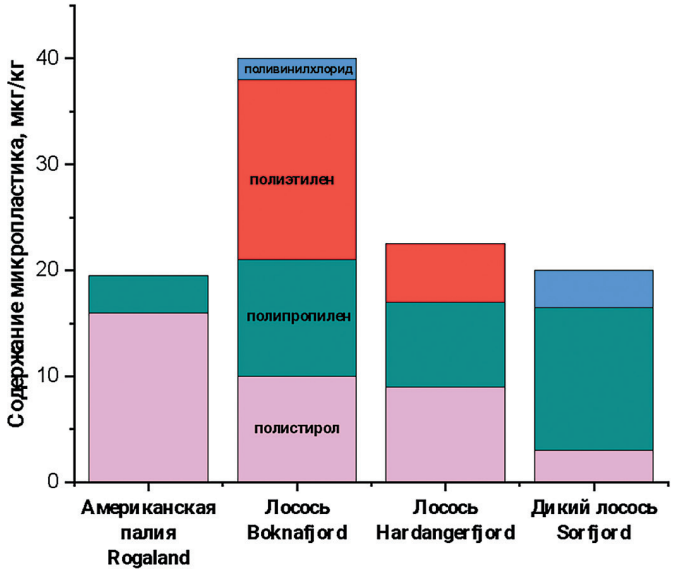


Рисунок 2. **Содержание МП в мышечной ткани лососевых видов рыб из различных регионов добычи (Норвегия) [76]**
Figure 2. **Content of microplastics in muscle tissue of salmonid fish species from different locations of collection (Norway) [76]**

и пиролитическая газовая хромато-масс-масс-спектрометрия (py-GCMS) были успешно применены не только для обнаружения, но и для количественного определения МП в тканях рыб. Масс-спектрометрия высокого разрешения позволила количественно определить фталаты и фосфорорганические антипирены в изучаемых объектах. Найдена хорошая количественная корреляция содержания пластика в исследуемых объектах с помощью μFTIR и py-GCMS. Кроме того, впервые изучено распределение МП по размеру в объектах аквакультуры и в диких лососевых рыбах.

МП в диапазоне размеров от 10 до > 200 мкм был обнаружен как в печени, так и в мышечной ткани у всех изученных объектов, при этом чаще всего встречался МП размером менее 50 мкм. При исследовании большое внимание уделялось исключению возможности внешнего загрязнения образцов микропластиком. Установлено, что статистической разницы в измеренных общих концентрациях МП в мышцах и печени не наблюдалось. С использованием μFTIR идентифицировано 26 видов полимеров, при этом каучук не был обнаружен ни в одном образце, а поликарбонат был найден только в одном образце мышечной ткани. Как видно из Рисунка 2, в мышечной ткани лососевых видов рыб содержатся в разных количествах следующие виды МП: полиэтилен, полипропилен, полистирол и поливинилхлорид.

Исследования выявили наличие разнообразных видов микропластика как в мышечной ткани и печени выращенного в норвежских фиордах лосося, так и у дикой рыбы. Для определения точного содержания микропластика в тканях лососевых рыб, влияния среды обитания на его накопление, а также рисков для здоровья рыб и человека, необходимы дальнейшие комплексные исследования [77].

4. Методы определения не регламентируемых загрязнителей

Масс-спектрометрия в сочетании с хроматографическими методами разделения играет ключевую роль в определении приоритетных загрязняющих веществ в пищевой рыбной продукции, в том числе не регламентированных. Целевой анализ проводят по утвержденным методикам, используя разные варианты хроматографического анализа и масс-спектрометрии. В квадрупольном масс-спектрометре (Q) в основном используется режим мониторинга выбранных ионов (SIM), при котором масс-анализатор настраивается на регистрацию только одного или нескольких ионов с заранее выбранным значением m/z [78,79]. Тандемный вариант масс-спектрометрического анализа (QqQ) проводится в режиме мониторинга множественных реакций (multiple reaction monitoring, MRM), выбираются и сканируются выбранные ионы-предшественники на первом квадруполе (Q), в то время третий квадруполь (Q) избирательно настроен на пропускание только специфических его фрагментов — ион-продуктов, которые образовались во время фрагментации во втором квадруполе (q). Данный режим характеризуется большой чувствительностью, селективностью, широким динамическим диапазоном и является наиболее распространенным в рутинном количественном анализе рыбы и рыбной продукции, а также широко используется для обнаружения многих загрязняющих веществ [80,81]. Однако из-за недостаточной скорости сканирования и низкой чувствительности в режиме полного сканирования QqQ-MS/MS не может удовлетворить требованиям к быстродействию и большому диапазону для высокопроизводительного нецелевого скрининга.

Для идентификации веществ, имеющих широкий спектр физико-химических характеристик (молекулярная масса, летучесть, гидрофобность и др.), используются разные варианты хроматографического разделения, ионизации, а также масс-спектрометрического детектирования, что затрудняет разработку единого подхода для их определения.

Согласно методологии, представленной в работе [82], для определения наличия 212 химических веществ из приоритетного списка в соответствии регламентом Европейского союза No 1907/2006 [83], регулирующим производство и оборот всех химических веществ, которые могут представлять опасность для здоровья человека при употреблении пищевых продуктов (в том числе в сельди, лосося, форели), аналиты были разделены на две группы согласно логарифмическому значению коэффициента распределения н-октанол-вода Kow. Химические вещества со значениями log K_{ow} > 0,4 извлекали методом экстракции QuEChERS (быстрым, простым, дешевым, эффективным, надежным и безопасным) и определяли методом ВЭЖХ или газовой хроматографией. Масс-селективное обнаружение и идентификацию осуществляли с использованием тройного квадрупольного масс-анализатора (QqQ). Для химических веществ со значениями log K_{ow} ⩽ 0,4 разделение достигалось с помощью жидкостной хроматографии с гидрофильным взаимодействием (HILIC) или обращенно-фазовой жидкостной хроматографией. Масс-селективное обнаружение и идентификация осуществлялись QqQ масс-анализатором с ионизацией электрораспылением (ESI+ или ESI-).

Сложный химический состав рыбных матриц требует применения высокоэффективных аналитических методов. Высокая разрешающая способность хроматографической системы в сочетании с непревзойденной точностью и специфичностью масс-спектрометрии высокого разрешения (МСВР) позволяет эффективно преодолевать сложности, связанные с влиянием разнообразных компонентов.

В руководящих документах к целевому анализу предъявляют определенные критерии надежности идентификации, связанные как с хроматографической, так и с масс-спектрометрической составляющей различных вариантов хромато-масс-спектрометрической системы [84]. Популярность нецелевого анализа среди ученых возрастает, однако возникает проблема оценки его эффективности. Определить долю обнаруженных и корректно идентифицированных соединений непросто, поскольку состав исследуемых образцов зачастую неизвестен [85]. Хромато-масс-спектрометр высокого разрешения во всем диапазоне масс в режиме полного сканирования позволяет с высокой точностью определять массы ионов (± 0,001 Да) и обладает высоким разрешением по массе (⩾ 20000), что обеспечивает превосходную специфичность и селективность [86].

МСВР в сочетании с хроматографией обладает большой гибкостью при сборе и анализе данных для целевого анализа известных загрязняющих веществ и позволяет провести более широкий отбор потенциально подозрительных соединений или полный нецелевой анализ, при котором не делается никаких предварительных предположений относительно того, какие именно токсичные компоненты в рыбной матрице могут присутствовать. Использование системы МСВР позволило обнаружить не регламентируемые загрязнители в рыбных объектах и провести более глубокое исследование взаимосвязи между окружающей средой и их безопасностью [87].

Кроме того, скрининг на приборе МСВР дает возможность проводить ретроспективный анализ данных на основе апостериорного анализа масс-спектра, полученного во время хроматографического анализа, что позволяет осуществлять глубокое нецелевое исследование загрязняющих веществ, включая гомологи соединений и их метаболитов.

Способность МСВР собирать огромные объемы данных для любого конкретного образца является ее сильной стороной, но также требует высокой квалификации оператора. Постоянное совершенствование методов обработки и оценки данных МСВР, особенно для нецелевого анализа, будет иметь решающее значение для полного использования преимуществ этого мощного аналитического метода.

Для проведения нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием используются квадруполь-времяпролетные масс-анализаторы высокого разрешения (Q-TOF) или орбитальная ионная ловушка (Q-Orbitrap) в тандемном исполнении. В Таблице 2 приведены примеры выявления не регламентируемых загрязнителей в лососевых видах рыб с использованием современной приборной базы.

В европейской практике широко распространена бальная система оценки надежности результатов. В 2021 году Европейская комиссия опубликовала исполнительный регламент EU2021/808 от 22 марта 2021 года о применении аналитических методов для определения остатков ветеринарных препаратов, используемых у сельскохозяйственных животных, об интерпретации результатов, а также о методах, которые будут использоваться для отбора проб [90].

Запрещенный препарат считается идентифицированным, если его время удерживания находится в приемлемых пределах (т. е. ± 0,5% для газовой хроматографии и ± 1% для жидкостной хроматографии и метод его детектирования для неразрешенных или запрещенных веществ оценен на 5 баллов). Чтобы соответствовать требованию, к идентификационным баллам можно добавлять баллы, полученные с помощью различных методов, например, один балл может быть результатом хроматографического разделения. В Таблице 3 перечислены баллы идентификации для масс-спектрометрического метода анализа.

Таблица 2. **Не регламентируемые загрязнители, идентифицированные в ходе целевого и нецелевого скрининга масс-спектрометрией высокого разрешения в лососевых видах рыб**

Table 2. **Non-regulated pollutants identified in the course of targeted and non-targeted screening by high-resolution mass spectrometry in salmonid fish species**

Идентифицируемые ненормируемые загрязнители	Объект анализа	Пробоподготовка* Метод определения.	Ссылка
Броминдол, дибромanизол, трибромanизол, хлороксиленон, пентахлорстирол, тетрахлордиметоксибензол, дихлорфенол, дихлорфенол сульфат, трихлорфенол	Лосось Форель	ВЭЖХ- (ESI+/-) МСВР ГХ-(El)-МСВР Экстракция по QuEChERS, QuPPe	[82]
Бис-(2этилгексил)фталат, фосфорорганические ароматические соединения, хлорированные н-алканы	Лосось Форель	ГХ-МСВР (Orbitrap) Экстракция органическими растворителями.	[76]
Хлорированные парафины различной структуры и их гомологи, бромированные антипирены, гексабромциклододекан	Лосось Горбуша Кета	ГХ-(ECNI)- МСВР (Orbitrap) Экстракция: ЖЖЭ дихлорметан/н-гексан Очистка: ТФЭ (кремнезем, импрегнированный, серной кислотой, Флорисил PR)	[57]
Парабены и метаболиты, 4-гидроксибензойная кислота	Лосось Кижуч Нерка Кумжа	ВЭЖХ-(HESI-)- МСВР (Orbitrap) Экстракция ацетонитрилом с 0,1–1% муравьиной кислотой, обезжиривание н-гексаном; центрифугирование, упаривание	[88]
Продукты термической трансформации малахитового зеленого и лейкомалахитового зеленого	Голец	УВЭЖХ-МС-ВП, (UHPLC -QTOF-ESI–MS) Экстракция по QuEChERS	[89]
Пестициды и индустриальные химикаты: этопрофос, прометон, N, N-диэтил-m-толуамид, кофеин, котинин, 5-метил-1H-бензотриазол, ацетанилид	Кижуч	УВЭЖХ–МС-ВП, (UHPLC-QTOF-ESI–MS) Экстракция: селективная жидкостная экстракция под давлением (SPLE) с метанолом и ацетонитрилом Очистка: ТФЭ (флоризил, алюминий и силикагель)	[42]

Примечание: QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe) — Быстро, Просто, Дешево, Эффективно, Надежно и Безопасно; QuPPe (Method Quick Polar Pesticides Method) — быстрый метод анализа полярных пестицидов); ECNI (Electron-Capture Negative Ion Mass Spectrometry) — масс-спектрометрия отрицательных ионов с захватом электрона. EI (Electron Ionization) — электронная ионизация, ESI (Electrospray Ionization) — ионизация электрораспылением), QTOF (quadrupole time-of-flight) — тандемное квадруполь-времяпролетное масс-спектрометрическое детектирование.

Таблица 3. **Идентификационные баллы для масс-спектрометрических методов анализа**

Table 3. **Identification scores for mass spectrometry methods of analysis**

Наименование метода	Идентификационные баллы
Разделение (хроматография, капиллярный электрофорез)	1
Ион МС низкого разрешения	1
Выбор иона-предшественника в диапазоне масс < ± 0,5 Да	1 (непрямое)
Ион-продукт $МС^n$ низкого разрешения	1,5
Ион МС высокого разрешения	1,5
Ион-продукт в $МС^n$ высокого разрешения	2,5

5. Оценка влияния среды обитания на водные биологические ресурсы

Поскольку антропогенные загрязнители повсеместно распространены в водной среде, важно всесторонне оценить их воздействие на обитающие организмы. Традиционное тестирование токсичности основано на наблюдаемых конечных точках в качестве индикаторов, включая смертность, развитие и размножение. Этим индикаторам часто не хватает чувствительности, необходимой для обнаружения изменений концентраций в окружающей среде. Для комплексной оценки влияния загрязнителей на водные ресурсы все большее внимание уделяется метаболомике, так как основное направление исследований посвящено изучению низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена, в жидкостях и тканях организма [91]. Метаболиты представляют собой наиболее точное отражение фенотипа организма, и систематическое их изучение (получение метаболического профиля) позволяет лучше понять биохимические процессы и подробно дифференцировать стадии соответствующих химических превращений. Метаболомика позволяет отслеживать возмущения на молекулярном уровне и оценивать токсический механизм действия при сублетальных концентрациях модельных загрязнителей.

С использованием метаболомики исследуются глобальные метаболические изменения в организме, связанные с химическими, биологическими, физиологическими или патологическими процессами, и выявляются индикаторы (метаболиты), отражающие состояние изучаемого объекта под действием различных факторов. Эти метаболические изменения измеряются с помощью различных аналитических платформ.

Наиболее часто используемые инструментальные методы в метаболомных анализах — ЯМР-спектроскопия на различных ядрах (^{1}H, ^{13}C, ^{31}P и пр.), а также масс-спектрометрия (МС) низкого и высокого разрешения, сопряженная с газовой и высокоэффективной жидкостной хроматографией [92,93]. Каждая аналитическая платформа предоставляет комплементарную информацию со своими преимуществами и недостатками.

ЯМР менее чувствителен, чем МС и, следовательно, обнаруживает относительно небольшое количество метаболитов. Однако ЯМР обладает многочисленными уникальными характеристиками, включая высокую воспроизводимость и неразрушающий характер, способность окончательно идентифицировать неизвестные метаболиты и получать абсолютные концентрации всех обнаруженных метаболитов, иногда даже без внутреннего стандарта. Эти характеристики нивелируют относительно низкую чувствительность и разрешение ЯМР в метаболомных приложениях. Поскольку биологические смеси очень сложны, растет потребность в новых методах, позволяющих улучшить предел обнаружения, надежно идентифицировать неизвестные метаболиты и обеспечить более точный количественный анализ. В этом отношении ЯМР широко применяется для исследований метаболических потоков и визуализации, идеально подходит для изучения живых клеток, тканей и органов. ЯМР стал предпочтительным способом измерения классов липопротеинов и холестерина в плазме.

Технологические и методологические достижения на сегодняшний день помогли улучшить разрешение и чувствительность метода ЯМР, а также обнаружение большего количества сигналов метаболитов. Усилия, направленные на измерение сигналов неизвестных метаболитов, привели к идентификации и количественному определению расширенного пула метаболитов, включая лабильные метаболиты, такие как клеточные окислительно-восстановительные коферменты, энергетические коферменты и антиоксиданты.

Хотя методы жидкостной хромато-масс-спектрометрии становятся все более популярными в области метаболомики (на сегодняшний день на их долю приходится более 70% опубликованных

метаболомных исследований), методы ЯМР в метаболомных исследованиях по-прежнему имеют значительные преимущества [94].

Для решения сложных экотоксикологических проблем в последнее время все больше используется метаболический подход к исследованию окружающей среды и объектов. Этот многообещающий подход имеет высокий потенциал для выяснения механизмов действия загрязнителей (при оценке опасности и разработке индикаторов при экологическом биомониторинге. Целевой метаболомный анализ был проведен при изучении молоди чавычи, которая в течение 10 дней содержалась в разбавленных сточных водах крупной городской очистной станции (20%, 5,3%, 1,4%, 0,4% и 0,1%) и в чистой воде (контроль) [48].С помощью жидкостной хромато-масс-спектрометрии в образцах печени рыб были обнаружены 185 эндогенных метаболитов. Метаболомное профилирование показало, что воздействие сточных вод изменило многочисленные эндогенные биохимические пути, важные для выработки и использования энергии, липидного обмена и биосинтеза, метаболизма аминокислот и окислительного стресса. Кроме того, анализ пути действия лекарств показал, что некоторые фармацевтические препараты являются потенциальными агентами, влияющими на метаболиты, такие как антибиотики, антидепрессанты, антигистаминные препараты, анальгетики и статины, даже при самых низких протестированных концентрациях в сточных водах (0,1% и 0,4%). Однако из-за отсутствия аналитических методов определения наиболее часто назначаемых лекарств в США только 25% из 300 было включено в целевой анализ химических веществ в сточных водах. Это подчеркивает необходимость дополнительного нецелевого анализа, чтобы более полно охарактеризовать химический состав сточных вод. Необходимы дополнительные исследования для дальнейшей оценки хронического воздействия загрязнителей в сточных водах на физиологические функции у рыб, такие как нарушение роста, иммунная дисфункция, нарушение воспроизводства и изменение поведения.

6. Заключение

Из аналитического обзора следует, что проблема воздействия фармацевтических и ветеринарных препаратов, компонентов средств личной гигиены, микропластика, пер- и полифторированных веществ, перфторированных алкилсульфатов, бромированных антипиренов, хлорированных н-алканов, нефти и целого ряда других соединений на лососевые виды рыб особенно актуальна в связи с особенностями их миграции и развития на начальном периоде существования в пресной речной воде, в которую и попадают указанные выше токсиканты.

Для определения НЗВ может быть рекомендована масс-спектрометрия высокого разрешения в сочетании с газовыми или жидкостными хроматографами, которая благодаря высокой точности измерения масс и непревзойденной специфичности способна преодолеть сложности, связанные с влиянием разнообразных компонентов, присутствующих в рыбной матрице. При проведении нецелевого и целевого скрининга с высокочувствительным полным сканированием целесообразно использовать масс-анализаторы высокого разрешения (TOF, Q-TOF, Q-Orbitrap), позволяющие определять целый ряд новых соединений.

Для комплексной оценки влияния загрязнителей и выявления индикаторов, отражающих влияние среды обитания на лососевые виды рыб, перспективным подходом является метаболический подход. Он основан на изучении низкомолекулярных органических соединений — метаболитов, как промежуточных, так и конечных продуктов обмена, в жидкостях и тканях организма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Câmara, J. S., Montesdeoca-Esponda, S., Freitas, J., Guedes-Alonso, R., Sosa-Ferrera, Z., Perestrelo, R. (2021). Emerging contaminants in seafront zones. Environmental impact and analytical approaches. *Separations*, 8(7), Article 95. https://doi.org/10.3390/separations8070095
2. Sultan, M. B., Anik, A. H., Rahman, M. M. (2024). Emerging contaminants and their potential impacts on estuarine ecosystems: Are we aware of it? *Marine Pollution Bulletin*, 199, Article 115982. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115982
3. Mofijur, M., Hasan, M. M., Ahmed, S. F., Djavanroodi, F., Fattah, I. M. R, Silitonga, A. S et al. (2024). Advances in identifying and managing emerging contaminants in aquatic ecosystems: Analytical approaches, toxicity assessment, transformation pathways, environmental fate, and remediation strategies. *Environmental Pollution*, 341, Article 122889. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122889
4. Martin, O., Scholze, M., Ermler, S., McPhie, J., Bopp, S. K., Kienzler, A. et al. (2021). Ten years of research on synergisms and antagonisms inchemical mixtures: A systematic review and quantitative reappraisal of mixture studies. *Environment International*, 146, Article 106206. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106206
5. Martins, I., Soares, J., Neuparth, T., Barreiro, A. F., Xavier, C., Antunes, C. et al. (2022). Prioritizing the effects of emerging contaminants on estuarine production under global warming scenarios. *Toxics*, 10(2), Article 46. https://doi.org/10.3390/toxics10020046
6. Lagunas-Rangel, F. A., Linnea-Niemi, J. V., Kudłak, B., Williams, M. J., Jönsson, J., Schiöth, H. B. (2022). Role of the synergistic interactions of environmental pollutants in the development of cancer. *GeoHealth*, 6(4), Article e2021GH000552. https://doi.org/10.1016/10.1029/2021GH000552
7. National Institutes of Health (NIH). Open chemistry database PubChem. Retrieved from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov. Accessed July 2, 2024.
8. Журкович, И. К., Мильман, Б. Л. (2023). Химическое пространство опасных веществ. *Химическая безопасность*, 7(2), 23–34. [Zhurkovich, I. K., Milman, B. L. (2023). A chemical space of dangerous substances. *Chemical Safety Science*, 7(2), 23–34. (In Russian)] https://doi.org/10.25514/CHS.2023.2.25002
9. Khan, N. A., López-Maldonado E. A., Majumder A., Singh S., Varshney, R., López J.R et al. (2023). A state-of-art-review on emerging contaminants: Environmental chemistry, health effect, and modern treatment methods. *Chemosphere,* 344, Article 140264. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140264
10. Yu, Y., Wang, S., Yu, P., Wang, D., Hu, B., Zheng, P. et al. (2024). A bibliometric analysis of emerging contaminants (ECs) (2001–2021): Evolution of hotspots and research trends. *Science of the Total Environment,* 907, Article 168116. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168116
11. Veiga-Del-Baño, J. M., Cámara, M. Á., Oliva. J., Hernández-Cegarra A. T., Andreo-Martínez, P., Motas M. (2023). Mapping of emerging contaminants in coastal waters research: A bibliometric analysis of research output during 1986–2022. *Marine Pollution Bulletin*, 194(PtA), Article 115366. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115366
12. Puri, M., Gandhi, K., Kumar, M. S. (2023). Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*, 332, Article 117344. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117344
13. Feng, W., Deng, Y., Yang, F., Miao, Q., Ngien, S. K. (2023). Systematic review of contaminants of emerging concern (CECs): Distribution, risks, and implications for water quality and health. *Water*, 15(22), Article 3922. https://doi.org/10.3390/w15223922
14. Канзепарова, А. Н., Ваизова, И. А., Никифоров, А. И., Беляев, В. А. (2024). Итоги лососевой путины в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне в 2023 г. *Бюллетень № 18 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке,* 18, 3–18. [Kanzeparova, A. N., Vaizova, I. A., Nikiforov, A. I., Belyaev, V. A. (2024). Results of salmon fishery in the Far-Eastern fishery basin in 2023. *Bull. No. 18 Study of Pacific Salmon in the Far East*, 18, 3–18. (In Russian)] https://doi.org/10.26428/losos_bull18-2024-3-18
15. ВНИИРО (2024). Делегация России приняла участие в работе международной организации по сохранению анадромных рыб. Электронный ресурс: http://vniro.ru/ru/novosti/arkhiv-za-2024-god/delegatsiya-rossii-prinyala-uchastie-v-rabote-mezhdunarodnoj-organizatsii-po-sokhraneniyu-anadromnykh-ryb Дата доступа 04.07.2024 [VNIRO (2024). Russian delegation took part in the work of the international organization for conservation of anadromous fish. Accessed July 4, 2024 (In Russian)]
16. Yu, Y., Wang, Z., Yao, B., Zhou, Y. (2024). Occurrence, bioaccumulation, fate, and risk assessment of emerging pollutants in aquatic environments: A review. *Science of the Total Environment*, 923, Article 171388. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171388
17. Falandysz, J., Liu, G., Rutkowska, M. (2024). Analytical progress on emerging pollutants in the environment: An overview of the topics. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 175, Article 117719. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117719
18. Lisco, G., Giagulli, V. A., Iovino, M., Guastamacchia, E., Pergola, G., Triggiani, V. (2022). Endocrine-disrupting chemicals: Introduction to the theme. *Endocrine, Metabolic and Immune Disorders — Drug Targets*, 22(7), 677–685. https://doi.org/10.2174/1871530321666210413124425
19. Subaramaniyam, U., Allimuthu, R. S., Vappu, S., Ramalingam, D., Balan, R., Paital, B., et al. (2023). Effects of microplastics, pesticides and nano-materials on fish health, oxidative stress and antioxidant defense mechanism. *Frontiers in Physiology*, 14, Article 1217666. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1217666
20. Jyoti, D., Sinha, R. (2023). Physiological impact of personal care product constituents on non-target aquatic organisms. *Science of the Total Environment,* 905, Article 167229. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167229
21. Chakraborty, A., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Dutta, S., Chatterjee, S., Banerjee, D. et al. (2023). Pharmaceuticals and personal care products as emerging environmental contaminants: Prevalence, toxicity, and remedial approaches. *ACS Chemical Health and Safety,* 30(6), 362–388. https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00071
22. Wydro, U., Wołejko, E., Luarasi, L., Puto, K., Tarasevičienė, Ž., Jabłońska-Trypuć, A. (2024). A review on pharmaceuticals and personal care products residues in the aquatic environment and possibilities for their remediation. *Sustainability*, 16(1), Article 169. https://doi.org/10.3390/su16010169
23. Hawash, H. B., Moneer, A. A., Galhoum, A. A., Elgarahy, A. M., Mohamed, W. A. A., Samy, M. et al. (2023) Occurrence and spatial distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment, their characteristics, and adopted legislations. *Journal of Water Process Engineering*, 52, Article 103490. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103490
24. Cunha, S. C, Menezes-Sousa, D, Mello, F. V., Miranda, J. A. T., Fogaca, F. H. S., Alonso, M. B. et al. (2022). Survey on endocrine-disrupting chemicals in seafood: Occurrence and distribution. *Environmental Research*, 210, Article 112886. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112886

25. Rohani, M. F. (2023). Pesticides toxicity in fish: Histopathological and hematobiochemical aspects — a review. *Emerging Contaminants*. 9(3), Article 100234. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100234
26. Ceger, P., Allen D., Blankinship, A., Choksi, N., Daniel, A., Eckel, W. B. et al. (2023). Evaluation of the fish acute toxicity test for pesticide registration, *Regulatory Toxicology and Pharmacology,* 139, Article 105340. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105340
27. Huang, T., Zhao, Y., He, J., Cheng, H., Martyniuk, C. J., (2022). Endocrine disruption by azole fungicides in fish: A review of the evidence. *Science of the Total Environment*, 822, Article 153412. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153412
28. Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, Article 116420. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420
29. Diamond, M. L., Sigmund, G., Bertram, M. G., Ford, A. T, Ågerstrand, M., Carlini, G. et al. (2024). Exploring outputs of the intergovernmental science-policy panel on chemicals, waste, and pollution prevention**.** *Environmental Science and Technology Letters*,11(7), 664–672. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00294
30. IARC. (2022). Gentian violet, leucogentian violet, malachite green, leucomalachite green, and CI Direct Blue 218. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans, 2022.
31. Liu, Y., Wu, N.-N., Xu, R., Li, Z.-H., Xu, X.-R., Liu, S. (2024**).** Phthalates released from microplastics can't be ignored: Sources, fate, ecological risks, and human exposure risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 179, Article 117870. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117870
32. Baldwin, W. S., Bain, L. J., Di Giulio, R., Kullman, S., Rice, C. D., Ringwood, A. H. et al. (2020). 20th Pollutant Responses in Marine Organisms (PRIMO 20): Global issues and fundamental mechanisms caused by pollutant stress in marine and freshwater organisms. *Aquatic Toxicology*, 227, Article 105620. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105620
33. Yang, W., Bu, Q., Shi, Q., Zhao, R., Huang, H., Yang, L. et al. (2024). Emerging contaminants in the effluent of wastewater should be regulated: Which and to what extent? *Toxics*, 12(5), Article 309. https://doi.org/10.3390/toxics12050309
34. Wu, M., Miao, J., Zhang, W., Wang, Q., Sun, C., Wang, L. et al. (2024). Occurrence, distribution, and health risk assessment of pyrethroid and neonicotinoid insecticides in aquatic products of China. *Science of the Total Environment*, 919, Article 170880. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170880
35. Jesus, A., Sousa, E., Cruz, M., Cidade, H., Lobo, J., Almeida, I. (2022). UV filters: Challenges and prospects. *Pharmaceuticals,* 15(3), Article 263. https://doi.org/10.3390/ph15030263
36. Santonocito, M., Salerno, B., Trombini, C., Tonini, F., Pintado-Herrera, M. G., Martínez-Rodríguez, G. et al. (2020). Stress under the sun: Effects of exposure to low concentrations of UV-filter 4-methylbenzylidene camphor (4-MBC) in a marine bivalve filter feeder, the Manila clam Ruditapes philippinarum. *Aquatic Toxicology*, 221, Article 105418. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105418
37. Wang, F., Xiang, L., Sze-Yin Leung, K., Elsner, M., Zhang, Y., Guo, Y. et al. (2024). Emerging contaminants: a One Health perspective. *The Innovation*, 5(4), Article 100612. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100612
38. Tierney, K. B., Pyle, G. G. (2024). Is salmonid migration at risk from chemical information disruption? *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 378–387. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.05.009
39. Mohanty, B., Mohanty, S., Mitra, T., Mahanty, A., Ganguly, S., Singh, S. (2019). Omics Technology in Fisheries and Aquaculture. Chapter in a book: Advances in Fish Research. Vol.-VII. Narendra Publishing House, Delhi, India. 2019.
40. Ulucan-Altuntas, K., Manav-Demir, N., Ilhan, F., Gelgor, H. B., Huddersman, K., Tiwary, A. et al. (2023). Emerging pollutants removal in full-scale biological treatment plants: a case study. *Journal of Water Process Engineering,* 51, Article 103336. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103336
41. Hopkins, Z. R., Blaney, L. (2016). An aggregate analysis of personal care products in the environment: Identifying the distribution of environmentally-relevant concentrations. *Environment International*, 92–93, 301–316. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.026
42. Du, B., Lofton, J. M., Peter, K. T., Gipe, A. D., James, C. A., McIntyre, J. K. et al. (2017). Development of suspect and non-target screening methods for detection of organic contaminants in highway runoff and fish tissue with high-resolution time-of-flight mass spectrometry. *Environmental Sciences: Processes and Impacts,* 19(9), 1185–1196. https://doi.org/10.1039/C7EM00243B
43. Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C. et al. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science,* 371(6525), 185–189. https://doi.org/10.1126/science.abd6951 Erratum in: *Science.* (2022), 375(6582), Article 5785. https://doi.org/10.1126/science.abo5785
44. Kazmi, S. S. U. H., Xu, Q., Tayyab, M., Pastorino, P., Barcelò, D., Yaseen, Z. M. et al. (2024). Navigating the environmental dynamics, toxicity to aquatic organisms and human associated risks of an emerging tire wear contaminant 6PPD quinone. *Environmental Pollution,* 356, Article 124313. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124313
45. Ihenetu, S. C., Xu, Q., Khan, Z. H., Kazmi, S. S. U. H., Ding, J. et al. (2024). Environmental fate of tire-rubber related pollutants 6PPD and 6PPD-Q: A review. *Environmental Research*, 258, Article 119492. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119492
46. French, B. F., Baldwin, D. H., Cameron, J., Prat, J., King, K., Davis, J. W. et al. (2022)**.** Urban roadway runoff is lethal to Juvenile Coho, Steelhead, and Chinook Salmonids, but not Congeneric Sockeye. *Environmental Science and Technology Letters*, 9(9), 733–738. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00467
47. Blair, S. I., Barlow, C. H., McIntyre, J. K. (2021). Acute cerebrovascular effects in juvenile coho salmon exposed to roadway runoff. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 78(2), 103–109. https://doi.org/10.1139/cjfas-2020-0240
48. Meador, J. P., Ball, S. C., Andrew, J. C., McIntyre, J. K. (2024). Exposure of juvenile Chinook salmon to effluent from a large urban wastewater treatment plant. Part 2. Metabolomic profiling. *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 367–377. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.06.008
49. Ball, S. C., Meador, J. P., Andrew, J. C., McIntyre, J. K. (2024). Exposure of juvenile Chinook salmon to effluent from a large urban wastewater treatment plant. Part 1. physiological responses. *Aquaculture and Fisheries*, 9(3), 355–356. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.06.006
50. Young, W., Wiggins, S., Limm, W., Fisher, C. M., DeJager, L., Genualdi S. (2022). Analysis of per- and poly(fluoroalkyl) substances (PFASs) in highly consumed seafood products from U.S. markets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(42), 13545–13553. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04673
51. Bedi, M., Sapozhnikova, Y., Taylor, R. B., Ng, C. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) measured in seafood from a cross-section of retail stores in the United States. *Journal of Hazardous Materials*, 459, Article 132062. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132062
52. Habib, Z., Song, M., Ikram, S., Zahra, Z. (2024). Overview of Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Their applications, sources, and potential impacts on human health. *Pollutants*, 4, 136–152. https://doi.org/10.3390/pollutants4010009
53. Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner C. C., Allen J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects**.** *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(2), 131–147. https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1
54. US EPA. (2024). Per- and poyfluoroalkyl substances (PFAS): Proposed PFAS national primary drinking water regulation. Retrieved from https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas Accessed June 4, 2024.
55. European Food Safety Authority. (2020). PFAS in food: EFSA assesses risks and sets tolerable intake. Retrieved from https://www.efsa.europa.eu/en/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake Accessed June 4, 2024.
56. Giraudo, M., Douville, M., Letcher, R. J., Houde, M. (2017). Effects of food-borne exposure of juvenile rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) to emerging brominated flame retardants 1,2-bis(2,4,6-tribromophenoxy)ethane and 2-ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoate. *Aquatic Toxicology*, 186, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.02.023
57. Kratschmer, K., Schachtele A., Malisch R., Vetter W. (2019). Chlorinated paraffins (CPs) in salmon sold in southern Germany: Concentrations, homologue patterns and relation to other persistent organic pollutants. *Chemosphere,* 227, 630–637. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.016
58. Conference of the Parties of the Stockholm Convention (COP.8) (2017). Decision SC-8/11 Listing Short-Chain Chlorinated Paraffins (SCCPs) in Annex A of the Convention. Geneva, 74 Retrieved from https://chm.pops.int/theconvention/conferenceoftheparties/meetings/cop8/tabid/5309/default.asp Accessed June 4, 2024.
59. McIntosh, S., King, T., Wu, D., Hodson, P.V. (2010). Toxicity of dispersed weathered crude oil to early life stages of Atlantic herring (Clupea harengus). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(5), 1160–1167. https://doi.org/10.1002/etc.134
60. Forth, H. P., Rissing, M., Travers, C. (2021). Use of correlated water sample chemistry and synthetic aperture radar footprints to estimate oil concentrations in the upper water column during the Deepwater Horizon oil spill. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(11), 3097–3103. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00196
61. Пряжевская, Т. С., Черкашин, С. А. (2007). Влияние нефтеуглеводородов на ранний онтогенез рыб. *Известия ТИНРО*, 149, 359–365. [Pryazhevskaya, T.S., Cherkashin, S.A. (2007). Influence of petroleum hydrocarbons on early ontogenesis of fishes. *Izvestiya TINRO,* 149, 359–365. (In Russian)]
62. Barron, M. G., Carls, M. G., Heintz, R., Rice, S. D. (2004**).** Evaluation of fish early life-stage toxicity models of chronic embryonic exposures to complex polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures. *Toxicological Sciences*, 78(1), 60–67. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfh051
63. Monteiro, V., Dias da Silva, D., Martins, M., Guedes de Pinho, P., Pinto, J. (2024). Metabolomics perspectives of the ecotoxicological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons: A scoping review. *Environmental Research*, 249, Article 118394. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118394
64. Takeshita, R., Bursian, S. J., Colegrove, K. M., Collier, T. K., Deak, K., Dean, K. M. et al. (2021). A review of the toxicology of oil in vertebrates: What we have learned following the Deepwater Horizon oil spill**.** *Journal of Toxicology and Environmental Health: Part B, Critical Reviews,* 24(8), 355–394. https://doi.org/10.1080/10937404.2021.1975182
65. Pasparakis, C., Esbaugh, A. J., Burggren, W., Grosell, M. (2019). Physiological impacts of Deepwater Horizon oil on fish**.** *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 224, Article 108558. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2019.06.002
66. Bender, M. L., Giebichenstein, J., Teisrud, R. N., Laurent, J., Frantzen, M., Meador, J. P. et al. (2021). Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage fish. *Scientific Reports*, 11(1), Article 8410. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87932-2
67. Grosell, M., Pasparakis, C. (2021). Physiological responses of fish to oil spills. *Annual Review of Marine Science*, 13,137–160. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040120-094802
68. Meador, J. P., Nahrgang, J. (2019). Characterizing crude oil toxicity to early-life stage fish based on a complex mixture: Are we making unsupported assumptions? *Environmental Science and Technology*, 53(19), 11080–11092. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02889
69. Commission Regulation (EU) 2023/915 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No 1881/2006. (2023). *Official Journal of the European*, 119, 103–157. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj Accessed June 3, 2024.
70. Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., Omar, S., Elgarahy, A. M., Farghali, M. et al. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2129–2169. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3
71. Kibria, G. (2023). Impacts of microplastic on fisheries and seafood security — Global analysis and synthesis. *Science of the Total Environment*, 904, Article 166652. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166652

72. Oza, J., Rabari, V., Yadav, V. K., Sahoo, D. K., Patel, A., Trivedi, J. (2024). A systematic review on microplastic contamination in fishes of Asia: Polymeric risk assessment and future prospectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(4), 671–685. https://doi.org/10.1002/etc.5821
73. Granby, K., Bhattarai, B., Johannsen, N., Kotterman, M. J. J., Sloth, J. J., Cederberg, T. L. et al. (2024). Microplastics in feed affect the toxicokinetics of persistent halogenated pollutants in Atlantic salmon. *Environmental Pollution*, 357, Article 124421. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124421
74. EUR-Lex (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0056 Accessed June 4, 2024.
75. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). Microplastics. Retrieved from https://marinedebris.noaa.gov/what-marine-debris/microplastics Accessed June 4, 2024.
76. Gomiero, A., Haave, M., Bjoróy, Ø., Herzke, D., Kögel, T., Nikiforov, V. et al. (2020). Quantification of microplastic in fillet and organs of farmed and wild salmonids- a comparison of methods for detection and quantification salmodetect. NORCE Report 8–2020 Retrieved from https://www.hi.no/resources/Salmodetect-report-final.pdf Accessed June 3, 2024.
77. Landrigan, P. J., Raps, H., Cropper, M., Bald, C., Brunner, M., Canonizado, E. M. et al. (2023). The Minderoo-Monaco commission on plastics and human health. *Annals of Global Health*, 89(1), Article 23. https://doi.org/10.5334/aogh.4056
78. O'Neill, S. M., Carey, A. J., Harding, L. B., West, J. E., Ylitalo, G. M., Chamberlin, J. W. (2020). Chemical tracers guide identification of the location and source of persistent organic pollutants in juvenile Chinook salmon (Oncorhynchus tshawytscha), migrating seaward through an estuary with multiple contaminant inputs. *Science of the Total Environment*, 712, Article 135516. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135516
79. Donets, M. M., Tsygankov, V. Yu., Gumovskiy, A. N., Gumovskaya, Y. P., Boyarova, M. D., Kulshova, V. I. et al. (2022). Fish as a risk source for human health: OCPs and PCBs in Pacific salmon. *Food Control*, 134, Article 108696. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108696
80. Cunha, S. C., Trabalón, L., Jacobs, S., Castro, M., Fernandez-Tejedor, M., Granby, K. et al. (2018). UV-filters and musk fragrances in seafood commercialized in Europe Union: Occurrence, risk and exposure assessment. *Environmental Research*, 161, 399–408. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.015
81. Carrizo, J. C., Griboff, J., Bonansea, R. I., Nimptsch, J., Valdés, M. E., Wunderlin, D. A. et al. (2021). Different antibiotic profiles in wild and farmed Chilean salmonids. Which is the main source for antibiotic in fish? *Science of the Total Environment,* 800, Article 149516. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149516
82. Undas, A. K., Escher, S., Hahn, S., Hajslova, J., Hrbek, V., Kosek, V. et al. (2024). Screening for emerging chemical risks in the food chain (SCREENER). *EFSA Journal*, 21(7), Article 8962E. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2024.EN-8962
83. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1907/2014-04-10. Accessed June 3, 2024.
84. Мильман, Б. Л, Журкович, И. К. (2020). Обобщенные критерии идентификации химических соединений методами хроматографии — масс-спектрометрии. *Аналитика и контроль*, 24(3), 164–173. [Milman, B. L., Zhurkovich, I. K. (2020). Summarized criteria of chemical compounds identification using the chromatography-mass spectrometry. *Analytics and Control,* 24(3), 164–173. (In Russian)] https://doi.org/15826/analitika.2020.24.3.003
85. Мильман, Б. Л., Журкович, И. К. (2022). Современная практика нецелевого химического анализа. *Журнал аналитической химии*, 77(5), 412–426. [Milman, B. L., Zhurkovich, I. K. (2022). Present-day practice of non-target chemical analysis. *Journal of Analytical Chemistry*, 77(5), 537–549. (In Russian)] https://doi.org/10.31857/S0044450222050085
86. Gómez-Regalado, M. del C., Martín-Pozo, L., Martín, J., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E. et al. (2022). An overview of analytical methods to determine pharmaceutical active compounds in aquatic organisms. *Molecules*, 27(21), Article 7569. https://doi.org/10.3390/molecules27217569
87. Turnipseed, S. B. (2024). Analysis of chemical contaminants in fish using high resolution mass spectrometry — A review. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 42, Article e00227. https://doi.org/10.1016/j.teac.2024.e00227
88. Chiesa, L. M., Pavlovic, R., Panseri, S., Arioli, F. (2018). Evaluation of parabens and their metabolites in fish and fish products: A comprehensive analytical approach using LC-HRMS. *Food Additives and Contaminants: Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 35(12), 2400–2413. https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1544721
89. Baesu, A., Audet, C., Bayen, S. (2021). Application of non-target analysis to study the thermal transformation of malachite and leucomalachite green in brook trout and shrimp. *Current Research in Food Science*, 4, 707–715. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.09.010
90. EUR-Lex (2021). Commission Implementing Regulation (EU) 2021/808 of 22 March 2021 on the performance of analytical methods for residues of pharmacologically active substances used in food-producing animals and on the interpretation of results as well as on the methods to be used for sampling and repealing Decisions 2002/657/EC and 98/179/EC (Text with EEA relevance). Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/808/oj Accessed June 3, 2024.
91. Cappello, T. (2020). NMR-Based metabolomics of aquatic organisms. *eMagRes*, 9(1), 81–100. https://doi.org/10.1002/9780470034590.emrstm1604
92. Lulijwa, R., Alfaro, A. C., Young, T. (2022). Metabolomics in salmonid aquaculture research: Applications and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), 547–577. https://doi.org/10.1111/raq.12612
93. Liu, L., Wu, Q., Miao, X., Fan, T., Meng, Z., Chen, X. et al. (2022). Study on toxicity effects of environmental pollutants based on metabolomics: A review. *Chemosphere*, 286(2), Article 131815. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131815
94. Wishart, D. S., Cheng, L. L., Copié, V., Edison, A. S., Eghbalnia, H. R., Hoch, J. C. et al. (2020). NMR and metabolomics — a roadmap for the future. *Metabolites*, 23, 12(8), Article 678. https://doi.org/10.3390/metabo12080678

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Абрамова Любовь Сергеевна — доктор технических наук, профессор, заместитель директора департамента по вопросам качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел. +7–915–064–77–04 E-mail: abramova@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8278-2760	**Liubov S. Abramova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department for the Quality of Fish Food Products, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7–915–064–77–04 E-mail: abramova@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8278-2760
Козин Андрей Валерьевич — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Отдел Качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел. +7–916–102–93–87 E-mail: kozin@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8507-3548 * автор для контактов	**Andrey V. Kozin**, Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Fish Food Quality Department, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7–916–102–93–87 E-mail: kozin@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8507-3548 * corresponding author
Гусева Елена Сергеевна — специалист, Отдел Качества пищевой рыбной продукции, Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии 105187, Москва, Окружной проезд, 19 Тел.: +7–917–505–92–06 E-mail: guseva@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1377-1838	**Elena S. Guseva**, Specialist, Fish Food Quality Department, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography 19, Okruzhnoy proezd, 105187, Moscow, Russia Tel.: +7–917–505–92–06 E-mail: guseva@vniro.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1377-1838
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402

Поступила 26.03.2024
Поступила после рецензирования 27.08.2024
Принята в печать 02.09.2024
© Мяленко Д. М., 2024

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

МИКРОПЛАСТИКИ: ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ, МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ (ПРЕДМЕТНЫЙ ОБЗОР)

Мяленко Д. М.

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
полимерные материалы, микропластик, идентификация, биоразлагаемая упаковка

АННОТАЦИЯ

Полимерные упаковочные материалы стали неотъемлемой частью нашей жизни — они используются в производстве предметов быта, в фармацевтике, в химической и в автомобильной отрасли. Производство и применение полимерной упаковки стремительно расширяются, охватывая различные сферы промышленности. По данным Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), мировое производство пластмасс достигло 348 миллионов тонн в 2017 году и, вероятно, достигнет 33 миллиардов тонн к 2050 году. При этом ежегодно на территории Европейского союза (ЕС) образуется около 26 миллионов тонн пластиковых отходов, из которых только 30% поступает на вторичную обработку. Несмотря на это, во многих странах мира, в том числе в России, более 50% полимерных материалов утилизируются на полигонах, где под воздействием внешних факторов окружающей среды (температура, влажность) происходит ее разрушение с образованием большого количества микро- и нанопластиков. Большинство людей не считают экологические проблемы, связанные с микропластиком, серьезными. Однако многие работы, направленные на глубокое изучение данной проблемы, доказали, что микро- и нанопластик оказывают значительное негативное воздействие на наземных и морских животных, а также на здоровье человека, будь то прямо или косвенно. Идентификация микропластиков в различных модельных средах и живых системах, как правило, основана на использовании инфракрасной спектроскопии и рамановской спектрофотометрии. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, связанные в основном с пробоподготовкой для повышения точности идентификации. Настоящий обзор посвящен проблеме образования и идентификации микропластиков в различных природных объектах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения НИР по государственному заданию (шифр № FNSS-2022–0005) «Развитие научных принципов глубокой переработки и обеспечения длительного хранения молочного сырья и продукции с применением малоотходных ресурсосберегающих технологий» Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности.

Received 26.03.2024
Accepted in revised 27.08.2024
Accepted for publication 02.09.2024
© Myalenko D. M., 2024

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

MICROPLASTICS: FEATURES OF APPEARANCE, IDENTIFICATION METHODS (SUBJECT REVIEW)

Dmitry M. Myalenko

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

KEY WORDS:
polymer materials, microplastics, identification, biodegradable packaging

ABSTRACT

Polymer packaging materials have become firmly embedded in our way of life. They are used in the manufacture of household items, as well as in the pharmaceutical, chemical, and automotive industries. Production and application of polymer packaging are expanding rapidly encompassing various spheres of the industry. According to Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), global plastics production reached 348 million tons in 2017 and is likely to reach 33 billion tons by 2050. At the same time, about 26 million tons of plastic waste are generated annually on the territory of the European Union (EU), of which only 30% is collected for recycling. Despite this, in many countries of the world, including Russia, more than 50% of polymer materials are disposed of at landfills, where under the influence of external environmental factors (temperature, humidity), their destruction occurs with the formation of huge quantities of micro- and nanoplastics. Most people do not consider the environmental problems associated with microplastics to be serious. However, many studies aimed at in-depth study of this problem have proved that micro- and nanoplastics have significant negative effects on terrestrial and marine animals, as well as on human health, whether directly or indirectly. The identification of microplastics in various model environments and living systems is usually based on the use of infrared spectroscopy and Raman spectrophotometry. Each of the methods has its advantages and disadvantages, mainly related to sample preparation to improve the accuracy of identification. This review is devoted to the problem of formation and identification of microplastics in various natural objects.

FUNDING: The article was prepared as part of research on the state task of Research and Development No. FNSS-2022–0005 “Development of scientific principles of deep processing and long-term storage of dairy raw materials and products using low-waste resource-saving technologies” of the All-Russian Dairy Research Institute.

1. Введение

Полимерные материалы находят применение не только в качестве упаковки, но и в производстве предметов быта, в фармацевтике, в химической и автомобильной промышленности. Темпы роста производства и использования полимеров неуклонно растут. Так, по данным Plastics Europe Market Research Group (PEMRG), если в 2017 году мировой объем производства пластмасс достигал 348 миллионов тонн, то к 2050 году он может превысить 33 миллиарда тонн.

Ежегодно в Европейском союзе (ЕС) образуется порядка 26 миллионов тонн пластиковых отходов, и лишь 30% из них подвергаются вторичной переработке [1]. Это обостряет глобальную проблему переработки и утилизации значительных объемов полимерных отходов [2,3], образующихся после окончания жизненного цикла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Мяленко Д. М.** (2024). Микропластики: особенности появления, методы идентификации (предметный обзор). *Пищевые системы*, 7(3), 394–402. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402

FOR CITATION: **Myalenko, D. M.** (2024). Microplastics: Features of appearance, identification methods (subject review). *Food Systems,* 7(3), 394–402. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-394-402

пищевой упаковки и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [4].

В поисках оптимальных решений экологической проблемы утилизации упаковки мировое научное сообщество выделяет три основных направления: совершенствование малоотходных технологий производства [2], использование биоразлагаемых материалов и композитов на их основе [3], а также модернизация систем сбора, сортировки и переработки отходов, включая применение отходов полимерного производства в качестве вторичного сырья [9,10].Однако, несмотря на это, во многих странах мира, в том числе в России, более 50% полимерных материалов утилизируются на полигонах, где под воздействием внешних факторов окружающей среды (температура, влажность) происходит разрушение полимерных материалов с образованием большого количества микро- и нанопластиков.

Прогресс не всегда бережен к природе и человеческому здоровью. Обилие поступающих загрязнителей в окружающую среду негативно влияет на жизнедеятельность растений, животных и людей. Грамотное обращение с отходами и экологическая осведомленность населения планеты позволит уменьшить давление на природу, однако не ликвидирует его. Частицы загрязнителей, такие как микропластики, имеют множественные источники происхождения, из-за чего их количество в природе накапливается и способствует глобальному распространению. Питьевая вода после прохождения очистительных систем также содержит небольшое количество микропластика. Современные исследования не способны составить полную картину распространения микропластика, однако даже по разрозненным данным понятно, что данная проблема требует немедленного реагирования. Контроль источников микропластика и очистка загрязненных территорий поспособствует решению проблемы загрязнения окружающей среды.

Во многих странах были введены законодательные меры по регулированию количества микропластика. Например, в США использование микропластика в косметической продукции с 2017 года запрещено. Также государства ограничивают потребление одноразовых пластмасс, в основном соломинок и пластиковых пакетов [4]. Евросоюз применяет комбинированный подход к проблеме: просветительская деятельность, стимулирование сокращения производства пластиковой упаковки в пользу использования переработанных полимеров, а также законодательное регулирование обращения с отходами [11,12,13,14].

Развитие отрасли биоразлагаемых полимерных материалов способствует сокращению попадающего в окружающую среду пластика, однако на сегодняшний день доля таких материалов в общем объеме упаковки мала. Высокая стоимость таких полимеров значительно препятствует их повсеместному распространению, поэтому для полноценного перехода мирового производства на биоматериалы необходимы инвестиции и финансовая поддержка правительства.

Большинство людей не считают экологические проблемы, связанные с распространением микропластика, серьезными [15,16]. Однако многие работы, направленные на глубокое изучение данной проблемы, доказали, что микро- и нанопластик оказывают значительное негативное воздействие на наземных и морских животных, а также на здоровье человека, будь то прямо или косвенно [17].

Настоящий обзор посвящен проблеме образования и идентификации микропластиков в различных природных объектах.

Целью настоящего обзора являлось проведение анализа источников появления микропластика в различных объектах окружающей среды, а также рассмотрение методов его обнаружения и идентификации.

2. Материалы и методы

Объектами изучения являлись научные публикации и патентные исследования российских и зарубежных авторов в области создания и разработки современных биоразлагаемых материалов на основе синтетических и природных компонентов. В базах PubMed, Scopus, Mendeley и в открытых интернет-источниках был проведен поиск исследований, опубликованных в период с 2000 по 2024 годы, с использованием нескольких комбинаций ключевых слов, включая следующие: полимерные материалы, микропластик, идентификация, биоразлагаемая упаковка. Результаты анализа литературы для подготовки обзора в виде схемы PRIZMA представлены на Рисунке 1.

Статьи, написанные не на английском и русском языках, а также без полнотекстовой информации, были исключены. Из подобранных материалов также были исключены статьи, не относящиеся к теме настоящего обзора.

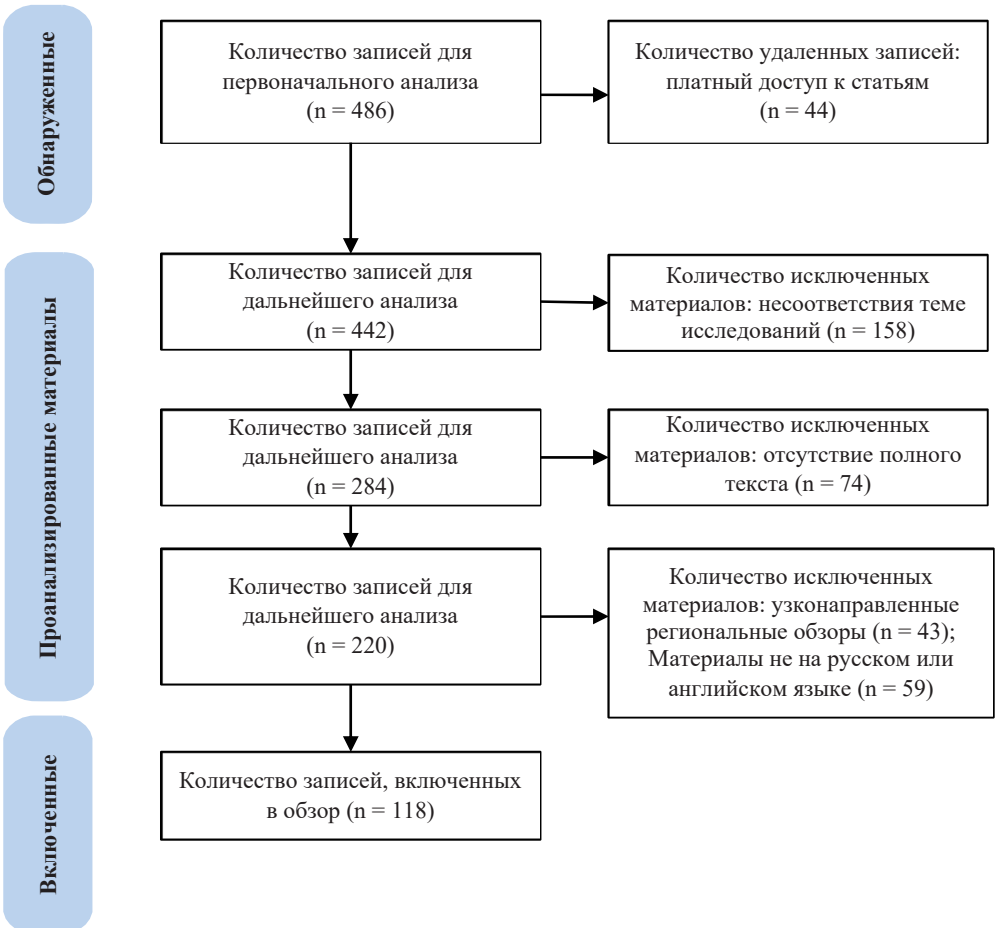


Рисунок 1. **Протокол призмы (анализ литературных источников для написания обзора)**
Figure 1. **PRISMA protocol (analysis of literature sources for writing a review)**

3. Микропластик: источники образования

Микропластиком принято считать частицы полимера размером менее 5 мм, которые остаются в окружающей среде в течение длительного времени. Вода является наиболее типичной средой для его транспортирования из одного места в другое, попадая в пищевую цепь, где он оказывает пагубное воздействие на флору и дикую природу, представляя серьезную угрозу для здоровья человека [17].

В процессе разрушения у полимерного материала постепенно наблюдается потеря массы, межмолекулярные связи теряют свою силу под действием внешних факторов, что приводит к фрагментации материала. Разобщенные полимерные частицы, в свою очередь, подвергаются микробной деградации [18]. Каждый этап разложения пластмассового мусора занимает длительное время, особенно микробная деградация мелких фрагментов [19,20].

Частицы пластика делят на 3 группы по их размеру: микропластик (< 5 мм), мезопластик (5–20 мм) и макропластик (> 20 мм). Такие фрагменты легко оседают в почве, по сточным водам попадают в реки и моря и даже присутствуют в воздушной среде [21].

Первые научные исследования появились еще в 1970-х [22]. Мировое научное сообщество стало проявлять интерес к проблеме микропластика, увеличилось количество исследований, посвященных его распространению в окружающей среде. Стали подниматься вопросы о влиянии микрочастиц на природные процессы, на здоровье людей и животных. Сегодня доступно большое количество работ по исследованию степени загрязнения городов, рек и почв, а также большое количество отчетов и материалов с конференций, рассматривающих степень влияния микропластика на флору и фауну планеты [18,20,22,23].

Микроскопические полимерные частицы попадают в окружающую среду двумя путями: в виде фрагментов уже готовой полимерной продукции, а также в форме специально созданных микрочастиц промышленного назначения. Большие города заполнены микропластиком из-за стирания автомобильных шин — например, в Нидерландах ежегодно в окружающую среду выбрасывается 17 000 тонн износа резиновых шин [24]. В Германии выбросы могут достигать 92 594 тонн в год. Расчетный глобальный средний показатель выбросов шин на душу населения составляет 0,81 кг в год [25]. Микропластик оседает в городской пыли, высвобождается из синтетических тканей, предметов домашнего обихода, строительных материалов, образуется при сжигании отходов и на свалках. Строительные материалы, 3D-печать и даже фильтрующее оборудование выделяют микропластик в окружающую среду [18,26]. Также сельскохозяйственная деятельность способствует проникновению полимерных частиц в почву через удобрения, орошение водой и др. [27]. Все вышеперечисленные источники загрязнения способствуют возникновению в природе вторичного микропластика [18,23,25,26].

Первичный микропластик изначально представляет собой гранулы полимеров, которые используются в различных производственных отраслях. Их применяют в качестве промышленных адгезивов и при производстве косметических средств [28]. Производители шампуней, гелей, лаков, дезодорантов, различных кремов и масок, зубных паст используют микропластик как добавку для придания необходимых свойств продукции. Добавление полимерных частиц позволяет регулировать вязкость продукта, создавать пенящийся эффект, повышать сроки годности. Микропластик используется в качестве абразивных частиц в некоторых скрабах, а также входит в состав ряда солнцезащитных фильтров и других продуктов [28,29].

Масштабы распространения пластикового мусора и его фрагментов внушают значительные опасения. Внимание научного сообщества и различных экологических организаций в большей степени направлено на изучение загрязнения мирового океана.

4. Микропластик в водной среде

Микроскопические полимерные фрагменты попадают в водную среду различными путями. Загрязнение прибрежных территорий, речные и атмосферные переносы частиц, морской промысел (краска с кораблей, фрагменты рыболовных снастей и др.) — все это источники микропластика в океанических водах [30]. За последние 10 лет было проведено большое количество исследований, направленных направленных на изучение роли рек в распространении загрязнений в водных объектах. Самый масштабный выброс пластика (86% от мирового объема) осуществляется азиатскими реками, их ежегодный вклад составляет диапазон 1,00–2,06 млн тонн. Высокая плотность населения, большое количество полимерных отходов и сильные осадки обуславливают лидирующее положение Азии по объемам загрязнения Мирового океана. Самым крупнейшим водосборным бассейном является китайская река Янцзы. Речной поток транспортирует в Восточно-Китайское море от 0,31 до 0,48 млн тонн в год, обгоняя реку Ганг (0,10–0,17 млн тонн в год). Индонезия является одним из основных источников загрязнения на азиатском континенте. Со стоком рек Брантас, Прого, Сераю и Соло в океан попадает около 0,2 млн тонн микропластика, что составляет 14,2% от общемирового объема. На остальные регионы мира приходится еще 14% общемирового объема микропластика, попадающего в океан. Из них 7,8% приходится на Африку, 4,8% — на Южную Америку, 0,95% — на Центральную и Северную Америку, 0,28% — на Европу и 0,2% — на Австралийско-Тихоокеанский регион [31].

Таким образом, по оценкам ученых, речные системы вносят в Мировой океан от 0,8 до 2,7 млн тонн пластика в год [32]. Под воздействием ультрафиолета и морской среды пластик начинает разрушаться, фрагментируясь на микрочастицы, что приводит к увеличению концентрации микропластика в воде. Исследование восточной части Тихого океана показало, что концентрация микропластика в международных водах значительно выше, чем в юго-восточных и северо-западных районах. Анализ проб воды выявил наивысшее содержание частиц размером 150–500 мкм (71% от общего количества обнаруженных частиц) [33].

На Рисунке 2 визуально представлен микропластик, обнаруженный в Баренцевом море в 2019 году.

Такое количество микроскопических частиц пластиков не может не влиять на нормальное функционирование природных систем и процессов. Известно, что почти 700 морских видов и более 50 пресноводных видов проглотили макропластик или запутались в нем [35]. В организмах 220 различных видов морских обитателей от беспозвоночных до рыб был обнаружен микропластик, так как животные заглатывают частицы по случайности либо путая их с пищей. Из всех выявленных видов 55% относятся к промысловым, например: мидии, анчоусы, атлантическая треска, карп, коричневая креветка, норвежский омар, атлантическая сельдь, сардины и др. [28,32,35]. В 2018 году было проведено исследование на содержание микропластика в мидиях, продаваемых в английских супермаркетах. Полимерные фрагменты были обнаружены во всей продукции, причем в полуприготовленных мидиях их содержание значительно превышало количество частиц в свежем продукте [36]. Заглатывание микроскопических частиц чревато блокировкой пищевых путей, что, в свою очередь, вызывает истощение. Поглощение микропалстика способ-

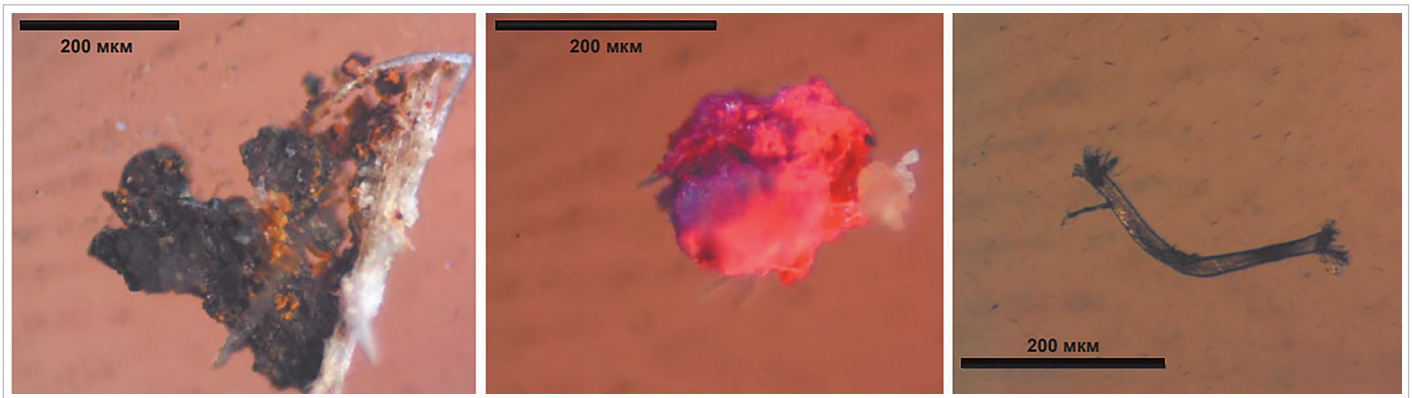


Рисунок 2. **Полимерные фрагменты в пробах из Баренцева моря, 2019 г. [34]**
Figure 2. **Polymer fragments in the samples from Barents Sea, 2019 [34]**

ствует нарушению работы пищеварительного тракта, дыхательных органов, снижению плодовитости и является фактором смертности [37]. Микропластик может негативно влиять на морские организмы как механически, так и токсически из-за переносимых загрязнителей [42,43,44]. Полимерные гранулы обладают высокой сорбционной способностью [41], что приводит к поглощению различных веществ из морской среды, включая полихлорированные бифенилы (ПХБ) [42]. Накопление этих веществ в организме человека может вредить органам (печени, почкам, коже, нервной системе), накапливаться в жировых тканях, иметь канцерогенное влияние и значительно подавлять иммунитет [43]. Некоторые загрязнители изначально находятся в полимерной матрице. Красящие вещества, матирующие агенты, бисфенол А (для создания поликарбонатов и эпоксидных смол), антимикробные агенты, УФ-стабилизаторы и другие добавки, использующиеся в промышленности для придания материалу необходимых качеств, остаются связанными с полимерными гранулами даже в процессе биоразложения [44]. Таким образом, загрязнитель остается в структуре полимера, переносится вместе с частицами на значительные расстояния, попадая во все экосистемы и оказывая токсическое воздействие на биоту и природные среды.

Даже теоретические количественные оценки концентраций микропластика в окружающей среде вызывают необходимость исследования всех потенциальных зон его распространения. По данным исследований, на суше содержание частиц пластика может быть в 4–23 раза больше, чем в океане [45]. Согласно оценкам 2016 года, жители Европы произвели объем микропластика, соответствующий 43–63 тыс. тонн в год, поступившего через ил в сельскохозяйственные агрокомплексы [46]. Жизнедеятельность человека способствует вариативности распространения микропластика. Неправильное обращение с отходами в городах, свалки, очистительные сооружения, осаждение частиц пластика из воздуха — все это непосредственные причины загрязнения. Примерно 32% пластиковых отходов изначально попадают в почву или континентальные водные экосистемы [11]. Исследование, рассматривающее производство, использование и управление отходами пластиковых материалов, показало, что было произведено приблизительно 6300 млн тонн пластиковых отходов, из которых порядка 4977 млн тонн скопилось на свалках и в природной среде [47].

5. Микропластик в почве

При попадании в почву фрагменты полимерного загрязнителя подвергаются физико-химическому воздействию почвенного слоя и всех его живых организмов [48]. Большинство используемых полимерных соединений и добавок к ним обладают эстрогенной активностью и могут вызывать эндокринные нарушения у позвоночных и некоторых беспозвоночных [49]. Распад микропластика на еще более мелкие частицы увеличивает отношение поверхности к объему в геометрической прогрессии. Такой процесс окажет значительное воздействие на здоровье биотических элементов почвенной среды. Микроскопические частицы пластика также взаимодействуют с биологическими мембранами, органеллами и молекулами, что вызывает эффекты воздействия токсичного химического вещества: повреждение клеток из-за окислительных процессов, воспаления и т. д. [54,55,56,57]. Исследования показывают, что микрофрагменты полимерного мусора влияют на биоразнообразие почвенных микроорганизмов [48], способны проникать в кровь, а также плаценту человека [43] и вызывают поведенческие изменения при попадании в мозг у рыб [54].

Количественная оценка переноса частиц по трофической цепи в почвенной среде показала, что их концентрация в почве (~0,9 частиц/г) значительно ниже, чем в дождевых червях (~14 частиц/г) или куриных фекалиях (~129 частиц/г) [55]. Это свидетельствует об активном поглощении микропластика организмами и о его свободном перемещении по пищевой цепи. Аккумулирование частиц затрагивает все виды планеты, включая как человека, так и организмы, поглощающие пищу нетривиальными способами, например, микропластик размером менее 0,5 мкм накапливается в дрожжах и нитчатых грибах [53,56]. Поскольку точных количественных исследований недостаточно, сложно предположить степень негативного влияния микропластика на здоровье и разнообразие живого и неживого мира планеты.

6. Микропластик в воздухе

Помимо оседания в почвенном слое, микропластик может перемещаться на значительные расстояния по воздуху [57]. За последние годы были проведены различные исследования, направленные на выявление микропластика в воздушном пространстве различных городов. Анализ синтетических волокон в атмосфере Парижа и прилегающих к нему городов показал, что из атмосферы осаждается от 29 до 280 частиц на квадратный метр в день [58]. Китайские ученые сообщили, что в городе Дунгуань скорость осаждения частиц в день варьируется от 175 до 313 частиц на квадратный метр [59]. Также было проведено исследование потенциальных источников и пространственного распределения атмосферных частиц в Шанхае. Объем синтетических фрагментов в пробах воздуха составлял 54% [60]. При анализе атмосферы Лондона было выявлено 15 различных видов полимеров, скорость осаждения которых составляет от 575 до 1008 частиц на квадратный метр в день [61]. В иранском городе Асалуйе анализ уличной пыли из 15 разных мест выявил наличие частиц от 2 мкм до 100 мкм с концентрацией 1 частица на квадратный сантиметр [62]. Оценка дорожной пыли центрального района Тегерана (Иран) выявила от 88 до 605 частиц микропластика в каждых 30 г. Размер частиц варьируется от 250 мкм до 500 мкм [63].

Важным аспектом исследования загрязнения атмосферы полимерными частицами является анализ воздуха в помещении, так как в современных реалиях люди большую часть времени находятся в зданиях: работа, дом и др. В британском исследовании 2018 года сообщается, что частицы, находящиеся в комнатных помещениях, оказывают большее воздействие на человека. Сравнивая количество микропластика, попадающего в человеческий организм из мидий и клетчатки, содержащей полимерные частицы из воздушной среды, авторы исследования пришли к заключению, что осаждение частиц из пыли в домашних условиях составляет 13731–68415 частиц в год на душу населения. [32,36,37,39]. Оценка воздействия микропластика на человека в помещении проводилась датскими учеными с помощью манекена, имитирующего дыхание человека. Полимерные частицы, 81% которых составлял полиэтилен, были обнаружены в каждом образце. Концентрация микропластика составила от 1,7 до 16,2 частиц на кубический метр [64]. Французские исследователи провели похожий эксперимент. В пробах из воздушного пространства частных квартир Парижа обнаружили концентрации полимерных частиц от 3 до 15 частиц на квадратный сантиметр [65]. Исследование пыли, собранной обычным пылесосом, также показало высокую концентрацию микропластика — от 190 до 670 волокон на миллиграмм [66]. Наличие микропластика в воздушной среде, как и во всех других средах, объясняется исключительно антропогенными факторами, однако содержание волокон в исследованиях городского воздуха и пыли значительно выше. Урбанистические районы страдают обилием синтетических тканей и предметами домашнего обихода, выделяющими волокнистые частицы микропластика. Однако исследования показывают, что перенос частиц в природе достигает повсеместного масштаба [57,58,61,65,66]. Исследование отдаленного горного водосборного бассейна во Франции показало наличие осажденных из воздуха частиц. Анализ проводился путем исследования сухого и влажного атмосферного осаждения. В течение пяти месяцев эксперимента в испытуемых образцах были выявлены волокна длиной до 750 мкм и частицы не более 300 мкм. По относительным суточным подсчетам в водосборном бассейне осаждается 249 гранулированных фрагментов и 44 волокна на один квадратный сантиметр [67].

7. Микропластик в питьевой воде

Высокие концентрации в помещениях могут быть объяснены наличием нескольких источников микропластика (предметы домашнего обихода и одежда из синтетических тканей) и различными механизмами, участвующими в их рассеивании, такими как скорость вентиляции, воздушный поток и климатические условия [57,68].

Загрязнение окружающей среды микропластиком представляет угрозу не только для экологии, но и для здоровья людей. На сегодняшний день с уверенностью можно сказать, что полимерные фрагменты поступают в организм человека несколькими путями: через дыхание, употребление зараженной продукции, питьевую воду и даже через непосредственный контакт пластиков с кожей. Наибольшее количество наночастиц пластика поступает в организм через продукты питания и воду [32,36,45,52,69].

Американскими учеными Ш. А. Мейсон, В. Г. Уэлч и Дж. Нератко протестировано 259 образцов бутилированный воды [70]. Образцы принадлежали одиннадцати разным брендам из девятнадцати разных мет в девяти странах. В 93% проб обнаружены признаки загрязнения микропластиком. Средняя концентрация микропластика в обработанной воде составила 10,4 частиц размером более 100 мкм на литр. Исследования морфологии загрязнения и ее природы показали 66% частиц и 34% волокон, половина которых являлась полимерами, 54% — полипропилен. Для исследования частиц менее

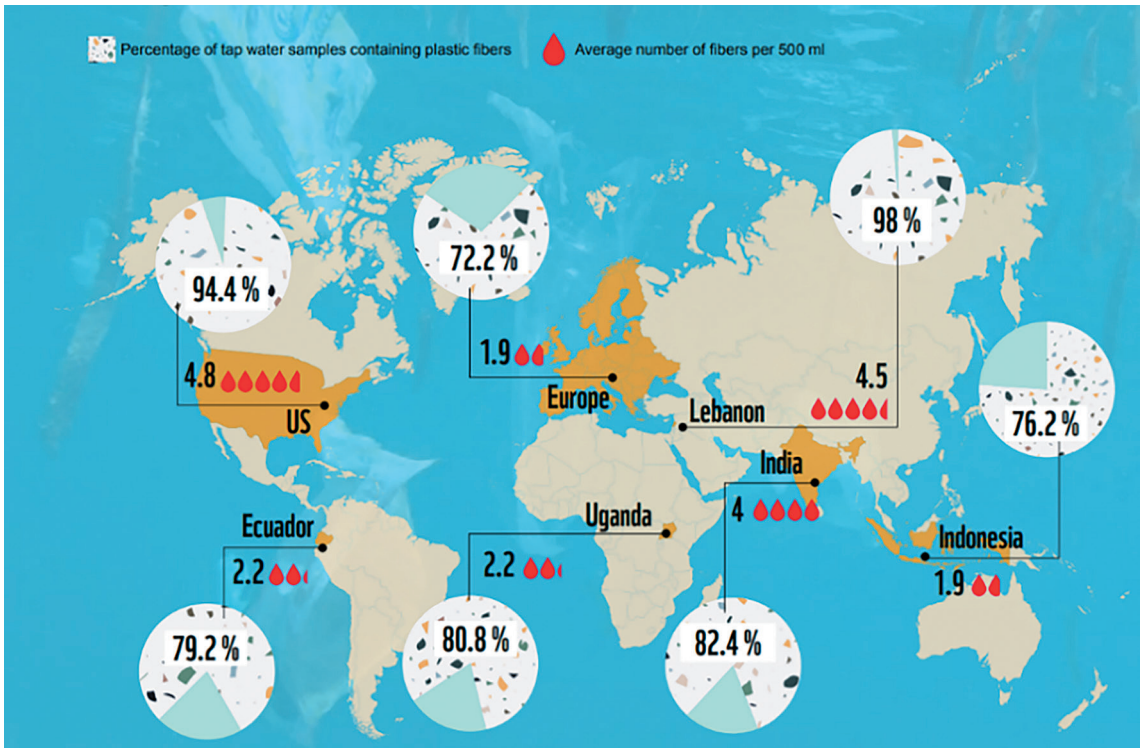


Рисунок 3. **Процентное содержание образцов в водопроводной воде по всему миру (круги) с учетом среднего количества волокон на 500 мл (красные капли) [72]**

Figure 3. **Percentage of samples in tap water worldwide (circles) with account for the average quantity of fibers per 500 ml (red drops) [72]**

100 мкм ученые использовали краситель Нильский красный. Адсорбция наночастицами красителя дает возможность предположить их принадлежность к пластикам. Если учитывать все обнаруженные частицы (6,5–100 мкм), ученые заявляют, что в среднем концентрация загрязнения составляет 325 частиц микропластика на литр при диапазоне от 0 до более 10 000 частиц на литр. Вероятнее всего, источником попадания микропластика в бутилированную воду является упаковка [70]. Анализ подземных вод Германии показал, что пробы, взятые на разных этапах поставок воды, демонстрируют наличие микропластика от 0 до 7 частиц в кубическом сантиметре [71]. Крайние значения соответствуют необработанной воде из источника и питьевой воде соответственно. Средняя концентрация микропластика составила 0,7 частиц на кубический сантиметр. Исследование показало наличие таких полимеров, как полиэтилен, полиамид, полиэстер, эпоксидная смола и поливинилхлорид. Размер частиц варьировался от 50 до 150 мкм. Вероятными источниками микропластика в пробах данного исследования является истирание пластикового оборудования, используемого для очистки воды, или его транспортировка из других источников [71].

На Рисунке 3 проиллюстрированы средние концентрации микропластика в водопроводной воде по всему миру. Аналитические данные всемирного фонда дикой природы демонстрируют, что в Ливане содержание микропластика в пробах водопроводной воды составляет около 98% с концентрацией в среднем 4,5 волокна на 500 мл. Ниже всего показатель на Европейском континенте — 72%, где на 500 мл приходится около 1,9 волокна.

8. Микропластик в организме человека

Полимерные фрагменты накапливаются и распространяются по трофическому пути, в итоге попадая в организм человека [73]. Однако микропластик находится не только в живых организмах, потребляемых в пищу [68,77,78,79]. Сахар, соль, мед и пиво, по данным исследований, также содержат полимерные фрагменты [80,81,82]. Дать количественную оценку загрязнения микропластиком пищевых продуктов невозможно, так как масштаб исследований еще недостаточно большой, но, учитывая данные исследований о содержании полимерных фрагментов в воде, почве и воздухе, можно предположить, что практически каждый продукт содержит в себе микрочастицы пластика.

Через кожный покров в организм человека поступает небольшое количество микропластика, так как полимерные частицы обладают гидрофобностью. Однако проникновение возможно через волосяные фолликулы, выходы потовых желез и травмированные участки кожи [80]. В 2004 году было проведено исследование фолликулярных отверстий свиньи после нанесения на кожу животного флуоресцентных частиц полистирола размером 20 и 200 нм. Результаты анализа показали, что проникновение частиц происходит, однако дальнейшего движения в глубокие ткани кожи не наблюдалось [81]. Аналогичное исследование подтвердило проникновение частиц полистирола диаметром 20–200 нм в поверхностные слои кожи примерно на 2–3 мкм [82]. Миграция полимерных фрагментов наиболее вероятна из косметических средств, в которых содержатся гранулы в качестве функциональных добавок. При тестировании скрабов для лица, в состав которых входят полиэтиленовые шарики диаметром около 0,2 мм, были обнаружены наночастицы в размерном диапазоне от 18 нм до 68 нм. Спектроскопический анализ доказал, что состав частиц соответствовал полиэтилену [83].

Проникновение полимерных частиц в организм из разных источников имеет отличие в большей степени в путях распространения. Наличие полимерных фрагментов в системе функционирования человека может иметь как нейтральные, так и негативные последствия. При вдыхании пластиковых фрагментов есть вероятность их попадания на альвеолярную поверхность легких. Тканевый барьер этой поверхности имеет толщину менее 1 мкм [84] и не затрудняет проход наночастиц в кровеносную систему, которая разносит загрязнитель по всему телу [85,86]. Исследование альвеолярных эпителиальных клеток показало, что нанопластиковые частицы поглощаются ими, причем скорость поглощения зависит от размера фрагментов. Исследования [87,88] показали, что наночастицы полистирола могут вступать в воспалительные реакции и влиять на функционирование эпителиальных клеток и физиологических процессов. Проглатывание микропластика чревато его скоплением в пищеварительном тракте, что приводит к появлению пластического безоара (инородное образование в пищеварительном тракте) [89]. Информация из различных источников демонстрирует накапливание микропластика в пищеварительном тракте рыб, вероятно, из-за плохого всасывания микропластика через пищеварительный тракт в ткани [93,94,95]. Также учеными было предположено, что острое пероральное воздействие положительно заряженных наночастиц полистирола может нарушить транспорт железа в кишечнике и его поглощение клетками [93].

По данным отчета Всемирной организации здравоохранения [94], проведенные исследования абсорбции показывают, что микропластики > 150 мкм, скорее всего, выводятся из организма. Ожидается, что поглощение более мелких частиц будет ограниченным, хотя поглощение и распределение очень мелких микропластичных частиц,

включая наночастицы, могут быть выше. Токсикологические исследования на крысах и мышах показали некоторые последствия, включая воспаление печени. Однако в плане надежности и актуальности эти исследования вызывают сомнения, поскольку они сообщают о результатах при очень высоких концентрациях, которые не характерны для питьевой воды. Для оценки рисков для здоровья, связанных с химическими веществами в микропластике, был проведен анализ пределов воздействия (отношение уровня отсутствия наблюдаемых побочных эффектов к теоретической, прогнозируемой или предполагаемой дозе или концентрации, поступающей в организм человека [95]). Он проводился для химических веществ, обнаруженных в микропластике, представляющих токсикологическую опасность и имеющих адекватные или приемлемые токсикологические характеристики.

Однако сегодня можно с уверенностью сказать, что в каждом человеке присутствует хотя бы одна частица микропластика [96]. Проанализированные образцы демонстрируют наличие пластика как со стороны плода, на материнской стороне и на хориоамниотических мембранах (внешние мембраны плода). Размер выявленных частиц составил около 10 мкм, что соответствует размерам частиц, переносимых кровотоком.

9. Методы обнаружения и идентификации микропластика

Исследования загрязнения окружающего мира поставили вопрос о детальном анализе микропластика, сфер его распространения и влияния на живые организмы. Обнаружение наночастиц является непростой задачей из-за их малого размера и принадлежности химической природы к органическим веществам [97].

Сегодня используется пять методов: окрашивание частиц (как правило, Нильским красным) с последующим анализом флуоресцентной микроскопией; растровая электронная микроскопия с рентгеновским энергодисперсионным спектральным анализом (РЭМ-ЭДА); инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) с преобразованием Фурье (FT-IR); рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния, КР-спектроскопия); пиролиз с последующей газовой хроматографией и масс-спектрометрией (ГХ/МС) [98–104].

Метод окрашивания не позволяет получить количественные данные о типах полимеров. Также отсутствует определение химического состава частиц, однако метод является самым быстрым, простым и дешевым способом анализа. Он дает возможность получить морфологическую информацию и определить количество частиц. При этом данный способ анализа может дать ложноположительные результаты. РЭМ-ЭДА позволяет проводить анализ вплоть до нанометровых частиц и разделять органические и неорганические материалы, а также проводить элементный анализ. Недостатками этого метода являются дополнительная пробоподготовка, отсутствие определения химического состава и высокая стоимость.

Инфракрасная и рамановская спектроскопии дают более детальную картину. Использование ИК- дает морфологическую информацию, возможность определения состава и выявления количества частиц, типов полимеров. Надежность и простота использования в сочетании с разумной стоимостью делает FT-IR-спектроскопию достаточно распространенным методом определения пластика. Неразрушающий анализ успешно применяется для обнаружения микропластика в пробах воды и отложениях [105,106,107,108]. Определяемое химическое вещество поглощает инфракрасный свет, что дает набор диапазонов, так называемый спектр или «молекулярный отпечаток». По таким характеристикам, как поглощение и его интенсивность, определяют группы атомов и их концентрации [106]. Сочетание FT-IR-спектроскопии и микроскопии отлично подходит для определения частиц непосредственно на мембране фильтра и не требует длительной пробоподготовки [107]. Анализ микро-FT-IR-спектроскопии может быть выполнен как в режиме передачи (дает высококачественные спектры) [108,109], так и в режиме отражения (быстрый анализ толстых и непрозрачных образцов) [109]. Возможности, предоставляемые режимами, прекрасно подходят для выявления микропластика в образцах окружающей среды. Несмотря на значительные преимущества, методика не приспособлена для исследования крупных частиц в просвечивающем режиме, а фрагменты менее 10 мкм и вовсе не подвергаются анализу. На Рисунке 4 изображены результаты анализа микропластика методом FTIR-спектроскопии.

Спектроскопия комбинационного рассеяния представляет собой бесконтактный, неразрушающий метод анализа. Его использование дает возможность получения морфологической информации, химического состава. Рамановская спектроскопия, в отличие от ИК, способна анализировать частицы размером до 1 мкм и менее и дает информацию о внутримолекулярных и межмолекулярных колебаниях. Также метод предполагает определение количества частиц и типов полимеров. Единственным недостатком является сложность с флуоресцирующими материалами. Рисунок 5, представленный ниже, демонстрирует спектр полипропиленовой микрочастицы, определяемой рамановской спектроскопией.

При использовании пиролиза с ГХ/МС возможен количественный анализ (масс частиц) и частичное определение химического состава, однако такой метод является разрушающим и не дает морфологической информации. Образец вводится в нагретую среду и разбивается на более мелкие стабильные фрагменты, известные как пиролизаты, для анализа. Затем пиролизаты разделяют хроматографически. Как только пиролизаты разделены, данные анализируются. Когда образец вводится в установку пиролиза, он мгновенно нагревается от температуры окружающей среды до желаемой температуры в инертной атмосфере. При использовании данного инструмента образец разрушается под воздействием высоких температур, и провести повторное измерение представляется невозможным.

Для достоверной идентификации микропластика и подтверждения химического состава его материала необходимо комбинировать представленные выше методы [6]. Новые подходы могут включать внедрение спектроскопии поглощения нано-FTIR и спектроскопии комбинационного рассеяния, а также комбинированной атомно-силовой микроскопии и инфракрасной спектроскопии (AFM–IR), которые демонстрируют возможности в области определения химических характеристик на наноуровне [7,112,113]. Комбинированный подход, использующий оптические и множественные методы химической характеристики, может устранить некоторые из методологических ограничений [114,115]. Применяются передовые методы картирования FTIR для разработки автоматизированных методов [116]. Такие методы будут иметь решающее значение для новых исследований нанопластика (< 100 нм), которые все больше распространяются в окружающей среде, поскольку их использование увеличивается в тенденциях производства и по мере того, как макро- и микропластиковые отходы продолжают разлагаться [117].

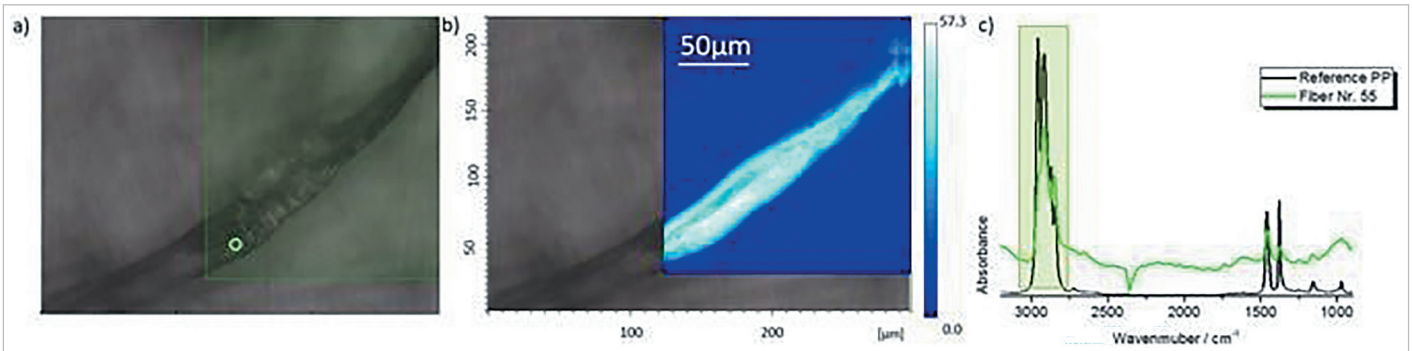


Рисунок 4. **Оптическое изображение полипропиленового волокна (a), химическое изображение, полученное методом FTIR (b), и спектр волокна (зеленая линия) в соответствии со спектрами полипропилена (черная линия) [110]**

Figure 4. **Optical image of the polypropylene fiber (a), chemical image obtained by the FTIR method (b), and the fiber spectrum (green line) in correspondence with the polypropylene spectra (black line) [110]**

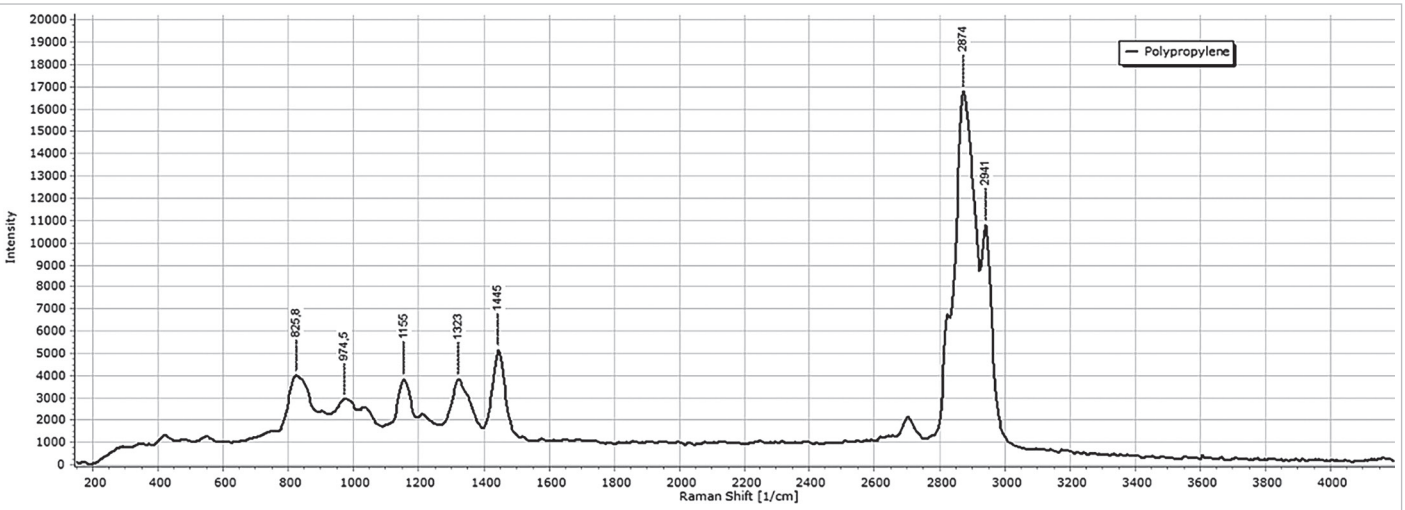


Рисунок 5. **Рамановский спектр частицы полипропилена [111]**
Figure 5. **Raman spectrum of the polypropylene particle [111]**

10. Выводы

Представленные в обзоре данные свидетельствуют о том, что микро- и нанопластики присутствуют в различных средах, в том числе в организме человека. На данный момент не существует глобального решения по защите воды, воздуха и почвы от их загрязнения.

Рассмотренные способы идентификации полимерных частиц различной природы хорошо себя показывают на однокомпонентных средах, в то время как в сложных системах, например, в продуктах питания, обнаружение микропластика затруднено.

Поэтому важно развивать методы обнаружения микропластиков не только с точки зрения расширения спектров идентификации полимерных материалов, но и уделять внимание подготовке проб из различных сред для анализа. Это позволит в будущем облегчить дальнейшие исследования по их выявлению и обеспечить возможность сравнения различных данных в глобальных исследованиях.

Формирование мер по уменьшению производства полимеров будут способствовать сдерживанию негативного влияния микропластиков на окружающую среду. Однако избавить природу от загрязняющих полимерных фрагментов до сих пор является проблемой, над решением которой работают ученые во всем мире.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCE

1. Strategy, P. (2018). A European strategy for plastics in a circular economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels 12. Retrieved from http://gretere.miigaik.ru/sites/default/files/materials/2_00_A%20European%20Strategy%20for%20Plastics%20in%20a%20Circular%20Economy%20(Brussels,%2016.1.2018).pdf Accessed February 25, 2024
2. Henderson, L., Green, C. (2020). Making sense of microplastics? Public understandings of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 152, Article 110908. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110908
3. Hartley, B. L., Pahl, S., Veiga, J., Vlachogianni, T., Vasconcelos, L., Maes, T. et al. (2018). Exploring public views on marine litter in Europe: Perceived causes, consequences and pathways to change. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 945–955. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.061
4. Fraunhofer-Gesellschaft (2018). Impact through research: Applied research for Europe's future. Retrieved from https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2018/november/the-rto-summit.html Accessed May 11, 2023.
5. European Bioplastics EV (2018). European bioplastic. The Plastics Strategy — the contribution of bioplastics to a sustainable plastics circular economy. Berlin, Germany. Retrieved from https://www.european-bioplastics.org/plastics-strategy-contribution-of-bioplastics-to-a-sustainable-circular-plastics-economy/ Accessed February 25, 2024
6. Steensgaard, I. M., Syberg, K., Rist, S., Hartmann, N. B., Boldrin, A., Hansen, S. F. (2017). From macro-to microplastics-Analysis of EU regulation along the life cycle of plastic bags. *Environmental Pollution*, 224, 289–299. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.007
7. European Commission (2019). Press Report. Plastic Waste: A European Strategy to Protect the Planet, Defend Our Citizensand Empower Our Industries: Strasbourgh. Retrieved from https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf Accessed February 25, 2024
8. Correia, M., Loeschner, K. (2018). Detection of nanoplastics in food by asymmetric flow field-flow fractionation coupled to multi-angle light scattering: Possibilities, challenges and analytical limitations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry,* 410(22), 5603–5615. https://doi.org/10.1007/s00216-018-0919-8
9. Vighi, M., Bayo, J., Fernández-Piñas, F., Gago, J., Gómez, M., Hernández-Borges, J. et al. (2021). Micro and nano-plastics in the environment: Research priorities for the near future. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 257, 163–218. https://doi.org/10.1007/398_2021_69
10. Anderson, A. G., Grose, J., Pahl, S., Thompson, R. C., Wyles, K. J. (2016). Microplastics in personal care products: Exploring perceptions of environmentalists, beauticians and students. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1–2), 454–460. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.048
11. Proshad, R., Kormoker, T., Islam, S., Haque, M. A., Rahman, M., Mithu, M. R. (2018). Toxic effects of plastic on human health and environment: A consequences of health risk assessment in Bangladesh. *International Journal of Health*, 6(1), 1–5. https://doi.org/10.14419/ijh.v6i1.8655
12. Wong, J. K. H., Lee, K. K., Tang, K. H. D., Yap, P. -S. (2020). Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Science of the Total Environment*, 719, Article 137512. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512
13. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A. et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. https://doi.org/10.1126/science.1260352
14. Shen, M., Song, B., Zeng, G., Zhang, Y., Huang, W., Wen, X. et al. (2020). Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution? *Environmental Pollution*, 263, Article 114469. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114469
15. Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, Article 134455. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455
16. Luo, T., Zhang, Y., Wang, C., Wang, X., Zhou, J., Shen, M. et al. (2019). Maternal exposure to different sizes of polystyrene microplastics during gestation causes metabolic disorders in their offspring. *Environmental Pollution*, 255, Article 113122. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113122
17. Rani, L., Kaur, G., Sood, P., Kaushal, J., Srivastav, A. L. (2024). Remediation strategies for the removal of microplastics from the water. Chapter in a book: Role of Green Chemistry in Ecosystem Restoration to Achieve Environmental Sustainability. Elsevier, 2024. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15291-7.00004-3
18. Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030
19. Zarfl, C., Matthies, M. (2010). Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? *Marine Pollution Bulletin*, 60(10), 1810–1814. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.026
20. Europe, P. (2016). Plastics–the facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Association of Plastics Manufacturers. Retrieved from https://pdffox.com/plastics-a-the-facts-2016-plastics-europe-pdf-free-647a6db69802e.html Accessed July 25, 2024
21. Lehner, R., Weder, C., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B. (2019). Emergence of nanoplastic in the environment and possible impact on human health. *Environmental Science and Technology,* 53(4), 1748–1765. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512
22. Picó, Y., Barceló, D. (2019). Analysis and prevention of microplastics pollution in water: Current perspectives and future directions. *ACS Omega*, 4(4), 6709–6719. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00222
23. Carpenter, E. J., Smith Jr, K. L. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*, 175(4027), 1240–1241. https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240
24. Verschoor, A., De Poorter, L., Roex, E., Bellert, B. (2014). Quick scan and prioritization of microplastic sources and emissions. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Advisory Letter 250012001.
25. Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G., Ragas, A. M. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), Article 1265. https://doi.org/10.3390/ijerph14101265

26. Amato-Lourenço, L. F., dos Santos Galvão, L., de Weger, L. A., Hiemstra, P. S., Vijver, M. G., Mauad, T. (2020). An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Science of the Total Environment*, 749, Article 141676. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676
27. Rillig, M. C., Ingraffia, R., de Souza Machado, A. A. (2017). Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 8, Article 1805. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805
28. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
29. Yaroslavov, A. A., Arzhakov, M. S., Khokhlov, A. R. (2022). The life cycle of polymer materials: Problems and prospects. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 92(1), 18–24. https://doi.org/10.1134/S1019331622010087
30. GESAMP (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP, 2016
31. Lebreton, L. C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8(1), Article 15611. https://doi.org/10.1038/ncomms15611
32. Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), Article eaaz5803. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803
33. Liu, Y., Yang, Z.-H., Song, P.-P., Xu, R., Wang, H. (2018). Facile synthesis of Bi$_2$MoO$_6$/ZnSnO$_3$ heterojunction with enhanced visible light photocatalytic degradation of methylene blue. *Applied Surface Science*, 430, 561–570. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.231
34. Ершова, А. А., Еремина, Т. Р., Дунаев, А. Л., Макеева, И. Н., Татаренко, Ю. А. (2021). Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока. *Арктика: экология и экономика*, 11(2), 164–177. [Ershova, A. A., Eremina, T. R., Dunaev, A. L., Makeeva, I. N., Tatarenko, Yu. A. (2021). Study of microplastic pollution of the seas of the Russian Arctic and Far East. *Arctic: Ecology and Economics*, 11(2), 164–177. (In Russian)] https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-164-177
35. Gall, S. C., Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041
36. Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., Rotchell, J. M. (2018). Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 241, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.03
37. Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (2015). Marine anthropogenic litter Springer International Publishing, 2015. http://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3
38. Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35(2), 31–8324. https://doi.org/10.1021/es0010498
39. Rios, L. M., Moore, C., Jones, P. R. (2007). Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Marine Pollution Bulletin*, 54(8), 1230–1237. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.03.022
40. Zarfl, C., Matthies, M. (2010). Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic? *Marine Pollution Bulletin*, 60(10), 1810–1814. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.05.026
41. Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35(2), 318–324. https://doi.org/10.1021/es0010498
42. Ryan, P. G., Connell, A. D., Gardner, B. D. (1988). Plastic ingestion and PCBs in seabirds: Is there a relationship? *Marine Pollution Bulletin*, 19(4), 174–176. https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90674-1
43. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, (2000). Chapter 5.10 Polychlorinated biphenyls (PCBs) Air Quality Guidelines — Second Edition. Retrieved from https://pdf4pro.com/view/chapter-5–10-polychlorinated-biphenyls-pcbs-37a6a0.html Accessed July 18, 2024
44. Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053
45. Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190
46. Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10777–10779. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140
47. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), Article e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
48. de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4), 1405–1416. https://doi.org/10.1111/gcb.14020
49. Sohoni, P., Sumpter, J. P. (1998). Several environmental oestrogens are also anti-androgens. *Journal of Endocrinology*, 158(3), 327–340. https://doi.org/10.1677/joe.0.1580327
50. Forte, M., Iachetta, G., Tussellino, M., Carotenuto, R., Prisco, M., De Falco, M. et al. (2016). Polystyrene nanoparticles internalization in human gastric adenocarcinoma cells. *Toxicology in Vitro*, 31, 126–136. https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.11.006
51. Hamoir, J., Nemmar, A., Halloy, D., Wirth, D., Vincke, G., Vanderplasschen, A. et al. (2003). Effect of polystyrene particles on lung microvascular permeability in isolated perfused rabbit lungs: Role of size and surface properties. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 190(3), 278–285. https://doi.org/10.1016/S0041-008X(03)00192-3
52. Jeong, C.-B., Won, E.-J., Kang, H.-M., Lee, M.-C., Hwang, D.-S., Hwang, U.-K. et al. (2016). Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (Brachionus koreanus). *Environmental Science and Technology*, 50(16), 8849–8857. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01441
53. Oberdürster, G. (2000). Toxicology of ultrafine particles: In vivo studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1775), 2719–2740. https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0680
54. Mattsson, K., Johnson, E. V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L. A., Cedervall, T. (2017). Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain. *Scientific Reports*, 7(1), Article 11452. https://doi.org/10.1038/s41598-017-10813-0
55. Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M. et al. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for Lumbricus terrestris (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science and Technology*, 50(5), 2685–2691. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478
56. Schmid, O., Stoeger, T. (2016). Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. *Journal of Aerosol Science*, 99, 133–143. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.12.006
57. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1–2), 290–293. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006
58. Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., Tassin, B. (2015). Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*, 12(5), 592–599. https://doi.org/10.1071/EN14167
59. Cai, L., Wang, J., Peng, J., Tan, Z., Zhan, Z., Tan, X. et al. (2017). Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: Preliminary research and first evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 24928–24935. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0116-x
60. Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of the Total Environment*, 675, 462–471. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110
61. Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136, Article 105411. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411
62. Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O. et al. (2019). Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 244, 153–164. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.039
63. Dehghani, S., Moore, F., Akhbarizadeh, R. (2017). Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20360–20371. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1
64. Vianello, A., Jensen, R. L., Liu, L., Vollertsen, J. (2019). Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*, 9(1), Article 8670. https://doi.org/10.1038/s41598-019-45054-w
65. Gasperi, J., Dris, R., Mirande-Bret, C., Mandin, C., Langlois, V., Tassin, B. (20–24 September, 2015). *First overview of microplastics in indoor and outdoor air*. 15th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment. Leipzig, Germany, 2015.
66. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V. et al. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013
67. Sridharan, S., Kumar, M., Singh, L., Bolan, N. S., Saha, M. (2021). Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 418, Article 126245. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126245
68. Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., Henry, T. B. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675–684. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.069
69. Alfaro-Núñez, A., Astorga, D., Cáceres-Farías, L., Bastidas, L., Soto Villegas, C., Macay, K. et al. (2021). Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *Scientific Reports*, 11(1), Article 6424. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3
70. Mason, S. A., Welch, V. G., Neratko, J. (2018). Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry*, 6, Article 407. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407
71. Mintenig, S. M., Löder, M. G., Primpke, S., Gerdts, G. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the Total Environment*, 648, 631–635. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178
72. World Wide Fund For Nature (2019). No plastic in nature: Assessing plastic ingestion from nature to people. Retrieved from https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/plastic_ingestion_web_spreads.pdf Accessed April 15, 2024.
73. Lithner, D., Larsson, Å., Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309–3324. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038
74. Li, J., Yang, D., Li, L., Jabeen, K., Shi, H. (2015). Microplastics in commercial bivalves from China. *Environmental Pollution*, 207, 190–195. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018
75. Devriese, L. I., van der Meulen, M. D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L. et al. (2015). Microplastic contamination in brown shrimp (Crangon crangon, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1–2), 179–187. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.051
76. Gall, S. C., Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), 170–179. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041
77. Liebezeit, G., Liebezeit, E. (2014). Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 31(9), 1574–1578. https://doi.org/10.1080/19440049.2014.945099
78. Liebezeit, G., Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140. https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025

79. Yang, D., Shi, H., Li, L., Li, J., Jabeen, K., Kolandhasamy, P. (2015). Microplastic pollution in table salts from China. *Environmental Science and Technology*, 49(22), 13622–13627. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163
80. Schneider, M., Stracke, F., Hansen, S., Schaefer, U. F. (2009). Nanoparticles and their interactions with the dermal barrier. *Dermato-Endocrinology*, 1(4), 197–206. https://doi.org/10.4161/derm.1.4.9501
81. Alvarez-Román, R., Naik, A., Kalia, Y. N., Guy, R. H., Fessi, H. (2004). Skin penetration and distribution of polymeric nanoparticles. *Journal of Controlled Release*, 99(1), 53–62. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2004.06.015
82. Campbell, C. S. J., Contreras-Rojas, L. R., Delgado-Charro, M. B., Guy, R. H. (2012). Objective assessment of nanoparticle disposition in mammalian skin after topical exposure. *Journal of Controlled Release*, 162(1), 201–207. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.06.024
83. Hernandez, L. M., Yousefi, N., Tufenkji, N. (2017). Are there nanoplastics in your personal care products? *Environmental Science and Technology Letters*, 4(7), 280–285. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187
84. Gehr, P., Bachofen, M., Weibel, E. R. (1978). The normal human lung: Ultrastructure and morphometric estimation of diffusion capacity. *Respiration Physiology*, 32(2), 121–140. https://doi.org/10.1016/0034-5687(78)90104-4
85. Rothen-Rutishauser, B., Blank, F., Mühlfeld, C., Gehr, P. (2008). In vitro models of the human epithelial airway barrier to study the toxic potential of particulate matter. *Expert Opinion on Drug Metabolism and Toxicology*, 4(8), 1075–1089. https://doi.org/10.1517/17425255.4.8.1075
86. Borm, P. J. A., Kreyling, W. (2004). Toxicological hazards of inhaled nanoparticles — potential implications for drug delivery. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 4(5), 521–531. https://doi.org/10.1166/jnn.2004.081
87. Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L. et al. (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. *Journal of Hazardous Materials*, 407, Article 124399. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399
88. Wang, C., Zhao, J., Xing, B. (2021). Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 407, Article 124357. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357
89. Yaka, M., Ehirchiou, A., Alkandry, T. T. S., Sair, K. (2015). Huge plastic bezoar: A rare cause of gastrointestinal obstruction. *Pan African Medical Journal*, 21(1), Article 286. https://doi.org/10.11604/pamj.2015.21.286.7169
90. Ramasamy, B. S. S., Palanisamy, S. (2021). A review on occurrence, characteristics, toxicology and treatment of nanoplastic waste in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43258–43273. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14883-6
91. Adeniran, A. A., Shakantu, W. (2022). The health and environmental impact of plastic waste disposal in South African Townships: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2), Article 779. https://doi.org/10.3390/ijerph19020779
92. Valsesia, A., Parot, J., Ponti, J., Mehn, D., Marino, R., Melillo, D. et al. (2021). Detection, counting and characterization of nanoplastics in marine bioindicators: A proof of principle study. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), Article 5. https://doi.org/10.1186/s43591-021-00005-z
93. Mahler, G. J., Esch, M. B., Tako, E., Southard, T. L., Archer, S. D., Glahn, R. P. et al. (2012). Oral exposure to polystyrene nanoparticles affects iron absorption. *Nature Nanotechnology*, 7(4), 264–271. https://doi.org/10.1038/nnano.2012.3
94. World Health Organization. (2019). Microplastics in drinking-water. Retrieved from https://www.geatech.eu/wp-content/uploads/2019/08/MICROPLASTICS-IN-DRINKING-WATER.pdf Accessed April 15, 2024
95. Benford, D., Bolger, P. M., Carthew, P., Coulet, M., DiNovi, M., Leblanc, J.-C. et al. (2010). Application of the Margin of Exposure (MOE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic. *Food and Chemical Toxicology*, 48, S2–S24. https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.11.003
96. Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O. et al. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, Article 106274. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274
97. Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), Article 224. https://doi.org/10.3390/toxics9090224
98. Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 15(10), 1949–1956. https://doi.org/10.1039/c3em00214d
99. Ricciardi, M., Pironti, C., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., Montano, L. (2021). Microplastics in the aquatic environment: Occurrence, persistence, analysis, and human exposure. *Water*, 13(7), Article 973. https://doi.org/10.3390/w13070973
100. Srivastava, A., Srivastava, A. (2020). Microplastics: An Emerging Threat to the Aquatic Ecosystem. Chapter in a book: Environmental Biotechnology Vol. 1. Environmental Chemistry for a Sustainable World. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38192-9_5
101. Arzhakova, O. G., Arzhakov, M. S., Badamshina, E. R., Bryuzgina, E. B., Bryuzgin, E. V., Bystrova, A. V. E. et al. (2022). Polymers for the future. *Russian Chemical Reviews,* 91(12), Article RCR5062. https://doi.org/10.57634/RCR5062
102. Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G. et al. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838–838. https://doi.org/10.1126/science.1094559
103. Frias, J. P. G. L., Otero, V., Sobral, P. (2014). Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Marine Environmental Research*, 95, 89–95. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.01.001
104. Vianello, A., Boldrin, A., Guerriero, P., Moschino, V., Rella, R., Sturaro, A. et al. (2013). Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 54–61. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022
105. Reddy, M. S., Shaik Basha, Adimurthy, S., Ramachandraiah, G. (2006). Description of the small plastics fragments in marine sediments along the Alang-Sosiya ship-breaking yard, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3–4), 656–660. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.03.018
106. Ярославов, А. А., Аржаков, М. С., Хохлов, А. Р. (2022). Одноразовая полимерная упаковка: проблема без решения? *Вестник Российской Академии Наук*, 92(10), 961–970. [Yaroslavov, A. A., Arzhakov, M. S., Khokhlov, A. R. (2022). Single-use polymer packaging: problem without solution? *Bulletin of the Russian Academy of Sciences,* 92(10), 961–970. (In Russian)] https://doi.org/10.31857/S0869587322100115
107. Harrison, J. P., Ojeda, J. J., Romero-González, M. E. (2012). The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments. *Science of the Total Environment*, 416, 455–463. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.078
108. Wenning, M., Seiler, H., Scherer, S. (2002). Fourier-transform infrared microspectroscopy, a novel and rapid tool for identification of yeasts. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(10), 4717–4721. https://doi.org/10.1128/AEM.68.10.4717-4721.2002
109. Ojeda, J. J., Romero-Gonzalez, M. E., Banwart, S. A. (2009). Analysis of bacteria on steel surfaces using reflectance micro-Fourier transform infrared spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 81(15), 6467–6473. https://doi.org/10.1021/ac900841c
110. Wesch, C., Elert, A. M., Wörner, M., Braun, U., Klein, R., Paulus, M. (2017). Assuring quality in microplastic monitoring: About the value of clean-air devices as essentials for verified data. *Scientific Reports*, 7(1), Article 5424. https://doi.org/10.1038/s41598-017-05838-4
111. PhysicsOpenLab (2022). Polymer Analysis using Raman Spectroscopy. Retrieved from https://physicsopenlab.org/2022/05/08/polymer-analysis-using-raman-spectroscopy/ Accessed April 15, 2024
112. Kwak, J. I., An, Y.-J. (2021). Microplastic digestion generates fragmented nanoplastics in soils and damages earthworm spermatogenesis and coelomocyte viability. *Journal of Hazardous Materials*, 402, Article 124034. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124034
113. Liu, Z., Li, Y., Pérez, E., Jiang, Q., Chen, Q., Jiao, Y. et al. (2021). Polystyrene nanoplastic induces oxidative stress, immune defense, and glycometabolism change in Daphnia pulex: Application of transcriptome profiling in risk assessment of nanoplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 402, Article 123778. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123778
114. Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science and Technology*, 46(6), 3060–3075. https://doi.org/10.1021/es2031505
115. Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., Lahive, E. (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK–Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1), 218–226. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.004
116. Primpke, S., Lorenz, C., Rascher-Friesenhausen, R., Gerdts, G. (2017). An automated approach for microplastics analysis using focal plane array (FPA) FTIR microscopy and image analysis. *Analytical Methods*, 9(9), 1499–1511. https://doi.org/10.1039/c6ay02476a
117. Koelmans, A. A., Besseling, E., Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. Chapter in a book: Marine anthropogenic litter. Springer, Cham, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_12

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Мяленко Дмитрий Михайлович — кандидат технических наук, заведующий Лабораторией технологий упаковки, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности 115093, Москва, Люсиновская, 35/7 Тел.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218	**Dmitry M. Myalenko**, Candidate of Technical Sciences, Head of Packaging Sector, All-Russian Dairy Research Institute 35/7, Lucinovskaya str., Moscow, Russia Tel.: +7–916–854–18–24 E-mail: d_myalenko@vnimi.org ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6342-7218
Критерии авторства	**Contribution**
Автор имеет единоличное отношение к написанию рукописи и несет ответственность за плагиат	The author has the sole responsibility for writing 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/10.21323/2618-9771-2024-7-3-403-409

Поступила 02.07.2024
Поступила после рецензирования 04.09.2024
Принята в печать 09.09.2024
© Царин С. А., Столярчук Н. М., Кузнецов А. В.,2024

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

АЛЛЕРГИЯ НА ВОДНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ КАК ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ

Царин С. А.[1]*, Столярчук Н. М.[2], Кузнецов А. В.[1,3]

[1] Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
[2] Центр дополнительного образования «Малая академия наук», Севастополь, Россия
[3] Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
водные биологические ресурсы (ВБР), желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), аллерген, парвальбумин, тропомиозин, эпитоп

АННОТАЦИЯ

В обзоре раскрывается проблема аллергии на рыбу и на другие высокоаллергенные пищевые продукты. В первую очередь рассмотрены продукты, полученные из водных организмов. В данной статье обсуждается мировая добыча рыбы различных видов с приведением статистики ФАО за последние годы. Рассматривается роль аквакультуры в производстве рыбы, моллюсков и ракообразных. В частности, анализируются тренды рыболовства в Черном море и рост производства продуктов аквакультуры в России. Обобщенные данные свидетельствуют об увеличении значимости водных биологических ресурсов (ВБР) в сбалансированном рационе человека. Исследование демонстрирует роль парвальбумина в механизме развития аллергии на продукты из ВБР. В статье приводятся примеры других аллергенных белков, которые содержат эпитопы, провоцирующие запуск аллергических реакций в организме человека. Кратко описан механизм возникновения этих реакций. Обращается внимание на перекрестные аллергические реакции. Обсуждаются антропогенные факторы, которые могут усугублять аллергию на рыбные продукты. Таковыми являются пестициды, гербициды, антибиотики, компоненты моющих средств, изменения в химическом составе, условия хранения продуктов. В данной работе упомянуты также псевдоаллергены, способные вызывать аллергические реакции. Симптомы аллергии могут варьироваться от кожных высыпаний и зуда до дыхательных проблем и анафилаксии. Лечение аллергии на рыбу сходно с лечением аллергии на другие пищевые продукты. Оно включает применение антигистаминных препаратов, кортикостероидов и сорбентов. Большую роль в возникновении аллергических реакций играет фактор наследственности. Важно уделять внимание чистоте и качеству продуктов, способам приготовления, а также соблюдать диету. Ввиду потенциально более высокой кумулятивной токсичности пресноводных видов, рекомендуется отдавать предпочтение морской рыбе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Обзор выполнен в рамках тем Госзадания ФИЦ ИнБЮМ «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменений климата» (Регистрационный номер 124030400057-4) и «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (Регистрационный номер 124022400152-1), а также в рамках проекта «Экология Гераклейского полуострова» (Сириус. Лето: начни свой проект. Сезон 2023/2024. Регистрационный номер 100220230513834006).

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают признательность Уткиной Е. Г. за консультации.

Received 02.07.2024
Accepted in revised 04.09.2024
Accepted for publication 09.09.2024
© Tsarin S. A., Stolyarchuk N. M., Kuznetsov A. V., 2024

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

ALLERGY TO AQUATIC BIOLOGICAL RESOURCES AS FOOD

Tsarin S. A.[1]*, Stolyarchuk N. M.[2], Kuznetsov A. V.[1,3]

[1] A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia
[2] Center for Additional Education “Minor Academy of Sciences”, Sevastopol, Russia
[3] Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

KEY WORDS:
aquatic biological resources (ABR), gastrointestinal tract (GI tract), allergen, parvalbumin, tropomyosin, epitope

ABSTRACT

The review reveals the problem of allergies to fish and other highly allergenic foods. First of all, the products obtained from aquatic organisms are considered. The world production of fish of various species is discussed with the presentation of FAO statistics for recent years in this article. The role of aquaculture in the production of fish, shellfish and crustaceans is considered. In particular, the trends of fishing in the Black Sea and the growth of aquaculture production in Russia are analyzed. Generalized data indicate an increase in the importance of aquatic biological resources (ABR) in a balanced human diet. The study demonstrates the role of parvalbumin in the mechanism of development of allergies to products from ABR. Examples of other allergenic proteins that contain epitopes that trigger allergic reactions in the human body are given. The mechanism of these reactions is briefly described. Attention is drawn to cross-allergic reactions. Anthropogenic factors that can exacerbate allergies to fish products are discussed. These are pesticides, herbicides, antibiotics, detergent components, changes in chemical composition, and food storage conditions. Pseudoallergens with the ability to cause allergic reactions are also mentioned. Allergy symptoms can range from skin rashes and itching to respiratory problems and anaphylaxis. Treatment of fish allergy is similar to treatment for allergies to other foods. It includes the use of antihistamines, corticosteroids and sorbents. Heredity plays a major role in the development of allergic reactions. It is important to pay attention to the purity and quality of products, cooking methods, and also follow a diet. Due to the potentially higher cumulative toxicity of freshwater species, it is recommended that marine fish be preferred.

FUNDING: The review was done within the framework of the state assignment of the A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS “Transformation of the structure and functions of marine pelagic ecosystems under the anthropogenic load and climate change” (Registration number 124030400057-4) and “Comprehensive study of the functioning mechanisms of marine biotechnological complexes with the aim of obtain-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Царин, С. А., Столярчук, Н. М., Кузнецов, А. В.** (2024). Аллергия на водные биологические ресурсы как продукты питания. *Пищевые системы*, 7(3), 403–409. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-403-409

FOR CITATION: **Tsarin, S. A., Stolyarchuk, N. M., Kuznetsov, A. V.** (2024). Allergy to aquatic biological resources as food. *Food Systems*, 7(3), 403–409. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-403-409

ing bioactive substances from hydrobionts" (Registration number 124022400152-1), as well as within the project "Ecology of Herakleian Peninsula" (Sirius. Summer: Start Your Project. Season 2023/2024. Registration number 100220230513834006).

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors would like to thank Utkina E. G. for consultations.

1. Введение

Аллергены — это чужеродные белки, которые могут вызывать аллергическую реакцию у некоторых людей [1]. Наиболее распространенные аллергены содержатся в пыльце цветов, в травяной пыли и в золе деревьев. Много аллергенов присутствуют в шерсти домашних животных — кошек и собак. К числу наиболее распространенных пищевых аллергенов относятся персики, орехи (миндаль, кешью, арахис), рыба, моллюски, яйца, молочные продукты и другие. Наиболее распространенным источником белков, которые вызывают аллергические реакции у человека, является пшеница. Соя, фасоль, гречиха и семена кунжута также могут вызывать аллергию, хотя и значительно реже, чем перечисленные выше продукты. Кроме того, у некоторых людей может наблюдаться аллергия на определенные лекарства, на латекс, на пестициды, на красители и на химические вещества. Последние используются в основном в косметике и в моющих средствах. Перечень факторов химической и физической природы, вызывающих аллергию, огромен [2,3,4,5,6]. Реакция на аллергенный белок может проявляться множественными симптомами, вплоть до анафилаксии, которая угрожает жизни человека [7,8,9]. Существует ряд белков-аллергенов, которые могут вызвать сильную аллергическую реакцию у некоторых людей. К наиболее известным принадлежат казеин коровьего молока, альбумин из яиц, тропомиозин и парвальбумин из рыбы. Высоко аллергенными являются и белки арахиса, миндаля, кешью и других орехов. К числу сильных аллергенов также относится глютен, содержащийся в пшенице, в сое, в фасоли и в семенах кунжута [10,11,12].

Водные биологические ресурсы (ВБР) являются важной составляющей питания человечества. Рыболовство (наряду с охотой и земледелием) входило в тройку древнейших занятий людей. Во времена СССР на предприятиях общепита было два рыбных дня в неделю. В современных условиях морепродукты играют все более важную роль в сбалансированном питании. Это происходит на фоне возрастающего дефицита белка животного происхождения в рационе человека. На протяжении последних двух десятилетий мировой вылов ВБР животного происхождения стабилизировался. Его уровень составляет около 90 млн т. Рыба дает более 85% мирового улова водных биологических ресурсов животного происхождения. В обзоре рассматриваются структура и объемы добычи и производства ВБР. Исследованы последствия происходящих изменений в здравоохранении.

2. Объекты и методы

На основе современных данных ФАО выполнен анализ статистических данных по добыче ВБР. Рассмотрен объем производимых из них пищевых продуктов. В основном для этого использованы последние сборники Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). Выделены основные объекты промысла и аквакультуры. Показаны перспективы отраслей в мировом производстве продуктов питания.

Информация, связанная с аллергическими реакциями на ВБР, рассмотрена на основе классических работ по аллергии. Также учтены новейшие сведения. Объектом исследования служили научные публикации, посвященные вопросам, связанным с аллергией человека на рыбу и другие ВБР. Анализировались оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, а также главы из монографий, опубликованные на английском и на русском языках. Поиск научной литературы проводили в библиографических базах Scopus и Web of Science и в открытых интернет-источниках. Для отбора статей на русском языке провели поиск в Google Scholar и в Научной электронной библиотеке (eLIBRARY.RU). Поисковый запрос публикаций осуществлялся с использованием ключевых слов и ряда их комбинаций:

- на английском языке: fish allergy, allergy on aquatic biological resources, shellfish allergy, allergen, parvalbumin, tropomyosin, epitope;
- на русском языке: аллергия на рыбу, аллергия на ВБР, аллергия на водных моллюсков, аллерген, парвальбумин, тропомиозин, эпитоп.

Временными рамками для обзора научных публикаций был принят период 2000–2024 гг., основная масса работ относится к 2017–2024 гг.

Критерии включения публикаций для анализа:

- Опубликованные научные статьи;
- Статья соответствует теме исследования;
- Период выхода публикаций — 2000–2024 гг.;
- Публикации на английском и русском языках.
- Критерии исключения публикаций для анализа:
- Тезисы докладов конференций, работы без полных текстов публикаций;
- Статья не соответствует теме настоящего обзора;
- Публикации, вышедшие ранее 2000 г.;
- Статьи, написанные не на английском и русском языках.

При отборе публикаций приоритет имели высоко цитируемые источники. Дополнительными критериями исключения выступали такие факторы, как наличие аннотации и доступность полного текста научной публикации.

3. Интенсивность рыболовства

В последние годы представители отряда Сельдеобразных (Clupeiformes) являются одними из главных объектов мирового рыболовного промысла. Общий объем их вылова составляет 17,6–20,5 млн т. Среди них наибольшее значение имеют семейства Сельдевые (Clupeidae) с добычей 10,6–11,0 млн т и анчоусовые (Engraulidae) — 6,9–9,7 млн т. Добыча представителей отряда Скумбриеобразных (Scombriformes) значительна — 12,6–13,4 млн т, причем основную часть составляют виды семейства Скумбриевых (Scombridae). Добыча представителей отряда Трескообразных (Gadiformes) также велика — 8,6–9,4 млн т, в основном за счет тресковых (Gadidae). Весьма существенен и вылов ставридовых (Carangidae) — 4,5–4,9 млн т [13]. Данные по уловам других таксономических групп рыб за последние годы представлены в Таблице 1 (в млн т).

Если брать отдельные виды рыб, то наибольшие уловы приходятся на перуанского анчоуса *(Engraulis ringens)*. Его добыча в последние годы составляет 3,9–7,0 млн т. В отдельные периоды вылов перуанского анчоуса достигал 11–12 млн т. Однако большая часть этого объекта промысла идет на рыбную муку, а не непосредственно в пищу. Следом за перуанским анчоусом по объему вылова идет минтай *(Gadus chalcogrammus)* — 3,4–3,5 млн т. Третье место занимает полосатый тунец *(Katsuwonus pelamis)* с уловом 2,8–3,3 млн т. На четвертом месте сельдь атлантическая *(Clupea harengus)* — 1,5–1,8 млн т. Замыкает пятерку желтоперый тунец *(Thunnus albacares)* — его улов составляет 1,5–1,6 млн т. Мировые уловы остальных видов промысловых рыб за 2017–2022 гг [14] представлены в Таблице 2. Существенно в мировом вылове значение двустворчатых (5,8–6,8 млн т) и головоногих (3,6–3,9 млн т) моллюсков. Также значительна роль ракообразных (5,8–6,8 млн т). В настоящее время Россия занимает четвертое место в мире по вылову рыбы. В 2023 г. рыболовство в РФ достигло максимальных значений после распада СССР (5,3 млн т). Но оно существенно не дотягивает до уловов времен РСФСР (7–8 млн т).

Таблица 1. **Мировые уловы некоторых таксонов рыб (млн т)**
Table 1. **World catches of some fish taxa (million tons)**

Таксон	Годы					В среднем
	2017	2018	2019	2020	2021	
Сем. Карповые (Cyprinidae)	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	1,9
Отр. Лососеобразные (Salmoniformes)	1,0	1,1	1,1	0,7	1,1	1,0
Отр. Камбалообразные (Pleuronectiformes)	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0
Сем. Цихловые (Cichlidae)	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9
Сем. Кефалевые (Mugilidae)	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6

Таблица 2. **Мировые уловы некоторых массовых промысловых видов рыб (млн т)**
Table 2. World catches of some mass commercial fish species (million tons)

Вид	Годы						В среднем
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Скумбрия тихоокеанская *(Scomber japonicus)*	1,5	1,6	1,4	1,4	1,7	1,4	1,5
Сардина средиземноморская *(Sardina pilchardus)*	1,4	1,6	1,5	1,3	1,4	1,6	1,5
Северная путассу *(Micromesistius poutassou)*	1,6	1,7	1,5	1,5	1,2	1,0	1,4
Ставрида сигарная *(Decapterus punctatus)*	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3
Треска атлантическая *(Gadus morhua)*	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
Рыба-сабля волосохвост *(Trichiurus lepturus)*	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Скумбрия атлантическая *(Scomber scombrus)*	1,2	1,0	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1

В отдельные годы общий вылов рыбы в Черном море всеми странами достигал 0,9 млн т. Максимальные уловы были в 1980-х гг. В пиковые годы советского рыболовства в Черном море добыча была почти 0,3 млн т [15]. В последние годы РФ вылавливает около 0,1 млн т ВБР в Черном море. В первой половине XX века основу уловов составляли ценные промысловые виды, такие как скумбрия *(Scomber scombrus)*, пеламида *(Sarda sarda)*, кефаль (сем. Mugilidae) и ставрида *(Trachurus ponticus)*. Важную роль в уловах играли также камбала-калкан *(Scophthalmus maeoticus)*, сельдь *(Alosa spp.)* и представители семейства осетровых (Acipenseridae). Позднее основу промысла составили хамса *(Engraulis encrasicolus)* и шпрот *(Sprattus sprattus)*. Их доля в общем улове достигала 81 и 12% соответственно [16,17]. В меньшей степени вылавливают мерланга *(Merlangius merlangus)* и черноморскую ставриду *(T. ponticus)*. В некоторых районах существенное значение имеет султанка *(Mullus ponticus)* [18].

4. Возрастающая роль аквакультуры

Аквакультура, особенно рыбоводство, вносит значительный вклад в производство продукции животного происхождения. В 2023 г., по данным ФАО [19], мировое производство рыболовства и рыбоводства практически сравнялись. В ряде стран, таких как Китай, Индия, Бангладеш, Египет, Вьетнам, Греция и другие, продукция аквакультуры уже значительно превышает объемы улова. Основные объекты аквакультуры — рыбы семейства Карповых (Cyprinidae), общий объем производства которых составляет 28,1–31,1 млн т. На них приходится более трети всей мировой аквакультуры ВБР (без учета водорослей). При этом основными объектами рыборазведения в мире являются белый амур *(Ctenopharyngodon idella)* и белый толстолобик *(Hypophthalmichthys molitrix)*, а также карп *(Cyprinus carpio)*, занимающий третье место по объему производства. В России основным объектом разведения является карп. Велика роль в аквакультуре рыб сем. Цихловых (Cichlidae) — 5,9–6,4 млн т (разные виды тиляпий). Интенсивно разводят и представителей отряда Лососеобразных рыб (Salmoniformes) — 3,5–4,2 млн т. Значительную долю в аквакультуре составляют двустворчатые моллюски — 16,8–17,4 млн т. Это преимущественно устрицы (сем. Ostreidae), сердцевидки (сем. Cardiidae), морские гребешки (сем. Pectinidae), мидии (рода Mytilus). Велико значение в аквакультуре и ракообразных — 8,6–11,9 млн т.

В настоящее время всеми странами производится 62,2–63,7 млн т рыбной продукции ежегодно. На рыбу приходится 54,7–55,6 млн т, а 7,3–8,3 — на моллюсков, ракообразных и т. д. По производству такой продукции Россия (5,1–5,4 млн т) занимает второе место в мире после Китая. Из этого объема 94% приходится на рыбу (4,8–4,9 млн т) [20].

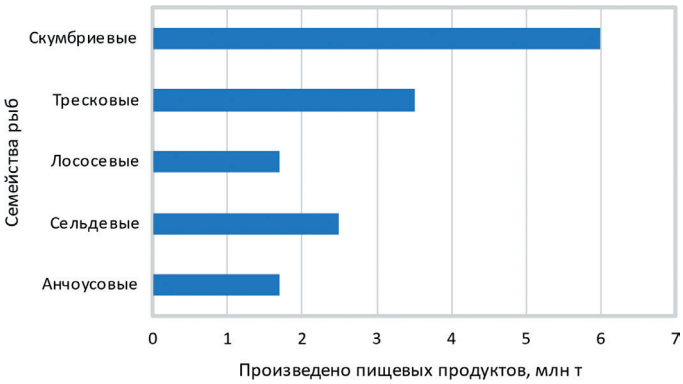


Рисунок 1. **Основные группы рыб, используемые для производства продуктов питания**
Figure 1. **Main fish groups used for food production**

Наибольший вклад в производство пищевых продуктов вносят семейства рыб, представленные на Рисунке 1. Основная доля производства продуктов питания из скумбриевых принадлежит тунцам (3,6–4,0, в среднем — 3,9 млн т). Это 15 видов рыб из 5 родов. В ближайшие годы доля ВБР в питании человечества будет увеличиваться преимущественно за счет развития аквакультуры.

5. Аллергические реакции на ВБР

У некоторых людей имеется аллергическая реакция на морских и пресноводных рыб и другие ВБР. В основном это происходит при использовании их в качестве пищевых продуктов [21,22]. Аллергия, проявившаяся в детстве, нередко исчезает с возрастом. Это во многом зависит от состояния иммунной системы. При этом аллергия на рыбу проявляется у группы людей в течение всей жизни. На некоторые другие пищевые продукты аллергия имеется только в детском возрасте (яйца, молочные продукты). Аллергия на рыбу и моллюсков у взрослых и подростков проявляется чаще, чем у маленьких детей. Важную роль в развитии аллергии играет генетика, аллергия на рыбу часто передается по наследству [23,24]. Проявления аллергии обычно возникают через 2–3 часа после употребления продукта. В тяжелых случаях симптоматика развивается моментально. Слабые аллергические реакции возможны в течение 24 часов после приема пищи [25,26].

Напомним, что в переводе с греческого аллергия означает «иное воздействие». Иммунная система защищает организм от вирусов, бактерий, токсинов. Однако в случае с аллергенами защита может срабатывать и на безвредные вещества. Они воспринимаются как чужеродные. Организм реагирует на чужеродный белок — антиген (в нашем случае пищевой «рыбный» белок) — и нейтрализует его. При этом образуются антитела (как при контакте с инфекционным возбудителем). Из мышечной ткани рыб многих видов был выделен кальций-связывающий белок — парвальбумин. Он и является основным возбудителем аллергии (но не единственным) [27]. После попадания антигена в организм он встречается с антителом — иммуноглобулином класса E (IgE). Затем такие IgE-антитела прикрепляются к тучным клеткам соединительной ткани, которые выделяют гистамин. В результате чего проявляются разнообразные аллергические реакции. Установлено, что IgE-антитела обладают разнообразием типов и видов, каждый из которых специфичен для определенного аллергена. Этим объясняется разнообразие возбудителей аллергии (аллергенов) [28,29,30,31,32].

В общем, аллергическая реакция является ответным иммунологическим действием организма на чужеродную субстанцию. Эта субстанция известна как аллерген, а сама реакция включает несколько стадий:

1) Сенсибилизация: во время первичной экспозиции аллергена иммунная система человека продуцирует IgE-антитела, специфичные для этого аллергена. Эти антитела связываются с рецепторами FcεRI на поверхности тучных клеток — мастоцитов.
2) Активация тучных клеток: при повторной экспозиции аллергена он связывается со специфическими IgE-антителами на поверхности мастоцитов. Это вызывает дегрануляцию этих клеток и высвобождение медиаторов воспаления, таких как гистамин, лейкотриены и простагландины.
3) Воспаление: медиаторы воспаления вызывают разнообразные проявления аллергической реакции. Они включают кожное высыпание, зуд, отеки, боль; насморк, затрудненное дыхание и сдавленный голос; кашель. Может возникать дискомфорт, недомогание, тошнота, рвота, диарея и боль в животе.
4) Анафилаксия: в редких случаях повторная экспозиция аллергена может привести к серьезной аллергической реакции — анафилаксии. Это опасное для жизни состояние, которое проявляется в виде сильного спазма дыхательных путей. При анафилаксии может

появиться низкое кровяное давление, учащение пульса и потеря сознания. Анафилаксия требует немедленной медицинской помощи. Аллергическая реакция включает множество различных сигнальных путей и медиаторов, которые приводят к воспалению. Молекулярный механизм этого процесса чрезвычайно сложен и до сих пор не полностью изучен [33,34,35].

Аллергенные белки содержат специфические участки, известные как эпитопы. Они распознаются иммунной системой и запускают аллергическую реакцию. Эпитопы могут быть линейными или конформационными. Линейные (пептидные) эпитопы — это последовательности аминокислотных остатков в белке-аллергене, которые распознаются IgE-антителами. Они могут быть относительно короткими (5–20 аминокислот) и могут присутствовать в различных частях белка-аллергена. Конформационные эпитопы образуются трехмерной структурой белка-аллергена, которая формируется после пространственной укладки отдельных аминокислотных последовательностей. Они могут быть распознаны IgE-антителами только в своей трехмерной конформации. Эти эпитопы обычно более специфичны, чем линейные. Эпитопы на поверхности белков-аллергенов довольно разнообразны, что зависит от типа аллергена, от его химической природы и от пространственной структуры. Кроме того, эти эпитопы могут меняться в зависимости от условий хранения и обработки аллергена. Это может повлиять на способность иммунной системы распознавать и реагировать на него [36,37,38].

Реакцию иммунной системы может индуцировать даже минимальное количество антигена. Аллергия на рыбные блюда и ВБР связана не только с наличием в них специфического белка. Важную роль играет и воздействие на человека факторов окружающей среды, таких как пестициды, гербициды, удобрения, моющие средства, промышленные отходы и т. д. В продуктах аквакультуры могут содержаться антибиотики и стимуляторы роста. Они вызывают бурную защитную реакцию человеческого организма с соответствующими процессами. При длительном хранении ВБР в них развиваются микроорганизмы, образующие скомбротоксин [39]. Последний устойчив к способам приготовления пищи. Он вызывает высвобождение гистамина и провоцирует развитие аллергии. Могут вызывать аллергию и паразиты, живущие в пищеварительном тракте рыбы, в основном нематоды рода *Anisakis* [40,41,42].

Не только парвальбумины [43] вызывают аллергию на рыбу. Аллергенами у трески, лосося и тунца могут быть белки энолазы и альдолазы, которые разрушаются при термообработке. Также аллергеном может являться белок икры рыб — вителлогенин, отсутствующий в теле рыбы [44]. Но аллергия на икру — явление редкое. У ракообразных и рыбы тиляпии (сем. Cichlidae) устойчивый к термообработке белок тропомиозин выступает как аллерген [45]. Аллергия на рыбу может быть видоспецифичной (на один или несколько видов рыб) и перекрестной [43,46]. Она связана с парвальбуминами, энолазой и альдолазой (на большинство видов рыб).

5.1. Распространенность аллергических реакций

Рыба и ВБР входят в перечень восьми наиболее аллергенных пищевых продуктов. Реакция на эти продукты выражается в крайне неприятных симптомах. Аллергия на рыбу встречается у 4 человек из 1000. При этом у 40% из них отмечена реакция на белок рыбы. Пищевыми аллергиями страдает больше половины населения планеты. Это вызвано повышенной чувствительностью иммунной системы. Наибольшую опасность для потенциальных аллергиков представляют продукты с высоким содержанием белка, который считается сильнейшим аллергеном. Аллергия на рыбу — частое явление, так как рыба богата протеинами группы альбуминов. Эти же белки содержатся в яйцах и мясе животных. Поэтому аллергия на рыбу нередко сочетается с перекрестной аллергией на другие продукты животного происхождения. Альбумины сворачиваются под воздействием высоких температур и растворяются в жидкостях. При этом они не меняют своих свойств по отношению к организму человека. Рыба не перестает быть опасным аллергеном даже после приготовления (термической обработки, копчения или соления) [47].

Большинство людей с аллергией на рыбу имеют аллергические реакции на несколько видов рыб. Это объясняется высокой перекрестной реактивностью парвальбумина [46,47,48,49,50]. Однако у каждого человека встречается индивидуальная непереносимость определенных антигенов. Непереносимость некоторых видов рыб не сопровождается аллергией на всю рыбу или другие ВБР. При этом аллергия может проявляться не только при употреблении рыбы или других ВБР в пищу. Она может возникать и при приготовлении еды. Это может быть связано с запахом, тактильным восприятием и т. д. [51]. Согласно статистическим отчетам, в мире наблюдается ежегодный рост аллергических заболеваний на 18%. В России аллергия встречается у 30% населения в среднем. Количество обращений в скорую помощь из-за пищевой аллергии превышает 30 000 случает в год.

Могут встречаться и ложно аллергические реакции (псевдоаллергия, параллергия). В клинических проявлениях этот процесс схож с обычной аллергией. Но причины возникновения такой аллергии иные. Обычно это проявляется при воздействии аллергенов с сопутствующими веществами, как правило, не вызывающими аллергию. В таком случае организм впоследствии может реагировать не на сам аллерген. Реакция возникает на ранее сопутствующие ему «безвредные» вещества.

Тунцы *(Thunnus* spp., *Auxis* spp., *Euthynnus* spp., *Allothunnus fallai, Katsuwonus pelamis)* — наиболее аллергенные морские рыбы. При этом в их мясе не обнаружен мышечный протеин — парвальбумин. Однако тунцы относятся к крупным хищникам. А такие рыбы накапливают в тканях большое количество ртути, приводящей к развитию аллергической реакции [52,53]. По этой причине наиболее аллергенной рыбой является навага *(Eleginus gracilis, E. Nawaga)*. Сильными аллергенами являются крупный хек *(Merluccius spp.)*, горбуша *(Oncorhynchus gorbuscha)*, сайда *(Pollachius virens)*. Накапливают яды нельма *(Stenodus leucichthys nelma)*, белуга *(Huso huso)*, угорь *(A. anguilla)*, сомы (сем. Siluridae) [54]. Менее аллергенные рыбы — это скумбрия *(Scomber* spp.*)*, сельди *(Clupea* spp., *Alosa* spp.*)*, сардины *(Sardina* spp*)*. Незначительна и аллергенность сардинеллы *(Sardinella* spp.*)* и сардинопса *(Sardinops sagax)* [48,52,55]. Диагностика аллергии на парвальбумин отдельных видов рыб стала доступна с внедрением молекулярных методов исследования [44,56,57,58].

Ракообразные и морские моллюски также являются весьма частыми возбудителями аллергических реакций [59,60,61]. При этом возникают и перекрестные аллергические реакции между ракообразными и моллюсками. К наиболее аллергенным пищевым продуктам из ВБР относятся: масло рыбное, мидии, рыбный ароматизатор. Таковыми являются икра из рыбы, сурими, морепродукты, креветки, анчоусы, сашими, тэмпура, суши [62]. Добавление консервантов ощутимо снижает полезность красной и черной икры. По этой же причине к группе риска относятся и крабовые палочки. При производстве последних применяется большое количество искусственных пищевых добавок [63,64,65].

Речная рыба менее агрессивна по отношению к иммунной системе, чем морская в качестве аллергена. Пресные водоемы подверглись более раннему и значительному загрязнению, чем морские. Поэтому речная рыба более токсична (например, сомы семейства *Siluridae*, угорь обыкновенный *(Anguilla anguilla)*). Ткани рыб впитывают пестициды, тяжелые металлы, токсины, повышающие риск развития аллергической реакции [22,45]. Поэтому следует отдавать предпочтение морской рыбе.

5.2. Симптоматика и лечение аллергий

Люди с аллергией на рыбу могут страдать от расстройства желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Могут возникать пощипывание слизистых оболочек рта и неба, рвота, сыпь, зуд, пятна и волдыри на теле. Бывает отек губ и век, сухой кашель, насморк, слезотечение, аллергический конъюнктивит. У некоторых людей может понизиться давление. Тяжелые симптомы при аллергии на рыбу встречаются не часто. К таковым относятся одышка (затрудненное дыхание, апноэ), случаи астмы и анафилактический шок [21,26,66]. Астма может возникать в связи со спецификой производства, связанной с обработкой различных видов рыб. Астма, по-видимому, является фактором риска фатальной анафилаксии на ВБР, а пищевая аллергия является фактором риска опасных для жизни заболеваний [21]. Рыбья кровь, особенно для сотрудников рыбоперерабатывающих предприятий, является значимым аллергеном, вдыхание которого может привести к развитию профессиональной астмы [26]. Часто астма как аллергическая реакция на ВБР проявляется у детей [67]. Астма обычно встречалась при наличии IgE FA [68]. Тяжелейшим проявлением аллергии на рыбные продукты является анафилактический шок, приводящий к смерти в 20% случаев. Нередко появлению опасной для жизни анафилаксии способствует рыбный желатин [69]. Также был зарегистрирован случай анафилаксии на рыбный коллаген у ребенка [70].

Для облегчения симптоматики аллергии широко используются антигистаминные препараты. Препараты разработаны для уменьшения количества гистамина или для его нейтрализации во время его активного действия. В настоящее время существует четыре поколения антигистаминных средств. Нередко необходимы мощные противовоспалительные препараты — кортикостероиды, а назальные (противоаллергические) спреи оказывают эффективное

местное воздействие. Часто применяют сорбенты, способствующие максимально быстрому выводу аллергенов и токсинов из организма. Самые известные в данной группе медикаментов — это активированный уголь, энтеросгель, полисорб, смекта. Неплохие результаты в ослаблении аллергических реакций показали и препараты кальция. Эти препараты способствуют восполнению кальция в организме, укреплению сосудистых стенок с уменьшением их проницаемости [71]. Это затрудняет проникновение аллергена в кровь. Также с целью лечения и профилактики аллергии применяют витаминные комплексы [72]. При тяжелых острых проявлениях аллергической реакции необходимо сделать инъекцию адреналина, преднизолона. К таковым относятся анафилактический шок, отек Квинке, генерализованная крапивница.

Среди методов лечения аллергий выделяют две основные группы:

1) Аллерген-специфическая иммунотерапия (АСИТ), где пациент с аллергией намеренно подвергается воздействию аллергена в малых дозах. Пациент постепенно привыкает к аллергену, и чувствительность его иммунного ответа уменьшается. АСИТ может включать регулярную экспозицию к аллергену путем вдыхания, нюхания или приема пищи с аллергеном. Этот метод может помочь уменьшить проявления негативных симптомов аллергии и уменьшить зависимость от лекарств [73].
2) Медикаментозная терапия, в которой в основном используются лекарства для снижения симптомов аллергии. Лекарства могут включать антигистаминные препараты, стероиды, деконгестанты и бронходилататоры [74].

В последние годы для лечения аллергий стали широко применять иммунотерапию и ферментную терапию. Эти методы направлены на улучшение специфичности лечения аллергий, на увеличение эффективности иммунного ответа, на минимизацию побочных эффектов. Иммунотерапия основана на введении пациенту специфических белков-аллергенов. Белки-аллергены обучают иммунную систему распознавать себя и не реагировать на них [75]. Иммунотерапия может помочь снизить чувствительность к аллергену и уменьшить симптоматику [76]. Методы генной инженерии и протеин-дизайна призваны помочь в создании имитаторов белков-аллергенов [77]. Эти имитаторы и будут применяться в иммунотерапии [78,79]. Ферментная терапия использует энзимы для расщепления белков-аллергенов на меньшие части, которые не вызывают аллергические реакции [80]. Перспективным выглядит использование регуляторных РНК. Молекулярные методы и биоинформатика помогают идентифицировать маркеры аллергии, специфические эпитопы-мишени и ферменты, которые расщепляют белки-аллергены [81,82].

4. Заключение

В целом, такие методы лечения аллергий, как АСИТ и медикаментозная терапия, оправдывают себя. Стали применяться молекулярные методы — иммунотерапия и ферментная терапия. Они направлены на увеличение эффективности иммунного ответа, на улучшение специфичности лечения аллергий и на минимизацию побочных эффектов. Современные методы также включают использование молекулярных маркеров. Маркеры служат для определения чувствительности к аллергенам и для создания новых молекул-ингибиторов аллергических реакций [83]. Молекулярные методы помогают в разработке методов диагностики аллергий и мониторинга иммунного ответа на соответствующую терапию.

Проведенный анализ литературы позволяет лучше понять природу источников аллергических реакций на рыбные продукты. Это дает возможность выявить потенциальные причины возникновения таковых реакций. При аллергии на продукты питания, в частности на рыбу и ВБР, необходимо соблюдать строгую диету. Самое важное — исключить аллерген. Даже качественную рыбу рекомендуют употреблять не чаще 1 раза в неделю. Ежедневное употребление рыбы и ВБР, вне зависимости от способа приготовления, ведет к разбалансировке работы ЖКТ. Это может сопровождаться аллергическими реакциями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. De Martinis, M., Sirufo, M. M., Suppa, M., Ginaldi, L. (2020). New perspectives in food allergy. *International Journal of Molecular Sciences,* 21(4), Article 1474. https://doi.org/10.3390/ijms21041474
2. Sicherer, S. H., Sampson, H. A. (2018) Food allergy: A review and update on epidemiology, pathogenesis, diagnosis, prevention, and management. *Journal of Allergy and Clinical Immunology,* 141(1),41–58. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2017.11.003
3. Savage, J., Johns, C. B. (2015). Food allergy: Epidemiology and natural history. *Immunology and allergy clinics of North America*, 35(1), 45–59. https://doi.org/10.1016/j.iac.2014.09.004
4. Valenta R., Hochwallner H, Linhart B, Pahr S. (2015). Food allergies: The basics. *Gastroenterology,* 148(6), 1120–1131.e4. https://doi.org/10.1053/j.gastro.2015.02.006
5. Cosme-Blanco, W., Arroyo-Flores, E., Ale, H. (2020). Food Allergies. *Pediatrics in Review,* 41(8), 403–415. https://doi.org/10.1542/pir.2019-0037
6. Loh, W., Tang, M. L. K. (2018). The epidemiology of food allergy in the global context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9), Article 2043. https://doi.org/10.3390/ijerph15092043
7. Sharma, H. P., Bansil, S., Uygungil, B. (2015). Signs and symptoms of food allergy and food-induced anaphylaxis. *Pediatric Clinics of North America*, 62(6), 1377–1392. https://doi.org/10.1016/j.pcl.2015.07.008
8. Deschildre, A., Lejeune, S. (2018). How to cope with food allergy symptoms? *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology,* 18(3), 234–242. https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000447
9. Valverde-Monge, M., Pastor-Vargas, C., Rodríguez del Rio, P., Escudero, C., Sánchez-García, S., Mendez Brea, P. et al. (2018). Anaphylaxis by exclusive allergy to swordfish and identification of a new fish allergen. *Pediatric Allergy and Immunology*, 29(5), 563–565. https://doi.org/10.1111/pai.12916
10. González-Fernández, J., Alguacil-Guillén, M., Cuéllar, C., Daschner, A. (2018). Possible allergenic role of tropomyosin in patients with adverse reactions after fish intake. *Immunological Investigations,* 47(4), 416–429. https://doi.org/10.1080/08820139.2018.1451882
11. Climer, L. K., Cox, A. M., Reynolds, T. J., Simmons, D. D. (2019). Oncomodulin: The enigmatic parvalbumin protein. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 12, Article 235. https://doi.org/10.3389/fnmol.2019.00235
12. Sampath, V., Abrams, E. M., Adlou, B., Akdis, C., Akdis, M., Brough, H. A. et al. (2021). Food allergy across the globe. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 148(6), 1347–1364. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2021.10.018
13. ВНИРО (2023). Мировые уловы рыбы и нерыбных объектов промысла 2017–2021 гг. (по материалам ФАО). М.: ВНИРО, 2023. Электронный ресурс: http://www.vniro.ru/ru/nauchnaya-deyatelnost/statisticheskie-svedeniya/mirovye-ulovy-ryby-i-nerybnykh-obektov-promysla-za-2017-2021-gg. Дата доступа 14.05.2024. [VNIRO (2023). World catches of fish and non-fish objects of catching 2017–2021 (according to FAO materials). Moscow: VNIRO, 2023. Retrieved from http://www.vniro.ru/ru/nauchnaya-deyatelnost/statisticheskie-svedeniya/mirovye-ulovy-ryby-i-nerybnykh-obektov-promysla-za-2017–2021-gg Accessed May 14, 2024 (In Russian)]
14. FAO (2024) The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome, 2024. https://doi.org/10.4060/cd0683en
15. Состояние биологических ресурсов Черного и Азовского морей (справочное пособие). Керчь: Издательство ЮгНИРО, 1995. [State of Biological Resources of the Black and Azov Seas (Reference Manual). Kerch: YugNIRO Press, 1995. (In Russian)]
16. Балыкин, П. А. (2014). Водные биоресурсы Азово-Черноморского бассейна, их использование и изучение. *Рыбоводство и рыбное хозяйство,* 8, 16–25. [Balykin, P. A. (2014). Aquatic biological resources of the Azov and Black Sea basin, their use and study. *Fish Breeding and Fisheries*, 8, 16–25. (In Russian)]
17. Балыкин, П. А., Куцын, Д. Н., Старцев, А. В. (2021). Рыболовство в условиях климатических изменений: динамика состава и структуры уловов в российской части Чёрного моря в XXI веке. *Морской биологический журнал*, 6(3), 3–14. [Balykin, P. A., Kutsyn, D. N., Startsev, A. V. (2021). Fishing under climate change: Dynamics of composition and structure of catches in the Russian Black Sea in the XXI century. *Marine Biological Journal*. 6(3), 3–14. (In Russian)] https://doi.org/10.36038/0234-2774-2021-22-3-51-60
18. Еремеев, В. Н., Гаевская, А. В., Шульман, Г. Е., Загородняя, Ю. А. (2011). Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. [Eremeev, V. N., Gaevskaya, A. V., Shulman, G. E., Zagorodnyaya, Ju. A. (2011). Biological resources of the Black Sea and Sea of Azov. Sevastopol: ECOSY- Gidrofizika, 2011. (In Russian)]
19. FAO (2023). Agricultural production statistics 2000–2022. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 79. Rome, 2023. https://doi.org/10.4060/cc9205en
20. ВНИРО (2023). Мировое производство рыбной продукции в 2017–2021 гг. (по материалам ФАО). М: ВНИРО, 2023. Электронный ресурс: http://www.vniro.ru/ru/nauchnaya-deyatelnost/statisticheskie-svedeniya/mirovoe-proizvodstvo-rybnoj-produktsii-v-2017–2021-gg. Дата доступа 14.05.2024. [VNIRO (2023). [World fish production in 2017–2021. (2023). Moskow: VNIRO, 2023. Retrieved from http://www.vniro.ru/ru/nauchnaya-deyatelnost/statisticheskie-svedeniya/mirovoe-proizvodstvo-rybnoj-produktsii-v-2017–2021-gg (In Russian)] Accessed May 14, 2024 (In Russian)]
21. Sharp, M. F., Lopata, A. L. (2014). Fish allergy: In review. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 46(3), 258–271. https://doi.org/10.1007/s12016-013-8363-1
22. Liu, R., Krishnan, H. B., Xue, W., Lui, C. (2010). Characterization of allergens isolated from freshwater fish Blunt Snout Bream (*Megalobrama amblycephala*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 458–461. https://doi.org/10.1021/jf103942p
23. Sasaki, M., Koplin, J. J., Dharmage, S. C., Field, M. J., Sawyer, S. M., McWilliam, V. et al. (2018). Prevalence of clinic-defined food allergy in early adolescence: The SchoolNuts study. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 141, 391–398.e4. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2017.05.041
24. Kanchan, K., Clay, S., Irizar, H., Bunyavanich, S., Mathias, R. A. (2021). Current insights into the genetics of food allergy. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 147(1), 15–28. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2020.10.039
25. Kourani, E., Corazza, F., Michel, O., Doyen, V. (2019). What do we know about fish allergy at the end of the decade? *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 29(6), 414–21. https://doi.org/10.18176/jiaci.0381

26. Dijkema, D., Emons, J. A. M., Van de Ven, A. A. J. M., Oude Elberink, J. N. G. (2022). Fish allergy: Fishing for novel diagnostic and therapeutic options. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology,* 62(1), 64–71. https://doi.org/10.1007/s12016-020-08806-5
27. Carvalho, S., Marcelino, J., Cabral Duarte, M. F., Costa, C., Barbosa, M. A., Pereira Dos Santos M. C. (2020). Role of recombinant parvalbumin Gad c 1 in the diagnosis and prognosis of fish allergy. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 30(5), 340–345. https://doi.org/10.18176/jiaci.0437
28. Kuehn, A., Scheuermann, T., Hilger, C., Hentges, F. (2010). Important variations in parvalbumin content in common fish species: A factor possibly contributing to variable allergenicity. *International Archives of Allergy and Immunology,* 153(4), 359–366. https://doi.org/10.1159/000316346
29. Schulkes, K. J., Klemans, R. J., Knigge, L, de Bruin-Weller, M, Bruijnzeel-Koomen, C. A, Marknell de Witt, A. et al. (2014). Specific IgE to fish extracts does not predict allergy to specific species within an adult fish allergic population. *Clinical and Translational Allergy*, 4(1), Article 27. https://doi.org/10.1186/2045-7022-4-27
30. Kato Y., Morikawa T., Kato E., Yoshida K., Imoto Y., Sakashita M. et al. (2021). Involvement of activation of mast cells via IgE signaling and epithelial cell-derived cytokines in the pathogenesis of pollen food allergy syndrome in a murine model. *Journal of Immunology*, 206(12), 2791–2802. https://doi.org/10.4049/jimmunol.2000518
31. Liang, J., Taylor, S. L., Baumert, J., Lopata, A. L., Lee, N. A. (2021). Effects of thermal treatment on the immunoreactivity and quantification of parvalbumin from Southern hemisphere fish species with two anti-parvalbumin antibodies. *Food Control*, 121, Article 107675. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107675
32. Xepapadaki, P., Christopoulou, G., Stavroulakis, G., Freidl, R., Linhart, B., Zuidmeer, L. et al. (2021). Natural history of IgE-mediated fish allergy in children. *Journal of Allergy Clinical Immunology: In Practice*, 9, 3147–3156. https://doi.org/10.1016/j.jaip.2021.04.007
33. Huby, R. D., Dearman, R. J., Kimber, I. (2000). Why are some proteins allergens? *Toxicological Sciences*, 55(2), 235–246. https://doi.org/10.1093/toxsci/55.2.235
34. Campana, R., Dzoro, S., Mittermann, I., Fedenko, E., Elisyutina, O., Khaitov, M. et al. (2017). Molecular aspects of allergens in atopic dermatitis. *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology,* 17(4), 269–277. https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000378
35. Suarez-Farinas M., Suprun M., Bahnson H. T, Raghunathan R., Getts R., duToit G. et al. (2021). Evolution of epitope-specific IgE and IgG4 antibodies in children enrolled in the LEAP trial. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 148(3), 835–842. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2021.01.030
36. Dall'antonia, F., Pavkov-Keller, T., Zangger, K., Keller, W. (2014). Structure of allergens and structure based epitope predictions. *Methods,* 66(1), 3–21. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2013.07.024
37. Mabelane T., Basera W., Botha M., Thomas H. F., Ramjith J., Levin M. E. (2018). Predictive values of alpha-gal IgE levels and alpha-gal IgE: Total IgE ratio and oral food challenge-proven meat allergy in a population with a high prevalence of reported red meat allergy. *Pediatric Allergy and Immunology*, 29(8), 841–849. https://doi.org/10.1111/pai.12969
38. Ferraro, V., Zanconato, S., Carraro, S. (2019). Timing of food introduction and the risk of food allergy. *Nutrients*, 11(5), Article 1131. https://doi.org/10.3390/nu11051131
39. Hungerford, J. M. (2021). Histamine and scombrotoxins. *Toxicon*, 201, 115–126. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2021.08.013
40. Aibinu, I. E., Smooker, P. M., Lopata, A. L. (2019). *Anisakis* Nematodes in Fish and Shellfish- from infection to allergies. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 9, 384–393. https://doi.org/10.1016/j.ijppaw.2019.04.007
41. Morozińska-Gogol, J. (2019). *Anisakis* spp. as etiological agent of zoonotic disease and allergy in European region — an overview. *Annals of Parasitology*, 65(4), 303–314. https://doi.org/10.17420/ap6504.214
42. Rama T. A., Silva D. (2022). Anisakis allergy: Raising awareness. *Acta Medica Portuguesa*, 5(7–8), 578–583. https://doi.org/10.20344/amp.15908
43. Kuehn, A., Swoboda, I., Arumugam, K., Hilger, C., Hentges, F. (2014). Fish allergens at a glance: Variable allergenicity or parvalbumin, the major fish allergens. *Frontiers in Immunology*, 22(5), Article 179. https://doi.org/10.3389/fimmu.2014.00179
44. Perez-Gordo, M., Sanchez-Garcia, S., Cases, B., Pastor, C., Vivanco, F., Cuesta-Herranz, J. (2008). Identification of vitellogenin as an allergen in Beluga caviar allergy. *Allergy*, 63, 479–480. https://doi.org/10.1111/j.1398–9995.2007.01614.x
45. Liu, R., Holck, A. L., Yang, E., Liu, C., Cue, W. (2013). Tropomyosin from tilapia (Oreochromis mossambicus) as an allergen. *Clinical and Experimental Allergy*, 43(3), 365–377. https://doi.org/10.1111/cea.12056
46. Perez-Gordo, M., Cuesta-Herranz, J., Maroto, A. S., Cases, B., Ibáñez, M. D., Vivanco, F. et al. (2011). Identification of sole parvalbumin as a major allergen: Study of cross reactivity between parvalbumins in a Spanish fish-allergic population. *Clinical and Experimental Allergy*, 41, 750–758. https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2011.03721.x
47. Helbling, A., Heydet, R., McCants, M. L., Musmand, J. J., El-Dahr, J., Lehrer, S. G. (1999). Fish allergy: Is cross-reactivity among fish species relevant? Double-blind placebo-controlled food challenge studies or fish-allergic patients. *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, 83, 517–523. https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)62862-1
48. Sten, E., Hansen, T. K., Stahl Skov, P., Andersen, S. B., Torp, A., Bindslev-Jensen, U. et al. (2004). Cross-reactivity to eel, eelpout and ocean pout in cod-fish-allergic patients, *Allergy*, 59, 1173–1180. https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2004.00497.x
49. Luo, C., Guo, Y., Li, Z., Ahmed, I., Pramod, S. N., Gao, X. et al. (2020). Lipid emulsion enhances fish allergen parvalbumin's resistance to in vitro digestion and IgG/IgE binding capacity. *Food Chemistry*, 302, Article 125333. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125333
50. Grabenhenrich, L., Trendelenburg, V., Bellach, J., Yürek, S., Reich, A., Fiandor, A. et al. (2020). Frequency of food allergy in school-aged children in eight European countries-The EuroPrevall-iFAAM birth cohort. *Allergy*, 75(9), 2294–2308. https://doi.org/10.1111/all.14290
51. Kobayashi, Y., Yang, T., Yu, C. T., Ume, C., Kubota, H., Shimakura, K. et al. (2016). Quantification of major allergen parvalbumin in 22 species of fish by SDS — PAGE. *Food Chemistry,* 194, 345–353. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.037
52. André, F., Cavagna, S., André, C. (2003). Gelatin prepared from tuna skin: A risk factor for fish allergy or sensitization? *International Archives of Allergy and Immunology,* 130, 17–24. https://doi.org/10.1159/000068370
53. Kondo, Y., Komatsubara, R., Nakajima, Y., Yasuda, T., Kakami, M., Tsuge, I. et al. (2006). Parvalbumin is not responsible for crossreactivity between tuna and marlin: A case report. *Journal of Allergy and Clinical Immunology,* 118(6), 1382–1383. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2006.07.047
54. Ruethers, T., Taki, A. C., Karnaneedi, S., Nie, S., Kalic, T., Dai, D. et al. (2021). Expanding the allergen repertoire of salmon and catfish. *Allergy*, 76(5), 1443–1453. https://doi.org/10.1111/all.14574
55. Kuehn, A., Hilger, C., Lehners-Weber, C., Codreanu-Morel, F., Morisset, M., Metz-Favre, C. et al. (2013). Identification of enolases and aldolases as important fish allergens in cod, salmon and tuna: Component resolved diagnosis using parvalbumin and the new allergens. *Clinical and Experimental Allergy,* 43(7), 811–822. https://doi.org/10.1111/cea.12117
56. Pascal, M., Grishina, G., Yang, A. C., Sánchez-García, S., Lin, J., Towle, D. et al. (2015). Molecular diagnosis of shrimp allergy: Efficiency of several allergens to predict clinical reactivity. *Journal of Allergy Clinical Immunology: In Practice*, 3(4), 521–529.e10. https://doi.org/10.1016/j.jaip.2015.02.001
57. Pérez-Tavarez, R., Carrera, M., Pedrosa, M., Quirce, S., Rodríguez-Pérez, R., Gasset, M. (2019). Reconstruction of fish allergenicity from the content and structural traits of the component b-parvalbumin isoforms. *Scientific Reports*. 9(1), Article 16298. https://doi.org/10.1038/s41598-019-52801-6
58. Matricardi, P. M., Kleine-Tebbe, J., Hoffmann, H. J., Valenta, R., Hilger, C., Hofmaier, S. et al. (2016). EAACI Molecular Allergology User's Guide. *Pediatric Allergy and Immunology*, 27 (Suppl 23), 1–250. https://doi.org/10.1111/pai.12563
59. Wong, L., Tham, E. H., Lee, B. W. (2019). An update on shellfish allergy. *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology*, 19(3), 236–242. https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000532
60. Le, T. T. K., Tran, T. T. B., Ho, H. T. M., Vu, A. T. L., McBryde, E., Lopata, A. L. (2020). The predominance of seafood allergy in Vietnamese adults: Results from the first population-based questionnaire survey. *World Allergy Organization Journal*, 13(3), Article 100102. https://doi.org/10.1016/j.waojou.2020.100102
61. Liu, M., Huan, F., Li, M., Han, T., Xia, F., Yang, Y. et al. (2021). Mapping and IgE-binding capacity analysis of heat/digested stable epitopes of mud crab allergens. *Food Chemistry*, 344, Article 128735. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128735
62. Kamath, S. D., Scheiblhofer, S., Johnson, C. M., Machado, Y., McLean, T., Taki, A. C. et al. (2020). Effect of structural stability on endolysosomal degradation and T-cell reactivity of major shrimp allergen tropomyosin. *Allergy*, 75, 2909–2919. https://doi.org/10.1111/all.14410
63. FAO (2007). Future prospects for fish and fishery products 4. Fish consumption in the European Union in 2015 and 2030 Part 1. European overview. FAO Fisheries Circular No. 972/4, Part 1. Rome, 2007
64. Warren, C., Lei, D., Sicherer, S., Schleimer, R., Gupta, R. (2021). Prevalence and characteristics of peanut allergy in US adults. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 147(6), 2263–2270.e5. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2020.11.046
65. Баймакова, Е. А. (2022). Клинический случай аллергии на морепродукты у младенцев. *Аллерголгия и иммунология в педиатрии*, 2, 30–32. [Baimakova, E. A. (2022). A case of infant seafood allergy. *Allergology and Immunology in Pediatrics*, 2, 30–32. (In Russian)] https://doi.org/10.53529/2500-1175-2022-2-30-32
66. Yamaguchi, C., Ebara, T., Hosokawa, R., Futamura, M., Ohya, Y., Asano, M. (2019). Factors determining parenting stress in mothers of children with atopic dermatitis. *Allergology International*, 68(2), 185–190. https://doi.org/10.1016/j.alit.2018.08.006
67. Jhamnani, R. D., Levin, S., Rasooly, M., Stone, K. D., Milner, J. D., Nelson, C. et al. (2018). Impact of food allergy on the growth of children with moderate severe atopic dermatitis. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 141, 1526–1529.e4. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2017.11.056
68. Kuehn, A., Hilger, C., Hentges, F. (2009). Anaphylaxis provoked by ingestion or marshmallows containing fish gelatin. *Journal of Allergy and Clinical Immunology,* 123(3), 708–709. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2008.12.012
69. Ueno, R., Takaoka, Y., Shimojo, N., Ohno, F., Yamaguchi, T., Matsunaga, K. et al. (2020). A case of pediatric anaphylaxis caused by gummy tablets containing fish collagen. *Asia Paificc Allergy*, 10(4), Article e35. https://doi.org/10.5415/apallergy.2020.10.e35
70. Warren, C. M, Jiang, J., Gupta, R. S. (2020). Epidemiology and burden of food allergy. *Current Allergy Asthma Reports*, 20(2), Article 6. https://doi.org/10.1007/s11882-020-0898-7
71. Goodman, M., Pechère, J.-F., Haiech, J., Demaille, J. G. (1979). Evolutionary diversification of structure and function in the family of intracellular calcium-binding proteins. *Journal of Molecular Evolution,* 13(4), 331–352. https://doi.org/10.1007/BF01731373
72. Woods, R. K., Abramson, M., Bailey, M., Walters, E. H. (2001). International prevalences of reported food allergies and intolerances. Comparisons arising from the European Community Respiratory Health Survey (ECRHS) 1991–1994. *European Journal of Clinical Nutrition*, 55, 298–304. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601159
73. Durham, S. R., Shamji, M. H. (2023). Allergen immunotherapy: Past, present and future. *Nature Reviews Immunology,* 23(5), 317–328. https://doi.org/10.1038/s41577-022-00786-1
74. Fogg, M. I., Spergel, J. M. (2003). Management of food allergies. *Expert Opinion on Pharmacotherapy*, 4 (7), 1025–1037. https://doi.org/10.1517/14656566.4.7.1025
75. Plotkin, S. A. (2005). Vaccines: Past, present and future. *Nature Medicine*, 11(4 Suppl), S5–S11. https://doi.org/10.1038/nm1209
76. Schmiechen, Z. C., Weissler, K. A., Frischmeyer-Guerrerio, P. A. (2019). Recent developments in understanding the mechanisms of food allergy. *Current Opinion in Pediatrics*, 31(6), 807–814. https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000806

77. Valenta, R., Campana, R., Niederberger, V. (2017). Recombinant allergy vaccines based on allergen-derived B cell epitopes. *Immunology Letters*, 189, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.imlet.2017.04.015
78. Yu, W., Freeland, D. M. H., Nadeau, K. C. (2016). Food allergy: Immune mechanisms, diagnosis and immunotherapy. *Nature Reviews Immunology,* 16(12), 751–765. https://doi.org/10.1038/nri.2016.111
79. Davis, C. M., Gupta, R. S., Aktas, O. N., Diaz, V., Kamath, S. D., Lopata, A. L. (2020). Clinical management of seafood allergy. *The Journal of Allergy Clinical Immunology: In Practice*, 8(1), 37–44. https://doi.org/10.1016/j.jaip.2019.10.019
80. Wei, G., Helmerhorst, E. J., Darwish, G., Blumenkranz, G., Schuppan, D. (2020). Gluten degrading enzymes for treatment of celiac disease. *Nutrients*, 12(7), Article 2095. https://doi.org/10.3390/nu12072095
81. Kalic, T., Kamath, S. D., Ruethers, T., Taki, A. C., Nugraha, R., Le, T. T. K. et al. (2020). Collagenan important fish allergen for improved diagnosis. *Journal of Allergy Clinical Immunology: In Practice*, 8(9), 3084–3092.e10. https://doi.org/10.1016/j.jaip.2020.04.063
82. Klueber, J., Schrama, D., Rodrigues, P., Dickel, H., Kuehn, A. (2019). Fish allergy management: From component-resolved diagnosis to unmet diagnostic needs. *Current Treatment Options in Allergy*, 6(4), 322–337. https://doi.org/10.1007/s40521-019-00235-w
83. Rad, L. M., Arellano, G., Podojil, J. R., O'Konek, J. J., Shea, L. D., Miller, S. D. (2024). Engineering nanoparticle therapeutics for food allergy. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 153(3), 549–559. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2023.10.013

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Царин Сергей Анатольевич — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, руководитель НОЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана», Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2 Тел.: +7–978–768–05–34 E-mail: tsarin@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3333-507X * автор для контактов	**Sergey A. Tsarin**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Head of the Scientific and Educational Center for Collective Use "Collection of hydrobionts of the World Ocean", A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS 2, Nakhimov ave., Sevastopol, 299011, Russia Tel.: +7–978–768–05–34 E-mail: tsarin@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3333-507X * corresponding author
Столярчук Никита Максимович — школьник, Центр дополнительного образования «Малая Академия наук» 299055, Севастополь, пр. Генерала Острякова, 163 Тел.: +7–978–629–73–02 E-mail: 100ms@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0003-1168-6204	**Nikita M. Stolyarchuk**, Schoolboy, Center for Additional Education «Minor Academy of Sciences». 163, General Ostryakov ave., Sevastopol, 299055, Russia Tel.: +7–978–629–73–02 E-mail: 100ms@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0003-1168-6204
Кузнецов Андрей Вениаминович — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, отдел аквакультуры и морской фармакологии, Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБЮМ) 299011, Севастополь, пр. Нахимова, 2 Профессор, Кафедра физики, Севастопольский государственный университет 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33 Тел.: +7–978–744–36–10 E-mail: tsarin@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0015-7994	**Andrew V. Kuznetsov**, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Department of Aquaculture and Marine Pharmacology, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (IBSS) 2, Nakhimov ave., Sevastopol, 299011, Russia Professor, Department of Physics, Sevastopol State University 33, Universitetskaya street, 299053, Sevastopol, Russia Tel.: +7–978–744–36–10 E-mail: andrei_kouznetsov@hotmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0015-7994

Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-410-419

Поступила 19.08.2024
Поступила после рецензирования 12.09.2024
Принята в печать 16.09.2024
© Сорокина Н. П., Кучеренко И. В., Бруцкая А. Л., 2024

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

ЛАКТОБАЦИЛЛЫ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КУЛЬТУРЫ В СЫРОДЕЛИИ

Сорокина Н. П.*, Кучеренко И. В., Бруцкая А. Л.

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
сыр, лактобациллы, таксономия, бактериальные закваски, дополнительные культуры, пробиотики

АННОТАЦИЯ

Выработка сыров из термически обработанного молока в промышленных масштабах невозможна без использования коммерческих бактериальных заквасок, включающих ограниченное количество видов и штаммов микроорганизмов. Это приводит к тому, что сенсорные показатели сыров массового производства практически не различаются. Традиционные сыры из непастеризованного молока отличаются более выраженным и разнообразным вкусом. Научная литература описывает значительное таксономическое разнообразие микробиоты традиционных сыров, в том числе лактобацилл незаквасочного происхождения. Органолептические показатели и безопасность сыров напрямую зависят от состава этой микробиоты. В данной работе рассмотрены основные моменты таксономической реформы лактобацилл, в результате которой объединены два семейства *Lactobacillaceae* и *Leuconostocaceae,* а род лактобацилл разделен на 25 родов. Приведено новое описание семейства и некоторых видов молочнокислых палочек, использующихся в закваске. Продемонстрирована сложная вариабельная автохтонная микробиота сыров и возможность за счет внесения отобранных автохтонных дополнительных культур стабилизировать ферментацию при изготовлении сыров из сырого молока и улучшать их качество без потери индивидуальности. При производстве сыров из пастеризованного молока эти культуры улучшают сенсорные показатели продукта и придают ему оригинальные вкусовые оттенки. В ряде работ показано, что пробиотические бактерии интенсивно развиваются и долго сохраняют жизнеспособность в сырах даже длительного созревания. Такие сыры могут быть носителями живых пробиотиков и их метаболитов, полезных для здоровья потребителей. В данном обзоре обобщены сведения о перспективных направлениях расширения видового спектра дополнительных культур для разработки отечественных заквасок для сыроделия. Учитывая, что микробиология сыроделия представляет собой весьма обширную и до конца не изученную область, обзор не претендует на исчерпывающий анализ всех существующих подходов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Проект № 075-15-2024-483).

Received 19.08.2024
Accepted in revised 12.09.2024
Accepted for publication 16.09.2024
© Sorokina N. P., Kucherenko I. V., Bruckaya A. L., 2024

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

LACTOBACILLI AS ADDITIONAL CULTURES IN CHEESE MAKING

Ninel P. Sorokina*, Irina V. Kucherenko, Anastasiya L. Bruckaya

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEY WORDS:
cheese, lactobacilli, taxonomy, bacterial starter cultures, additional cultures, probiotics

ABSTRACT

Production of cheeses from thermally processed milk at an industrial scale is impossible without using commercial bacterial starter cultures that include a limited number of species and strains of microorganisms. This leads to the fact that sensory indicators of mass-produced cheeses practically do not differ. Traditional cheeses from unpasteurized milk are distinguished by more pronounced and diverse tastes. Scientific literature describes the significant taxonomic variety of microbiota of traditional cheeses, including non-starter lactobacilli. Sensory indicators and safety of cheeses directly depend on the composition of this microbiota. This study examines the main moments of the taxonomic reform of lactobacilli, which resulted in union of two families *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae,* and division of the genus *Lactobacillus* into 25 genera. New description of the family and several species of lactobacilli used in starter cultures is given. The authors demonstrate the complex autochthonous microbiota of cheeses and a possibility of stabilization of fermentation upon cheese making from raw milk and improvement of their quality without losing individuality due to the introduction of selected autochthonous additional cultures. When cheeses are made from pasteurized milk, these cultures improve sensory characteristics of a product and impart the original flavor to them. Several studies show that probiotic bacteria intensively develop and maintain viability for a long time even in long-ripened cheeses. Such cheeses can be carriers of live probiotics and their metabolites that are beneficial for the consumer health. This review summarizes information about promising directions of extension of the species spectrum of additional cultures for creation of domestic starter cultures for cheese making. Taking into consideration that microbiology of cheese making is quite a wide field that is not fully studied, the review does not claim to be the comprehensive analysis of all existing approaches.

FUNDING: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for large scientific projects in priority areas of scientific and technological development (Grant No. 075-15-2024-483).

1. Введение

Сыр представляет собой сложный пищевой продукт, в котором непрерывно протекают микробиологические и биохимические процессы. При этом состав и активность микробиоты сыра зависят от технологических приемов, от режимов и от условий его производства.

Современное индустриальное изготовление сыров из термически обработанного молока базируется на использовании коммерческих бактериальных заквасок. Таксономический состав заквасок весьма ограничен и включает молочнокислые бактерии: лактококки, лейконостоки, термофильный стрептококк и лактобациллы. Заквасочные микроорганизмы играют первостепенную роль в преобразовании

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Сорокина, Н. П., Кучеренко, И. В., Бруцкая, А. Л.** (2024). Лактобациллы как дополнительные культуры в сыроделии. *Пищевые системы*, 7(3), 410–419. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-410-419

FOR CITATION: **Sorokina, N. P., Kucherenko, I. V., Bruckaya, A. L.** (2024). Lactobacilli as additional cultures in cheese making. *Food Systems,* 7(3), 410–419. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-410-419

молока в сыр за счет интенсивного метаболизма лактозы и продуцирования молочной кислоты, которое приводит к росту кислотности, обеспечивает контролируемый процесс ферментации, микробиологическую безопасность в результате ингибирования посторонней микрофлоры. Другим важным последствием жизнедеятельности молочнокислых бактерий в молоке и сырной массе является накопление различных протеолитических и липолитических ферментов, определяющих в совокупности с энзимами молока и молокосвертывающими препаратами направленность биохимических процессов созревания сыров [1].

Коммерческие закваски на чистых культурах обладают рядом преимуществ перед самопроизвольной ферментацией и использованием природных заквасок неопределенного состава. Их хорошо изученные и контролируемые свойства положительно сказываются на технологических, органолептических и диетологических характеристиках сыров [2]. В соответствии с техническим регламентом ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», в нашей стране пастеризация молока является обязательной технологической операцией при производстве молочных продуктов для реализации. В связи с этим сыры из термически необработанного молока не производятся, что исключает практику использования природных заквасок. В зарубежных странах многие виды традиционных сыров изготавливаются из сырого молока. Микробиологические процессы в таких сырах протекают под воздействием автохтонной микрофлоры, характерной для конкретных молочных ферм и сыроварен [3,4].

В то же время промышленное применение заквасок с определенным видовым и штаммовым составом приводит к определенной унифицированности органолептических показателей, делает различные виды сыров близкими по вкусу и аромату. Очевидно, это обусловлено снижением разнообразия сырной микробиоты, поскольку пастеризацию выдерживает весьма незначительная часть микроорганизмов сырого молока, а состав коммерческих заквасок четко регламентирован. Общепризнано, что сыры из непастеризованного молока отличаются более выраженным и разнообразным вкусом. Микробные ферменты вспомогательных культур принимают активное участие в протекании протеолиза и липолиза при созревании сыров. Поэтому в последние годы наблюдается тенденция к расширению разнообразия вторичных заквасок за счет новых видов и штаммов автохтонных микроорганизмов [5–9].

К началу 21 века сформировалось разделение бактериальных заквасок на две группы — основные (первичные) и дополнительные (вторичные, вспомогательные) закваски. Основные закваски обеспечивают интенсивное молочнокислое брожение, а дополнительные закваски выполняют целый ряд других функций, таких как ускорение созревания, формирование определенных органолептических характеристик, ингибирование развития посторонней технически вредной микрофлоры [2,10]. Молочная кислота — это нелетучее химическое соединение, практически не имеющее запаха, и ее прямой вклад в органолептику сыров ограничивается приданием продукту кислого вкуса в той или иной степени выраженности.

К основным закваскам относят заквасочные культуры, обеспечивающие активное сбраживание лактозы: в сыроделии это особенно важно на начальных стадиях выработки. Кислотообразующей микрофлорой являются лактококки, термофильный стрептококк и термофильные молочнокислые палочки [2]. Разные виды лактобацилл существенно отличаются по энергии кислотообразования. Термофильные палочки характеризуются высокой скоростью кислотообразования и являются необходимым компонентом для сыров с высокими температурами второго подогревания. Для группы сыров с низким температурным уровнем второго нагревания молочнокислые палочки не являются основной микрофлорой, а, как правило, используются в дополнение к лактококковым закваскам в виде моновидовых культур или в составе поливидовых консорциумов. В зависимости от свойств выделяют две основные группы вспомогательных заквасок: созревательные и защитные. Созревательные закваски направлены на регулирование протеолиза, на сокращение сроков созревания и на формирование специфических вкусоароматических характеристик сыра [11,12]. Защитные закваски, в свою очередь, ингибируют развитие нежелательной и патогенной микрофлоры [13–16].

Вторичная микрофлора сыров отличается от первичной большим разнообразием выполняемых ею функций и таксономией. В эту группу входят лактобациллы незаквасочного происхождения различных родов и видов, пропионовокислые бактерии, плесневые грибы, представители поверхностной микрофлоры — бревибактерии, дрожжи и стафилококки [2]. Нередко в сыроделии используются и пробиотические микроорганизмы, например, лактобациллы и бифидобактерии, которые также относят к дополнительным культурам [8,17].

Такое разделение заквасок весьма условно, поскольку представители микрофлоры основных заквасок обладают и другими технологически важными свойствами: они способны метаболизировать цитраты и лактозу с образованием диацетила и углекислого газа, обладают протеолитической и липолитической активностью, продуцируют антибиотические вещества, т. е. обеспечивают весь комплекс микробиологических и биохимических процессов в сырах. Многие виды сыров высокого качества возможно выработать и без дополнительных культур. В то же время обязательным компонентом микробиоты отдельных видов сыров являются пропионовокислые бактерии, формирующие их идентификационные показатели — рисунок и специфический вкус и аромат [2,18,19]. Следовательно, пропионовокислые бактерии в таких сырах являются основными наряду с активными кислотообразователями. Также широко используются поливидовые закваски, включающие кислотообразующие лактококки, термофильный стрептококк, цитратсбраживающие лактококки, лейконостоки, молочнокислые палочки [20]. Такие комплексные закваски невозможно строго отнести к основным или дополнительным.

На наш взгляд, понятия «основные» и «дополнительные» (или «первичные» и «вторичные») в большей мере определяют группы микробиоты сыра по характеру их развития и по роли в формировании сыра как продукта, нежели типы заквасок. Для заквасок более приемлемы другие классификации: по числу видов микроорганизмов, по температурному оптимуму заквасочных бактерий, по физической форме и т. д.

В настоящее время ассортимент отечественных дополнительных заквасок остается немногочисленным. На нашем российском рынке представлены закваски различных зарубежных компаний. Учитывая стремительное увеличение ассортимента сыров, выпускаемых в нашей стране, представляется актуальным расширение видового разнообразия заквасочной микрофлоры за счет скрининга новых культур молочнокислых палочек, перспективных для сыроделия, в т. ч. с целью импортозамещения.

2. Материалы и методы

Объектами изучения являлись нормативные и технические документы, научные публикации российских и зарубежных авторов, посвященные видовому составу микрофлоры сыров, типу бактериальных заквасок, современной таксономии и номенклатуре лактобацилл и их роли в сыроделии с целью расширения видового спектра отечественных дополнительных заквасок для сыров. Поиск осуществлялся на платформах eLibrary.ru, Scopus, PubMed, ResearchGate и в открытых интернет-источниках. Был проведен поиск публикаций с использованием нескольких ключевых слов: сыр, лактобациллы, молочнокислые палочки, таксономия, идентификация, бактериальные закваски, дополнительные культуры, пробиотики. Из найденных публикаций исключили источники, не содержащие полные тексты статей.

Основные проанализированные публикации (более 70%) охватывали временной интервал с 2016 по 2024 годы, но были использованы и более ранние источники для оценки значимости и эволюции вопроса применения лактобацилл в сыроделии.

3. Таксономия и основные свойства лактобацилл

Для производства ферментированных пищевых продуктов, в т. ч. сыров, используют молочнокислые палочки семейства *Lactobacillaceae* Winslow et al. 1917, которое в соответствии с «Определителем бактерий Берги» (1997 г.) входило в группу «Грамположительные неспорообразующие палочки правильной формы». Вплоть до 2020 года молочнокислые палочки являлись представителями рода *Lactobacillus*, который подразделялся по характеру метаболизма углеводов на два таксона: гомоферментативные палочки (17 видов и разновидностей) и гетероферментативные палочки (11 видов); исходя из температурных интервалов роста лактобациллы подразделялись на мезофильные и термофильные.

Представители рода *Lactobacillus* — это грамположительные, неспорообразующие палочки правильной формы с высокой ферментативной активностью, в результате которой продуцируется молочная кислота. В зависимости от способа сбраживания глюкозы (лактозы) молочнокислые палочки подразделялись на 3 подгруппы:

1. Строго-гомоферментативные лактобациллы подрода *Thermobacterium*, включающего 19 видов и подвидов;
2. Факультативно-гетероферментативные лактобациллы подрода *Streptobacterium*, к которому относятся 16 видов и подвидов;
3. Строго-гетероферментативные лактобациллы подрода *Betabacterium*, включающего 18 видов и подвидов.

Современная иерархическая структура лактобацилл представлена следующими таксономическими категориями: отдел — *Firmicutes* (Прокариоты); класс — *Bacilli* (Бациллы); порядок — *Lactobacillales*; семейство — *Lactobacillaceae.*

Одна из первых классификаций лактобацилл — фенотипическая классификация Orla-Jensen, сформированная в 1919 году и основанная на определении температурного диапазона роста, спектра сбраживаемых углеводов и продуктов их метаболизма. В ней не учитываются филогенетические связи между молочнокислыми бактериями [21], однако термины «мезофильные молочнокислые палочки» (стрептобактерии) и «термофильные молочнокислые палочки» (термобактерии) до сих пор используются в технической микробиологии. Они обозначают бактерии с оптимальной температурой роста и развития 30 °C и 40 °C соответственно [22].

До разработки молекулярно-генетических методов исследований микроорганизмов их идентификация проводилась по культуральным, морфологическим и физиолого-биохимическим свойствам. Современный подход к определению таксономического положения микроорганизмов основывается на идентичности нуклеотидной последовательности ДНК. Начиная с 1983 г. сходство нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК используется в бактериальной таксономии для создания филогенетических схем в качестве основы для классификации и номенклатуры [22]. В течение последних десятилетий полногеномное секвенирование стало более доступным, а средние значения нуклеотидной идентичности (ANI) генов, общие для двух сравниваемых геномов микроорганизмов, признаны золотым стандартом для описания новых видов.

По данным автора Ботиной и др. [23], при комплексном исследовании 13 производственных штаммов пробиотических лактобацилл из коллекции МНИИЭМ им. Габричевского, ранее идентифицированных по фенотипическим признакам, видовое положение 9 культур было изменено по результатам сравнения последовательностей 16S рРНК: 4 штамма *L. acidophilus* отнесены к виду *L. helveticus*, 1 штамм *L. acidophilus* — к виду *L. casei*, 1 штамм *L. fermentum* — к виду *L. plantarum*, 1 штамм *L. brevis* — к виду *L. casei,* 1 штамм *L. plantarum* — к виду *L. rhamnosus* и 1 штамм *L. delbruekii* к виду *L. fermentum*.

За последние 40 лет число видов рода *Lactobacillus* значительно увеличилось: с 35, числившихся в утвержденных списках прокариот 1980 года [24], до 261 к 2020 году [25]. Такой рост обусловлен систематическим выделением и описанием новых видов благодаря применению современных методов генетической идентификации. В результате род *Lactobacillus* стал чрезвычайно гетерогенным. Отдельные виды входили в группы, которые не соответствовали их метаболизму, среде обитания и строению генома. Опубликованные в 2018 году Salvetti с соавторами результаты полногеномного секвенирования 269 видов бактерий из семейств *Lactobacillaceae* и *Leuconostocaceae* доказали наличие весомых разногласий в филогении и классификации этих видов и необходимость их устранения [26]. Разработанные технологии секвенирования, биоинформационного анализа и применение полифазного подхода позволили создать в 2020 г. новую, более надежную классификацию лактобацилл, которую считают глобальной таксономической реформой [27]. Впервые в истории микробиологии объединили два семейства *Lactobacillaceae* и *Leuconostocaceae,* а род *Lactobacilus* реклассифицировали на 25 новых родов.

Кроме этого, внесены коррективы в дифференциацию лактобацилл по способу метаболизма 6-атомных углеводов. Упразднена подгруппа «факультативно-гетероферментативных» лактобацилл, к которой относили виды, метаболизирующие гексозы гомоферментативно, а пентозы гетероферментативно. Сохранены 2 группы: гомоферментативные, сбраживающие гексозы путем Эмбдена-Мейерхоффа (гликолиз) с образованием пирувата как промежуточного метаболита, и гетероферментативные, сбраживающие гексозы через окислительный фосфокетолазный путь с образованием промежуточных метаболитов — пирувата и ацетилфосфата в качестве ключевых промежуточных продуктов [26]. Это изменение обусловлено тем, что сбраживание пентоз является непостоянным признаком не только на уровне штаммов, но и на уровне видов [27].

Представляется целесообразным привести в данной статье новое описание семейства *Lactobacillaceae*, а также тех видов молочнокислых палочек, которые наиболее часто используются в сыроделии.

4. Новое описание семейства *Lactobacillaceae* [27]

После внесенных обширных изменений объединенное семейство включает все без исключения роды, ранее входившие в оба семейства *Lactobacillaceae* Winslow et al. 1917 (утвержденные списки 1980) и *Leuconostocaceae* Schleifer 2010 [27].

Лактобациллы окрашиваются по Граму положительно, не способны к спорообразованию, по отношению к кислороду являются факультативными или строгими анаэробами. Форма клеток кокковидная или палочковидная, могут формировать пары, цепочки или тетрады (педиококки). Конечный продукт метаболизма — лактат, но лактобациллы могут образовывать ацетат, формиат или сукцинат, этанол, углекислый газ. Имеют сложные трофические потребности, нуждаются в аминокислотах, пептидах, производных нуклеиновых кислот, витаминах, солях жирных кислот. Примечательно, что среди многочисленных семейств в порядке *Lactobacillales* только *Lactobacillaceae* содержит и гомоферментативные и гетероферментативные бактерии. Типовой род: *Lactobacillus* Beijerinck 1901.

Для всех видов в [27] приведены номера типовых штаммов, депонированных и хранящихся в коллекциях микроорганизмов разных стран (в том числе типовые штаммы нескольких видов хранятся во Всероссийской коллекции микроорганизмов ВКМ), идентификационные номера последовательности генома и идентификационные номера гена 16S рРНК.

4.1. Гомоферментативные виды семейства Lactobacillaceae

4.1.1. Исправленное описание рода Lactobacillus

Современный род *Lactobacillus* включает виды бактерий, ранее входившие в группу *L. delbrueckii*. Все виды адаптированы к позвоночным хозяевам, за исключением *Lactobacillus melliventris,* который приспособлен к пчелам. Эти бактерии утилизируют довольно большое число углеводов, при этом способность к ферментации фруктанов, крахмала или гликогена варьируется в зависимости от штамма. Многие виды ферментируют маннит. Способность сбраживать лактозу палочками вида *L. delbrueckii* объясняет его присутствие в йогуртах и сырах [27]. Бактерии рода *Lactobacillus* присутствуют в различных средах обитания, в т. ч. в ферментированных молочных и зерновых продуктах, входят в состав заквасочной микробиоты многих кисломолочных продуктов.

Ниже приведены краткие описания важных для сыроделия родов и видов и их свойств.

4.1.2. Исправленное описание рода Lactobacillus delbrueckii

Род *Lactobacillus delbrueckii* (*Bacillus delbrücki*) (назван по имени немецкого бактериолога M. Delbrück) является типовым видом рода *Lactobacillus*. Из-за высокого фенотипического и генотипического сходства между *L. delbrueckii, L. leichmannii, L. lactis* и *L. bulgaricus* обособленным видом является только *L. delbrueckii,* а остальные классифицируются как подвиды, причем *L. lactis* и вид *L. leichmannii* объединены в один вид — *L. delbrueckii* subsp. *lactis*. Характерной особенностью является то, что все штаммы сбраживают лактозу до D(−) — молочной кислоты.

4.1.3. Вид Lactobacillus delbrueckii subsp. *bulgaricus*

Раньше имел наименование *L. bulgaricus* (болгарская палочка).

L. delbrueckii subsp. *bulgaricus* сбраживает лактозу, фруктозу, маннозу, не метаболизирует сахарозу. Он подвергся сокращению генома, что, в частности, связано с потерей или глушением генов, кодирующих метаболизм углеводов. Размер генома составляет 1,76 Mbp, а содержание G±C в ДНК составляет 49,9 мол. *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* выделен из йогурта и сыра, являясь важной составляющей заквасочных культур при производстве этих продуктов. Также данный подвид обнаружен в составе микробиоты кишечника поросят.

Типовой штамм ATCC 11842^T=CCUG 41390^T и др., в том числе хранящийся во Всероссийской коллекции микроорганизмов ВКМ B-1923^T.

4.1.4. Вид Lactobacillus delbrueckii subsp. *lactis*

Вид получил свое название в связи с происхождением из молока. Сбраживает сахарозу, фруктозу, маннозу, мальтозу, трегалозу. Размер генома –1,87 Mbp, содержание G±C — 49,9 мол.%. Выделен из молока, сыров, прессованных дрожжей и зерна.

4.1.5. Вид Lactobacillus acidophilus

Название вида образовано от греческих слов, обозначающих «молоко», «палочка» и «любящий кислоту». *L. acidophilus* продуцирует DL-молочную кислоту из целлобиозы, галактозы, лактозы, мальтозы, маннозы, сахарозы и трегалозы, но не из маннита. Ряд штаммов относится к пробиотикам. Размер генома составляет 1,95 Mbp, а содержание G±C в ДНК — 34,6 мол.%. *L. acidophilus* заселяет кишечный тракт человека и животных, ротовую полость человека, выделяется из заквасок и вина.

4.1.6. Вид Lactobacillus helveticus

Название получил из-за получения типового штамма из швейцарского сыра. Сбраживает галактозу, глюкозу, маннозу, лактозу и трегалозу с образованием DL-молочной кислоты. Не способен ферментировать маннит, целлобиозу, сахарозу и рафинозу. *L. helveticus*

является синонимом *Lactobacillus suntoryeus.* Размер генома типового штамма составляет 1,83 Mbp, а содержание G±C в ДНК составляет 36,8 мол.%. Является компонентом микробиома курицы, но также был выделен из кислого молока, заквасок и сыров, в частности сыров Эмменталь и Грюйер, а также из томатного жмыха и силоса.

Далее приведена информация о новых родах, выделенных из рода *Lactobacillus*.

4.1.7. Описание нового рода Lacticaseibacillus gen. nov.

Род Lacticaseibacillus (молочная палочка из группы *Lactobacillus casei*).

Штаммы *Lacticaseibacillus,* ранее считавшиеся факультативно-гетероферментативными, ныне являются гомоферментативными; но некоторые виды ферментируют пентозы. Содержание G±C в ДНК — от 46 до 58,0 мол.%, размер генома — от 1,93 до 3,14 Мбит/с. Способны продуцировать L(+) и D(–)-молочную кислоту. Температурный диапазон роста у разных видов от 10 °C до 45 °C. Один подвид способен выдерживать прогревание при температуре 70 °C в течение 40 секунд. Несколько видов этого рода входят в состав заквасок для молочных продуктов, а отдельные штаммы являются пробиотиками.

Типовой вид — *Lacticaseibacillus casei* nov.; ранее упоминался как группа *Lacticaseibacillus casei.*

4.1.6. Вид Lacticaseibacillus casei comb. nov.

Видовое название происходит от латинского слова «caseus», что означает «сыр». Basonym: *Lactobacillus casei* (Orla Jensen, 1916, Hansen and Lessel, 1971, 71), (*Streptobacterium casei*, Orla-Jensen, 1919, 166) [24]. В него вошли и штаммы, ранее считавшиеся *Lactobacillus zeae*. В отличие от других молочнокислых палочек, *Lactobacillus casei* имеет каталазную активность. Размер генома типового штамма составляет 2,83 Mbp. Содержание G±C в ДНК составляет 46,5 мол.%. Изоляты были получены из разных источников, в том числе из пищевых продуктов (традиционный китайский рассол, кукурузный ликер, овсяный силос, коммерческие пищевые добавки), а также из биологических образцов (детские фекалии, мокрота, носоглотка). Информация об образе жизни *Lactobacillus casei* за последние десятилетия характеризуется нечеткой таксономией; вместо этого большинство геномов, обозначенных как *L. casei* в базе данных NCBI, следует классифицировать как *L. paracasei*.

4.1.7. Вид Lacticaseibacillus paracasei nov.

Lacticaseibacillus paracasei (*Paracasei*, напоминающий *L. casei*). Basonym: *Lactobacillus paracasei* Collins et al. 1989, 107 ^{VP}

Штаммы этого вида раньше назывались *L. casei* subsp. *alactosus*, а подвиды *L. casei* subsp. *pseudoplantarum* и *L. casei* subsp. *tolerans* были перенесены в этот вид из *L. casei*. Обладают супероксиддисмутазной активностью, представляют собой палочки, довольно часто имеющие квадратные концы, расположенные одиночно или в цепочках. Рост наблюдается между 10 °C и 40 °C. Некоторые штаммы растут при температуре 5 и 45 °C. Размер генома типового штамма составляет 2,88 Mbp. Содержание в ДНК G±C составляет 46,5 мол.%. Штаммы этого вида широко распространены в окружающей среде. Они были выделены из различных источников, включая ротовую полость человека, ферментированные злаки, овощи, мясо, молочные продукты и организм беспозвоночных.

Определены два подвида: *L. paracasei* subsp. *paracasei* и *L. paracasei* subsp. *tolerans.*

4.1.8. Вид Lacticaseibacillus rhamnosus comb. nov.

Видовое название *Lacticaseibacillus rhamnosus* указывает на способность этих бактерий сбраживать рамнозу. Basonym *Lactobacillus rhamnosus* (Hansen 1968, Collins et al. 1989, 108 ^{VP} (*Lactobacillus casei* subsp. *rhamnosus* Hansen 1968). Размер генома типового штамма составляет 2,95 Mbp. Содержание в ДНК G±C составляет 46,7 мол.%. Этот вид обнаружен в разнообразных экологических нишах, включая организм человека и беспозвоночных, а также такие среды обитания, как сточные воды и различные ферментированные продукты (молочные, рыбные, мясные, растительные).

4.1.9. Описание нового рода Lactiplantibacillus gen. nov.

Род *Lactiplantibacillus* (получен из молока, группа *Lactobacillus plantarum*).

Виды рода *Lactiplantibacillus* метаболизируют широкий круг сахаров, а многие виды способны трансформировать фенольные кислоты под действием ферментов эстеразы, декарбоксилазы и редуктазы. *Lactiplantibacillus plantarum* характеризуется псевдокаталазной активностью и способностью снижать содержание нитратов. Два подвида *L. plantarum* возможно различить только генетическими методами путем секвенирования генов cpn60 и recA. Содержание G±C в ДНК составляет от 42,9 и 48,7 мол.%.

Виды этого рода встречаются в различных ферментированных продуктах, в местах обитания насекомых, в кишечнике животных, т. е. отличаются кочевым поведением. Широко используются во многих пищевых ферментациях и в качестве пробиотических микроорганизмов.

Типовым видом является *Lactiplantibacillus plantarum* nov.

4.1.10. Вид Lactiplantibacillus plantarum nov.

Lactiplantibacillus plantarum (из растений). Basonym: *Lactobacillus plantarum* Bergey et al. 1923, 250 [24].

Ранее имел название *Streptobacterium plantarum*. Имеет клетки палочковидной формы, одиночные, парные или в коротких цепочках. Отдельные штаммы могут уменьшать концентрацию нитратов при дефиците глюкозы и pH 6,0 или выше. У некоторых штаммов имеется псевдокаталаза и даже истинная каталаза, но только в присутствии гема. Отличаются потребностью в пантотенате кальция и ниацине для роста и развития. Преобладает в микрофлоре самоквасных овощей, олив, при ферментации молока и мяса. Относится к возбудителям порчи вина и пива. Является также частью микробиоты насекомых и изолирован из микробиоты насекомых, кишечного тракта человека, в том числе из ротовой полости.

Распознаются два подвида: *L. plantarum* subsp. *plantarum* и *L. plantarum* subsp. *argentoratensis.*

4.2. Гетероферментативные виды Lactobacillaceae

4.2.1. Описание нового рода Lentilactobacillus gen. nov.

Lentilactobacillus (прилагательное «lentus» — «медленный, вялый»; ссылка на медленный рост видов рода с образованием лактата или пропандиола в качестве конечного продукта; медленно растущая лактобацилла).

Грамположительные палочки, каталазоотрицательные, гетероферментативные. У многих штаммов наблюдается рост при температуре 15 °C, некоторые растут при температуре 45 °C, диапазон активной кислотности варьирует, но оптимум обычно ниже уровня pH 6,0. Размер генома — от 1,57 Мбит до 4,91 Мбит, содержание G±C в ДНК — в пределах от 39,1 до 45,2 мол.%. *Lentilactobacillus* Получены из силоса, ферментированных овощей, испорченных вин и зерновых жмыхов. Как правило, штаммы этого вида не имеют четко определенных экологических ниш. Виды *Lentilactobacillus* сбраживают большой спектр пентоз, гексоз и дисахаридов. Большинство видов обладают свойством ферментировать лактаты в 1,2-пропандиол, а также 1,2-пропандиол в пропанол и пропионат; эти пути почти не встречаются у гетероферментативных лактобацилл и среди них наиболее распространены у лентилактобацилл. Большинство видов *Lentilactobacillus* также превращают агматин, продукт бактериального декарбоксилирования аргинина, по пути агматиндеиминазы; у лактобацилл этот путь связан со свободным образом жизни. Виды *Lentilactobacillus* используются в коммерческих целях в качестве закваски для силосования, а также в небольшом количестве в молочных и зерновых продуктах.

Типовой вид рода *Lentilactobacillus buchneri* comb. nov. Ранее *Lentilactobacillus* упоминался как группа *L. buchneri*.

4.2.2. Вид Lentilactobacillus buchneri nov.

Назван именем немецкого микробиолога Бюхнера. Basonym: *Lactobacillus buchneri* (Bacillus buchneri Henneberg 1903, 163) Bergey et al. 1923, 251 [24].

Биохимические характеристики были описаны как сходные с *L. brevis*, но он отличается в отношении продуцирования 1,2 пропандиола из лактата. Размер генома типового штамма составляет 2,45 Mbp. Содержание в ДНК G±C составляет 44,4 мол.%. Изолирован из прессованных дрожжей, молока, сыра, сброженного растительного материала и ротовой полости человека. Используется в промышленности в качестве закваски для силоса.

4.2.3. Описание нового рода Limosilactobacillus gen. nov.

Видовой эпитет «limosus», означающий «слизистый», отражает способность большинства штаммов данного рода синтезировать экзополисахариды из сахарозы, что и обуславливает название рода — *Limosilactobacillus* (слизистая лактобацилла).

Бактерии *Limosilactobacillus* имеют палочко- или кокковидную форму, являются анаэробными или аэротолерантными. Оптимальная температура роста для этих микроорганизмов составляет 37 °C. Многие виды способны расти при 45 °C, но не растут при 15 °C. Геномы маленького размера — от 1,6 до 2,25 Мбит. Содержание G±C — в диапазоне от 38,6,1 до 53,4 мол.%. Сбраживают широкий спектр углеводов, но некоторые виды не способны утилизировать глюкозу. Экспрессия уреазы, глутаминазы, глутаматдекарбоксилазы, а также наличие аргининдеиминазной активности обуславливают кислото-

устойчивость. Адаптированы к кишечнику позвоночных животных. *Limosilactobacillus reuteri* и другие виды образуют экзополисахариды из сахарозы. В естественной среде обитания виды *Limosilactobacillus* обычно сосуществуют в симбиозе с другими видами лактобацилл.

Типовой вид рода — *Limosilactobacillus fermentum* nov.; ранее род *Limosilactobacillus* упоминался как группа *Lactobacillus reuteri*.

4.2.4. Вид Limosilactobacillus fermentum nov.

Limosilactobacillus fermentum (означает «вызывающий ферментацию»). Basonym: *Lactobacillus fermentum* Beijerinck 1901, 233 [24]. К виду отнесены штаммы и *Lactobacillus cellobiosus*.

L. fermentum, в отличие от других видов этого рода, не адаптирован к кишечнику позвоночных животных. Размер генома типового штамма — 1,90 Mbp. Содержание G±C в ДНК — 52,4 мол.%. *L. fermentum* распространен в самопроизвольно ферментированных злаках и в других растительных субстратах, в молочных продуктах, в навозе, в сточных водах, а также в фекалиях человека [27].

Таким образом, из представленной информации следует, что используемые в сыроделии молочнокислые палочки, в соответствии с новой таксономией, находятся в разных родах и группах семейства *Lactobacillaceae*.

Зарубежные ученые считают, что долгосрочная неизменность новой номенклатуры чрезвычайно важна для обеспечения корректного включения новых выделяемых и идентифицируемых бактерий [25]. Столь значительное изменение таксономии и номенклатуры лактобацилл вносит определенные трудности и противоречия. Постоянная общепринятая номенклатура важна для четкой коммуникации между различными структурами. Таксономические изменения имеют значительные правовые и коммерческие последствия, влияя на различные сферы, включая патентное право, регулирование пищевых продуктов (состав, маркировка), международную торговлю (сертификация импорта и экспорта) и даже информирование потребителей. Реализация изменений номенклатуры лактобацилл может занять значительное количество времени. Так, в частности в нашей стране еще не внесены изменения в целый ряд нормативных документов и стандартов, касающиеся наименований молочнокислых палочек.

5. Роль лактобацилл в сыроделии

Довольно большую группу дополнительных культур составляют лактобациллы разных родов и видов, которые выпускаются в виде коммерческих заквасок и широко используются в промышленном сыроделии. Научный интерес к молочнокислым палочкам как к перспективным компонентам микробиоты сыров существенно возрос в последние два десятилетия у отечественных и иностранных исследователей.

Начало исследований микроорганизмов сыров, вырабатываемых из сырого молока, было положено в работах ученых Московской бактериолого-агрономической станции и Вологодской молочно-хозяйственной академии [29,30], в 1930-е годы исследования свойств молочнокислых палочек для ускорения созревания сыров продолжили специалисты ВНИМИ [31]. Целым рядом исследований с 1903 по 1938 г. было установлено присутствие мезофильных молочнокислых палочек *L. casei* в разных видах сыров, но на практике они не использовались, несмотря на явное ускорение созревания при добавлении этого микроорганизма. Рунов Е. В. в 1947 г. выдвинул идею о перспективности использования в качестве закваски обогащенных культур молочнокислых бактерий, полученных непосредственно из сыра, поскольку такие культуры наиболее полно отражают состав микрофлоры сыра [32]. Но этот способ не дал стабильных результатов из-за постепенного снижения количества молочнокислых палочек в процессе пересевов. Работы по изучению лактобацилл в 1960-е годы активизировались и проводились российскими и армянскими учеными [33–35]. До практического внедрения были доведены исследования Гудкова А. В. с соавторами [36], которые были направлены на создание антагонистической закваски для подавления развития маслянокислых бактерий в сырах. В 1971 г. производственная лаборатория заквасок ВНИИМС организовала серийный выпуск этой закваски. Таким образом, многолетние отечественные исследования лактобацилл привели к целому направлению в отечественном заквасочном деле — в разработке биологических методов борьбы с технически вредными микроорганизмами. В наше время такие закваски называются защитными.

До начала 21 века в отечественном сыроделии использовались бактериальные закваски с ограниченным числом видов молочнокислых палочек: мезофильные культуры *L. plantarum, L. casei*; термофильные культуры *L. helveticus, Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* и *Lactobacillus acidophilus*. В настоящее время видовое разнообразие лактобацилл существенно увеличилось за счет использования импортных дополнительных культур [11,12]. Обусловлено это существенным расширением ассортимента выпускаемых сыров, для изготовления которых необходимо использование более разнообразной микрофлоры [37,38].

5.1. Видовое разнообразие лактобацилл в сырах

Современные исследования микробиоты различных видов сыров свидетельствуют о присутствии молочнокислых палочек незаквасочного происхождения практически во всех изученных образцах не только сыров из сырого молока, но и в большинстве случаев в сырах из пастеризованного молока [7,39,40]. Это обусловлено тем, что мезофильные лактобациллы обладают довольно высокой термостойкостью, способны выдерживать нагрев до температуры 65 °С с выдержкой до 30 минут и даже кратковременную пастеризацию при 72–76 °С в течение 20 секунд, принятую в сыроделии [10,41]. Клетки этих микроорганизмов инактивируются, но в процессе выработки сыров восстанавливаются. В связи с тем, что при изготовлении сыров с низкотемпературным вторым нагреванием температура не превышает 42 °С, развитие мезофильных палочек не только не тормозится, но может и продолжаться, так как верхняя температурная граница их роста составляет 40–45 °С [26]. Так, в частности, при изучении развития штаммов *L. rhamnosus* установлено, что они способны расти как в температурном диапазоне от 15 °С до 45 °С, так и при снижении температуры до 8–11 °С; но 2 из 6 штаммов не развивались при температуре 52 °С, и все исследованные культуры не росли при температуре 58 °С [42]. Лактобациллы не прекращают своего развития и в процессе созревания сыров, поскольку температурный режим созревания большинства сыров (10–14) °С совпадает с их нижней границей роста.

Кроме молока источником лактобацилл в сырах может быть окружающая среда, с которой контактирует продукт — оборудование, инвентарь, трубопроводы, рассол, т. е. автохтонная микрофлора предприятия. Степень обсемененности сыров лактобациллами из этих источников зависит от многих факторов: от количества и от термостойкости культур, присутствующих в сыром молоке, от уровня санитарии и от гигиены на предприятии [10,43]. Бразильские ученые исследовали образцы молока на различных этапах цепи поставок: от охлажденного сырого молока на ферме до пастеризованного продукта. Было обнаружено, что популяция незаквасочных лактобацилл увеличивалась на всех этапах, даже после пастеризации. Так, в процессе транспортировки количество бактерий возросло на 1,5 порядка (с 2,1 log КОЕ/мл до 3,6 log КОЕ/мл), достигая 4,4 log КОЕ/мл в заводских танках хранения. Авторы предполагают, что сохранение высокой концентрации бактерий после термической обработки может быть обусловлено вторичной контаминацией из-за недостаточной гигиены оборудования или терморезистентностью микрофлоры сырого молока [44].

Незаквасочные молочнокислые палочки развиваются и в полутвердых, и в твердых сырах с высокой температурой второго нагревания. Так, в итальянском сыре Parmigiano Reggiano популяция незаквасочных лактобацилл в основном представлена *Lactobacillus paracasei, Lactobacillus rhamnosus и Pediococcus acidilactici*. Также на разных стадиях созревания были обнаружены *Lactobacillus helveticus, Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis* и *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Обзор Gatti и др. [45], обобщающий данные об элитных итальянских сырах, свидетельствует о преобладании в них мезофильных бактерий, в том числе *Lactobacillus rhamnosus, Lactobacillus casei, Lactobacillus paracasei, Lactobacillus harbinensis* и *Pediococcus acidilactici*. Авторы исследования изучали динамику развития незаквасочных молочнокислых бактерий из сырого молока и их влияние на характеристики сыров.

Однако разнообразие видов и штаммов незаквасочных молочнокислых палочек в сырах и их влияние на органолептические показатели сыров непредсказуемо. Но отобранные автохтонные культуры с изученными свойствами демонстрируют позитивное влияние на качество и безопасность сыров. В процессе производства опытных партий сыра Pecorino Crotonose применялись автохтонные мезофильные молочнокислые палочки *L. casei и L. plantarum*, предварительно выделенные из этого сыра, идентифицированные и отобранные по ферментативной активности. Использование таких культур положительно повлияло на общее качество сыра в сравнении с контрольными образцами, выработанными с применением коммерческой мезо-термофильной закваски. Сыры отличались по концентрации свободных аминокислот и некоторых летучих компонентов: 2-метил-1-пропанола, 2-метил-1-бутанола, изомасляной,

изовалериановой и изокапроновой кислот. Плотность популяции добавленных культур в сырах практически не изменялась в течение 120 дней созревания и находилась на уровне от 7,55 до 7,94 log КОЕ в 1 г [46].

Изучение влияния культуры *L. rhamnosus* на протеолиз в сыре Эдам [47] также подтвердило усиление протеолиза и пептидолиза в процессе созревания сыра, в котором уровень растворимых в трихлоруксусной кислоте азотистых соединений в общем азоте через 10 недель созревания был практически в 2 раза выше и составил 11,87% по сравнению с 6,24% в контрольном сыре без внесения этой дополнительной культуры.

В результате изучения технологически важных свойств аборигенных молочнокислых бактерий, выделенных из итальянских и бразильских сыров, были выбраны 3 штамма, идентифицированные как *L. lactis*, *L. delbrueckii* и *L. rhamnosus,* для включения в состав вспомогательных культур с учетом совокупности таких свойств, как солеустойчивость, низкой кислотообразующая и липолитическая активности, образованию диацетила и активности аминопептидазы. Высокая активность аминопептидазы N и X, обнаруженная у этих штаммов, способна улучшить органолептические показатели сыров, а синергетический эффект аминопептидаз N и X этих штаммов может привести к восстановлению горьких пептидов, образующихся при участии молокосвертывающих ферментов при выработке и созревании сыров [48]. Авторы планируют подтвердить выявленное в экспериментальных условиях улучшение качества сыров с использованием полученных штаммов в пилотном и промышленном масштабе.

В стремлении сохранить уникальные характеристики традиционного горного сыра (Mountain cheese) и избежать стандартизации органолептических свойств, привносимой коммерческими заквасками, авторы Carafa и др. [49] использовали автохтонные штаммы. В качестве основной закваски были выбраны *Lactococcus lactis* subsp. *lactis 68* и *Streptococcus thermophilus 93*, а в качестве дополнительной культуры — *Lacticaseibacillus rhamnosus BT68*. Эти штаммы были предварительно выделены из данного сыра и всесторонне исследованы, в том числе на предмет полезных для здоровья свойств. Традиционный горный сыр производится из сырого молока на небольших фермах (называемых Malga) в альпийских районах региона Трентино (Северо-Восточная Италия) без внесения коммерческих заквасок, процесс ферментации осуществляется микроорганизмами сырого молока и окружающей среды Malga. В связи с этим сыр отличается переменчивым составом микрофлоры, процесс изготовления вариабелен, и очень часто посторонние бактерии способствуют порче сыра, что приводит к экономическим убыткам. Авторы отмечают, что сыроделы хотели бы использовать коммерческие закваски, чтобы лучше контролировать процесс брожения, подчеркивая эффективность коммерческих заквасок с точки зрения обеспечения безопасности, но в то же время существует большой риск утраты уникальности Горного сыра и превращения его в стандартный продукт. Используемая комбинация автохтонных культур ускоряла молочнокислый процесс в течение первых суток, снижала содержание энтеробактерий по сравнению с контрольным сыром без добавленных культур, усиливала выработку конъюгированной линолевой кислоты и улучшала общую органолептическую оценку продукта [49].

В связи с потенциальной угрозой безопасности и качеству сыров, производимых из непастеризованного молока, ученые Araújo-Rodrigues и др. исследовали производственные и защитные свойства 11 штаммов молочнокислых бактерий. Эти штаммы были выделены из традиционного португальского сыра Serpa (PDO), изготавливаемого из сырого овечьего молока. Целью исследования являлась разработка автохтонной закваски, предназначенной специально для этого сорта сыра, что позволило бы сохранить его уникальные характеристики [50]. Авторы полагали, что решение проблем качества и безопасности сыров может заключаться в добавлении автохтонной закваски, которая обеспечит оптимизацию процесса выработки сыра и доминирование отобранной полезной микробиоты. Результаты исследования биохимических процессов в опытных сырах позволили отобрать два штамма *Lactiplantibacillus plantarum* PL1 и PL4 и один штамм *Lacticaseibacillus paracasei*, проявлявшие протеолитическую и липолитическую активность, устойчивость к соли и температурным режимам выработки и созревания, а также антимикробный эффект в отношении опасных микроорганизмов. Этот традиционный сыр имеет большое экономическое и культурное значение в Португалии благодаря долгой истории производства. Применение коммерческих заквасок для сыров PDO запрещено португальским законодательством, поэтому исследователи считают, что специальная закваска из автохтонных культур позволит вывести на рынок новые сыры с органолептическими характеристиками, приближенными к показателям сыра Serpa, но улучшенными с точки зрения безопасности.

Разнообразные молочнокислые палочки были выделены из итальянского сыра Nicastrese, вырабатываемого из сырого козьего молока без добавления заквасок [51]. Из образцов молока и сыров с четырех ферм были выделены и идентифицированы 720 изолятов, отнесенных в основном к *Lactococcus lactis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus casei*, *Lactobacillus brevis*, *Leuconostoc mesenteroides* и *Enterococcus faecalis*. Результаты выявили высокую вариабельность между образцами в составе микробиоты, в содержании летучих органических соединений и в органолептических характеристиках. Анализ летучих органических соединений позволил идентифицировать 36 веществ, среди которых свободные жирные кислоты и кетоны были основными, за ними следовали спирты и сложные эфиры. Статистический анализ выявил достоверную зависимость между концентрацией сложных эфиров, спиртов и альдегидов с лактобациллами незаквасочного происхождения, доказывающую влияние развивающихся в сырах видов *L. casei, L. plantarum* и *L. brevis* на образование летучих органических соединений в зрелых сырах.

Представляет интерес и информация о возможности контроля роста опасного микроорганизма *Listeria monocytogenes* во время хранения свежего сыра, изготовленного в лабораторных условиях с использованием шести штаммов *Lactococcus lactis* и семи штаммов *Lactiplantibacillus plantarum*, выделенных из кустарных молочных продуктов Сардинии, в качестве защитных культур. Перед использованием была проведена оценка антимикробной активности штаммов и их технологических характеристик. Установлено, что три штамма *Lactococcus lactis* и 2 штамма *Lactiplantibacillus plantarum* снижают количество клеток листерий в опытных сыра на 3–4 порядка по сравнению с контрольными, и авторы сочли их перспективными для использования в виде вспомогательных культур для обеспечения безопасности сыров [52]. Кроме того, эти автохтонные штаммы, используемые в качестве биоконсервантов, могут представлять собой полезный инструмент для защиты микробного биоразнообразия, присутствующего на территории Сардинии. По мнению исследователей, изученные автохтонные культуры можно рассматривать и как способ защиты, и для сохранения микробного биоразнообразия, существующего на территории Сардинии.

Основной целью многочисленных исследований автохтонной микрофлоры традиционных сыров из сырого молока является сохранение практики их производства как важных национальных продуктов. Только во Франции представлено почти 1000 различных сортов сыра, в том числе 45 сортов, зарегистрированных в рамках Защищенного наименования по происхождению (PDO) — европейской программы охраны, которая охватывает традиционные методы производства сыра. Одной из основных характеристик сыров PDO, вырабатываемых из сырого или пастеризованного молока, является то, что они содержат уникальный, характерный для конкретных условий, сложный микробный консорциум. Именно метаболическая активность сформировавшейся микробиоты приводит к получению оригинальных узнаваемых продуктов, которые высоко ценят во всем мире. Но после изучения влияния новых выделенных культур лактобацилл практически все авторы высказывают мнение о возможности их использования в составе коммерческих заквасок для разных ферментированных молочных продуктов.

Благодаря широкому распространению лактобацилл в природных и производственных средах обитания [26] и в связи с отсутствием промышленного или кустарного производства сыров из сырого молока отечественные ученые используют другие источники выделения лактобацилл. Перспективными источниками для выделения лактобацилл являются самоквасные кисломолочные продукты, сырое молоко, растения [54–56]. Следует отметить, что хорошим источником для получения чистых культур молочнокислых палочек, перспективных для использования при производстве сыров, являются сыры высокого качества, выработанные из пастеризованного молока, при выработке которых не использовались поливидовые бактериальные закваски с лактобациллами или дополнительные лактобациллы. В таких сырах незаквасочные лактобациллы проходят селекционный отбор под влиянием условий технологического процесса in situ. Так, штамм *Lactiplantibacillus plantarum,* обладающий антагонистическим действием на маслянокислые бактерии из коллекции микроорганизмов ВНИИМС и использующийся до настоящего времени в составе серийно выпускаемых заквасок для сыроделия, был выделен в 1960-е годы Алексеевой и др. [36] из высококачественного Костромского сыра.

5.2. Лактобациллы в низкожирных сырах

Следует рассмотреть еще один перспективный вариант применения лактобацилл и других представителей заквасочной микробиоты — улучшение сенсорных характеристик низкожирных сыров. Эта группа сыров востребована потребителями, ведущими здоровый образ жизни и контролирующими количество поступающих с пищей калорий. Но сыры с пониженной жирностью существенно уступают в качестве жирным сырам с содержанием молочного жира 45% и 50%. Они, как правило, имеют слабовыраженный сырный, кислый, иногда с горечью вкус и аромат, плотную грубоватую текстуру. Считается, что проблемы вкуса и аромата, а также консистенции нежирных сыров обусловлены именно пониженным содержанием молочного жира. При этом такие сыры могут с большой пользой для здоровья дополнить сбалансированный рацион питания [57]. Одним из способов повышения потребительских качеств низкожирных сыров является использование при их производстве специально отобранных дополнительных культур, обладающих повышенной протеолитической и липолитической активностью.

В работе Вахрушевой выявлено положительное влияние двух дополнительных культур *Lacticaseibacillus casei* и *Lactobacillus helveticus* из коллекции микроорганизмов экспериментальной биофабрики ВНИИМС на органолептические показатели сыра с массовой долей жира 30% в пересчете на сухое вещество [58]. В ходе исследования было выявлено, что скорость отмирания лактококков основной закваски в контрольном сыре без лактобацилл была выше, чем в опытных образцах, начиная с 30 суток созревания. При этом в опытных сырах наблюдалось более высокое содержание низкомолекулярных пептидов и свободных аминокислот, что свидетельствует о более интенсивном протеолизе в присутствии *Lactobacillus helveticus* по сравнению с *Lacticaseibacillus casei*. Добавление обоих видов лактобацилл привело к снижению условной твердости сыров по сравнению с контролем. Экспериментальные сыры имели более высокие органолептические показатели, но автор отметила, как недостаток наличие пряного привкуса в сыре с дополнительной культурой *Lactobacillus helveticus,* хотя такой оттенок во вкусовом букете сыра можно позиционировать как отличительный нюанс.

Исследованиями Свириденко и др., проведенными при выработке сыров с массовой долей жира 20% в пересчете на сухое вещество, также установлено увеличение глубины протеолиза при использовании вспомогательных культур мезофильных лактобацилл вида *Lacticaseibacillus casei* и пропионовокислых бактерий вида *Propionibacterium freudenreichii*, которое привело к образованию выраженного сырного вкуса и аромата, к улучшению вкусоароматического профиля экспериментальных сыров [59]. По мнению авторов, дополнительные культуры в совокупности с технологическими приемами приближают потребительские свойства сыра с массовой долей жира 20% к показателям сыра с жирностью 45%.

Целенаправленный скрининг культур мезофильных и термофильных лактобацилл из республиканской коллекции промышленных штаммов заквасочных культур (Республика Беларусь) путем определения биохимической активности для применения при выработке сыров пониженной жирности позволил отобрать 2 штамма *Lacticaseibacillus paracasei,* по 1 штамму *Lacticaseibacillus rhamnosus* и *Lacticaseibacillus casei,* а также 3 штамма *Lactobacillus helveticus* с высокой протеолитической активностью, сохраняющейся при низких температурах созревания сыров [60]. Эти культуры не проявили липолитическую активность in vitro, определяемую методом диффузии в агар с глицерин трибутиратом. Однако, возможно, в условиях in situ, складывающихся при созревании сырной массы, культуры проявят способность гидролизовать молочный жир. Высокая протеолитическая активность обнаружена и Китаевской и др. [61] при изучении протеолитической активности лактобацилл, причем два штамма *Lacticaseibacillus casei* и один штамм *Limosilactobacillus fermentum* обладали широким диапазоном внеклеточной протеолитической активности при различных уровнях активной кислотности и эффективно гидролизовали не только модельные субстраты (казеин, альбумин и гемоглобин), но и белки молока и мясного сырья.

5.3. Пробиотические свойства лактобацилл

Проведение масштабных исследований лактобацилл обусловлено не только их высокой протеолитической активностью и положительным влиянием на качество сыров, включая формирование разнообразных вкусовых оттенков, но и их признанием в качестве пробиотических микроорганизмов. Доказано, что лактобациллы способствуют укреплению здоровья человека и животных. Потребление ферментированных продуктов, обогащенных пробиотическими бактериями, оказывает благотворное влияние на здоровье человека благодаря нескольким механизмам: прямому воздействию живых микробных клеток (пробиотический эффект), косвенному влиянию через вторичные метаболиты с полезными свойствами, продуцируемые бактериями в процессе ферментации (постбиотический эффект), а также комплексному воздействию, обусловленному синергическим действием живых бактерий и их метаболитов [53,62,63].

Многие микроорганизмы, отнесенные в настоящее время к пробиотикам, являются молочнокислыми бактериями. Очевидно, это обусловлено тем, что лактобактерии входят в состав микробиоты желудочно-кишечного тракта человека и животных. Пробиотические молочнокислые бактерии являются нормальной микрофлорой молока, кисломолочных, молочных продуктов и сыра. В молочных продуктах широко распространено использование пробиотических лактобацилл видов *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus, Lacticaseibacillus casei, Lacticaseibacillus paracasei, Limosilactobacillus fermentum, Lactobacillus gasseri, Lactobacillus johnsonii, Lactiplantibacillus plantarum, Lacticaseibacillus rhamnosus, Limosilactobacillus reuteri*, *Lactobacillus salivarius*.

За последние 20 лет в разных странах мира проведено невероятное количество исследований о влиянии лактобацилл на здоровье человека. Установлено, что лактобациллы обладают разнообразными биологическими свойствами, подавляют развитие патогенных микроорганизмов, принимают участие в различных процессах метаболизма в организме людей и животных. Этой теме посвящено много исследовательских и обзорных статей, например, обзоры Coelho и др. [63], Загайновой и др. [64], Petrova и др. [65]. В данной статье мы не ставили целью подробное рассмотрение этого вопроса. Считаем целесообразным отметить, что в ряде работ, посвященных изучению микробиома сыров и дополнительных, в т. ч. автохтонных культур молочнокислых палочек и других видов бактерий, показано, что сыры могут квалифицироваться как функциональные продукты, доставляющие в организм человека живые полезные бактерии и продукты их метаболизма, а также подавлять рост патогенов [8,17,47,53].

Так, в рассольных, свежих и твердых сырах и в кисломолочных продуктах, отобранных в домохозяйствах Сербии, Хорватии, Словении, Боснии и Герцеговины, Черногории и Северной Македонии, выявлено большое разнообразие лактобактерий: выделено 28 видов и 3000 штаммов, относящихся к родам *Lactobacillus, Lactococcus, Enterococcus, Streptococcus, Pediococcus, Leuconostoc* и *Weissella.* Культуры исследованы и по пробиотическим свойствам, включая продуцирование бактериоцинов, подавление патогенных бактерий, агрегационную способность, а также иммуномодулирующий эффект. Многие штаммы обладали комплексом ценных свойств, представляющих научный и практический интерес для создания новых заквасок функциональных кисломолочных продуктов [67].

Использование при производстве сыра Эдам в промышленных условиях пробиотических культур *Lactobacillus acidophilus* NCFM и *Lactobacillus rhamnosus* HN001 привело к небольшим изменениям в его химическом составе. Среднее количество лактобацилл незаквасочного происхождения в контрольных сырах составило 3,16 log КОЕ/г и было значительно ниже, чем в экспериментальных, в которых количество лактобацилл выросло до 8,3 log КОЕ/г. Количество жизнеспособных клеток пробиотиков к концу созревания сыра сократилось незначительно (примерно на 1 порядок) и составило около 7,0 log КОЕ/г. Для подтверждения принадлежности лактобацилл к видам *L. rhamnosus* и *L. acidophilus* после посева на селективные среды были выделены по пять колоний, идентификация которых методом ПЦР подтвердила принадлежность к исходным видам. С учетом низкого содержания незаквасочных лактобацилл в сырах это доказывает развитие и высокую концентрацию именно пробиотических культур. Было сделано предположение, что ежедневное употребление 80–100 г такого продукта может быть полезным для здоровья [47].

В связи с доказанным широким спектром полезных свойств молочнокислых бактерий во всем мире ведется поиск перспективных штаммов для разработки функциональных продуктов питания и пробиотических препаратов, продолжаются исследования микробиоты традиционных сыров из непастеризованного молока и других ферментированных пищевых продуктов, а также из различных природных источников и микрофлоры человека, в которых присутствуют молочнокислые бактерии.

6. Заключение

Одной из проблем в отечественном сыроделии является определенная унифицированность сенсорных показателей сыров из пастеризованного молока с использованием коммерческих бактериальных заквасок определенного штаммового состава и узкий видовой спектр дополнительных культур лактобацилл. Многочисленные

зарубежные исследования микробиоты традиционных сыров из сырого молока показывают неоспоримую зависимость индивидуальных особенностей разнообразных сортов сыра от состава, от свойств и от активности автохтонной микробиоты, формирующейся в терруарах в разных регионах и странах. Сыры из непастеризованного молока характеризуются вариабельностью качества, однако представляют собой богатый источник разнообразных микроорганизмов. В частности, из них выделено множество штаммов лактобацилл и других видов, обладающих технологически ценными свойствами: протеолитической и липолитической активностью, протективным действием против микроорганизмов порчи и патогенных бактерий, а также пробиотическим потенциалом. Продемонстрирована возможность использования сыров в качестве источника пробиотиков и их метаболитов. Перспективным направлением в развитии отечественного промышленного сыроделия, в улучшении органолептических показателей и расширении ассортимента выпускаемых сыров является поиск новых видов и штаммов лактобацилл для разработки новых отечественных дополнительных заквасок. Следует отметить, что глобальное изменение таксономии лактобацилл в 2020 году, существенно затронувшее их номенклатуру, имеет принципиальное значение для исследований свойств лактобацилл, а также для выбора и использования бактериальных заквасок в производстве сыра. В результате реформы было объединено два семейства *Lactobacillaceae* и *Leuconostocaceae,* а род *Lactobacillus* разделился на 23 рода. Требуется внесение изменений в целый ряд нормативных документов и стандартов, в которых упоминаются лактобациллы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Лепилкина, О. В., Григорьева, А. И. (2023). Ферментативный протеолиз при преобразовании молока в сыр. *Пищевые системы*, 6(1), 36–45. [Lepilkina O. V., Grigorieva A. I. (2023). Enzymatic proteolysis during the conversion of milk into cheese. *Food Systems*, 6(1), 36–45. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-36-45
2. McSweeney, P.L.N., Cotter, P.D., Everett, D.W. (2017). Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology. Academic Press, 2017.
3. Chessa, L., Paba, A., Daga, E., Dupré, I., Piga, C., Di Salvo, R. et al. (2021). Autochthonous natural starter cultures: A chance to preserve biodiversity and quality of Pecorino Romano PDO Cheese. *Sustainability,* 13(15), Article 8214. https://doi.org/10.3390/su13158214
4. Rozos, G., Voidarou, C., Stavropoulou, E., Skoufos, I., Tzora, A., Alexopoulos, A. et al. (2018). Biodiversity and microbial resistance of lactobacilli isolated from the traditional greek cheese kopanisti. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 517. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00517
5. Tsisaryk, O., Slyvka I., Musiy, L. (2017). Screening of technological properties of natural strains of lactic acid bacteria. *Scientific Messenger LNUVMB*, 19(80), 88–92.
6. Vos, P., Garrity, G. M., Jones, D., Krieg, N. R., Ludwig, W., Rainey, F. A. et al. (2009). Bergey's manual of systematic bacteriology. Springer New York, NY, 2009.
7. Abarquero, D., Duque, C., Bodelón, R., López, I., Muñoz, J., María Fresno, J. et al. (2024). Autochthonous cultures to improve the quality of PGI Castellano cheese: Impact on proteolysis, microstructure and texture during ripening. *Food Research International*, 186, Article 114306. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114306
8. Margalho, L. P., Jorge, G. P., Noleto, D. A. P., Silva, C. E., Abreu, J. S., Piran, M. V. F. et al. (2021). Biopreservation and probiotic potential of a large set of lactic acid bacteria isolated from Brazilian artisanal cheeses: From screening to in product approach. *Microbiological Research*, 242, Article 126622. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126622
9. Çetin, B., Usal, M., Aloğlu, H. Ş., Busch, A., Dertli, E., Abdulmawjood, A. (2024). Characterization and technological functions of different lactic acid bacteria from traditionally produced Kırklareli white brined cheese during the ripening period. *Folia Microbiologica*, 5. https://doi.org/10.1007/s12223-024-01141-8
10. Гудков, А.В. (2004). Сыроделие: технологические, биологические и физико-химические аспекты. М.: ДеЛи принт, 2004. [Gudkov, A.V. (2004). Cheese making: Technological, biological and physico-chemical aspects. Moscow: Dely print, 2004. (In Russian)]
11. Елисеева, Т. (2020). Бактериальные культуры «Crealat» и натуральные ферменты «Crearen» — ваш успех в производстве сыров. *Сыроделие и маслоделие*, 2, 28–29. [Eliseeva, T. (2020). Bacterial cultures "Crealat" and natural enzymes "Crearen" — your success in cheese production. *Cheese- and Buttermaking*, 2, 28–29. (In Russian)]
12. Кашина, Е. Д. (2020). Возможности расширения горизонтов. *Сыроделие и маслоделие*, 3, 33–35. [Kashina, E.D. (2020). Opportunities for expanding horizons. *Cheese- and Buttermaking*, 3, 33–35. (In Russian)]
13. Siedler, S., Rau, M. H., Bidstrup, S., Vento, J. M., Aunsbjerg, S. D., Bosma, E. F. et al. (2020). Competitive exclusion is a major bioprotective mechanism of lactobacilli against fungal spoilage in fermented milk products. *Applied and Environmental Microbiology,* 86(7), Article e02312–19. https://doi.org/10.1128/AEM.02312-19
14. Chr. Hansen. (2021). Chr. Hansen представляет новое поколение защитных культур FreshQ® для молочных продуктов. *Молочная промышленность*, 6, 30–31. [Chr. Hansen. (2021). Chr.Hansen presents a new generation of protective crops FreshQ® for dairy products. *Dairy Industry*, 6, 30–31. (In Russian)]
15. Жданеева, Н. П., Рыбченко, Т. В. (2019). Защитные культуры «Crealat» для сохранения качества молочных продуктов. *Молочная промышленность*, 12, 44–45. [Zhdaneeva, N.P., Rybchenko, T.V. (2019). Protective cultures "Crealat" to preserve milk products quality. *Dairy Industry*, 12, 44–45. (In Russian)]
16. Келяшова, Ю. (2017). Опыт применения защитных культур в производстве полутвердых сыров. *Сыроделие и маслоделие,* 4, 38–39. [Kelyashova, Yu. (2017). Experience of applying protective cultures in the semi-hard cheese production. *Cheese- and Buttermaking*, 4, 38–39. (In Russian)]
17. Hadef, S., Idoui, T., Sifour, M., Genay, M., Dary-Mourot, A. (2023). Screening of wild lactic acid bacteria from Algerian traditional cheeses and goat butter to develop a new probiotic starter culture. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(2), 387–399. https://doi.org/10.1007/s12602-022-10000-2
18. Мордвинова, В. А., Свириденко, Г.М. (2015). Факторы, влияющие на качество сыров типа «Маасдам». *Сыроделие и маслоделие*, 3, 28–30. [Mordvinova, V.A., Sviridenko, G.M. (2015). The factors effecting quality of the cheese of the "Maasdam" type. *Cheese- and Buttermaking*, 3, 28–30. (In Russian)]
19. Орлова, Т.Н., Функ, И.А., Отт, Е.Ф., Дорофеев, Р.В. (2020). Пропионовокислые бактерии и их значение. *Сыроделие и маслоделие*, 1, 28–29. [Orlova, T.N., Funk, I.A., Ott, E.F., Dorofeev, R.V. (2020). Propionic acid bacteria and their significance. *Cheese- and Buttermaking*, 1, 28–29. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2020-1-28-29
20. Сорокина, Н.П., Кураева, Е.В., Шпак, А.В. (2021). Состав и свойства заквасочной микрофлоры для полутвёрдых сыров. *Сыроделие и маслоделие,* 3, 42–46. [Sorokina, N.P., Kuraeva, E.V., Shpak, A.V. (2021). Composition and properties of starter microflora for semi-hard cheeses. *Cheese- and Buttermaking*, 3,42–46 (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2021-3-42-46
21. Леванова, Г.Ф., Ефимов, Е.И. (2009). Фенотаксономия и геносистематика лактобацилл. Н. Новгород: изд. Ю. А. Николаев, 2009. [Levanova, G.F., Efimov, E.I. (2009). Phenotaxonomy and genosystematics of lactobacilli. Nizhny Novgorod: Publishing house of Yu. A. Nikolaev, 2009.]
22. Mattarelli, P., Holzapfel, W., Franz, C. M. A. P., Endo, A., Felis, G. E., Hammes, W. et al. (2014). Recommended minimal standards for description of new taxa of the genera Bifidobacterium, Lactobacillus and related genera. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 64(4), 1434–1451. https://doi.org/10.1099/ijs.0.060046-0
23. Ботина, С. Г. Климина, К. М., Коробан, Н.В., Амерханова, А. М., Зинченко, В.В., Даниленко, В.Н. (2010). Реклассификация отечественных пробиотических культур рода Lactobacillus. *Генетика,* 46(11), 1485–1492. [Botina, S.G., Klimina, K.M., Danilenko, V.N., Koroban, N.V., Zinchenko, V.V., Amerkhanova, A.M. (2010). Revised classification of native probiotic strains of lactobacillus used in Russian Federation. *Russian Journal of Genetics,* 46(11), 1485–1492. (In Russian)]
24. Skerman, V. B. D., Sneath, P. H. A., Mcgowan, V. (1980). Approved lists of bacterial names. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 30(1), 225–420. https://doi.org/10.1099/00207713-30-1-225
25. Oberg, T. S., McMahon, D. J., Culumber, M. D., McAuliffe, O., Oberg, C. J. (2022). Invited review: Review of taxonomic changes in dairy-related Lactobacilli. *Journal Dairy Sciences*, 105(4), 2750–2770. https://doi.org/10.3168/jds.2021-21138
26. Salvetti, E., Harris, H. M. B., Felis, G. E., O'Toole, P. W. (2018). Comparative genomics of the genus Lactobacillus reveals robust phylogroups that provide the basis for reclassification. *Applied and Environmental Microbiology,* 84(17), Article e00993–18.
27. Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M. A. P., Harris, H. M. B., Mattarelli, P. et al. (2020). A taxonomic note on the genus Lactobacillus: Description of 23 novel genera, emended description of the genus Lactobacillus Beijerinck 1901, and union of Lactobacillaceae and Leuconostocaceae. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70(4), 2782–2858. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107
28. Pot, B., Salvettic, E., Mattarellid, P., Felisc, G. E. (2019). The potential impact of the Lactobacillus name change: The results of an expert meeting organised by the Lactic Acid Bacteria Industrial Platform (LABIP). *Trends in Food Science and Technology*, 94, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.006
29. Будинов, Л.Т. (1908). Сравнительное изучение бактериального населения сыров русско-швейцарского и эмментальского. *Вестник Бактериолого-агрономической станции*, 14, 43–97. [Budinov, L.T. (1908). Comparative study of the bacterial population of Russian-Swiss and Emmental cheeses. *Herald of the Bacteriological and Agronomic Station*, 14, 43–97. (In Russian)]
30. Королёв, С.А. (1924). Микрофлора процесса созревания русского бакштейна. *Труды Вологодского Молочно-Хозяйственного Института*, 2(4), 111–126. [Королёв, С. А. Korolev, S.A. (1924). Microflora of the ripening process of Russian Backstein. *Proceedings of the Vologda Dairy Farming Institute,* 2(4), 111–126. (In Russian)]
31. Богданов, В. (1935). Применение протеолитически активных рас молочнокислых микробов (типа Bact. casei) для ускорения созревания сыров. *Молочная промышленность*, 2(5), 15–18. [Bogdanov, V. (1935). The use of proteolytically active races of lactic acid microbes (*Bact. casei* type) for acceleration of cheese ripening. *Dairy Industry*, 2(5), 15–18. (In Russian)]
32. Рунов, Е.В. (1947). Подбор бактериальных заквасок для голландского сыра. М.: Пищепромиздат, 1947. [Runov, E.V. (1947). Selection of bacterial starter cultures for Dutch cheese. Moscow: Pischepromizdat, 1947. (In Russian)]
33. Бударина, М.Н., Калинина, Г.А., Трофимова, Т.И. (1967). Применение молочнокислых палочек при выработке сыра с низкой температурой второго нагревания. *Молочная промышленность*, 9, 23–25. [Budarina, M.N., Kalinina, G.A., Trofimova, T.I. (1967). The use of lactobacilli in production of cheeses with low temperature of the second heating. *Dairy Industry*, 9, 23–25. (In Russian)]

34. Дьяченко, П.Ф., Шидловская, В.П. (1966). Исследование казеинолитической активности молочнокислых бактерий. *Прикладная биохимия и микробиология*, 2(3), 239–247. [D'yachenko, P.F., Shidlovskaya, V.P. (1966). Study of the caseinolytic activity of lactic acid bacteria. *Applied Biochemistry and Microbiology,* 2(3), 239–247. (In Russian)]
35. Диланян, З.Х., Туманян, В.А. (1968). Накопление свободных аминокислот протеолитически активными молочнокислыми палочками. *Биологический журнал Армении*, 21(8), 37–42. [Dilanyan, Z.H., Tumanyan, V. A. (1968). Accumulation of free amino acids by proteolytically active lactobacilli. *Biological Journal of Armenia*, 21(8), 37–42. (In Russian)]
36. Гудков, А.В., Алексеева, К.П. (1970). Взаимодействие молочнокислых палочек и маслянокислых бактерий, вызывающих порчу сыра. *Молочная промышленность*, 1, 25–28. [Gutkov, A.V., Alekseeva, K.P. (1970). Interaction of lactobacilli and butyric acid bacteria causing cheese spoilage. *Dairy Industry,* 1, 23–29. (In Russian)]
37. Щетинин, М.П. (2021). Развитие отечественного сыроделия в условиях санкционной политики Евросоюза. *Сыроделие и маслоделие*, 5, 4–7. [Shchetinin, M.P. (2021). Development of domestic cheese making in the context of the EU sanctions policy. *Cheese- and Buttermaking*, 5, 4–7. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2021-5-4-7
38. Мордвинова, В.А. (2021). Актуальные вопросы ассортиментной политики сыродельного предприятия. *Сыроделие и маслоделие*, 5, 8–9. [Mordvinova, V.A. (2021). Actual questions of assortment policy of a cheese making enterprise. *Cheese- and Buttermaking*, 5, 8–9. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2021-5-8-9
39. Markusková, B., Lichvariková, A., Szemes, T., Koreňová, J., Kuchta, T., Drahovská, H. (2018). Genome analysis of lactic acid bacterial strains selected as potential starters for traditional Slovakian bryndza cheese. *FEMS Microbiology* Letters, 365(23), Article fny257. https://doi.org/10.1093/femsle/fny257
40. Choi, J., In Lee, S., Rackerby, B., Frojen, R., Goddik, L., Ha, S.-D. et al. (2020). Assessment of overall microbial community shift during Cheddar cheese production from raw milk to aging. *Applied Microbiology and Biotechnology,* 104(14), 6249–6260. https://doi.org/10.1007/s00253-020-10651-7
41. Wilbey, R.A. (2014). Heat treatment of foods. Principles of Pasteurization. Chapter in book: Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition). Academic Press, 2014. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00159-2
42. Кирик, И.В., Казак, А.Н., Василенко, С.Л., Фурик, Н.Н. (2016). Изучение физиолого-биохимических свойств бактерий *Lactobacillus rhamnosus* и *Lactobacillus fermentum* для обеспечения их промышленного культивирования. *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*, 10, 86–100. [Kirik, I., Kazak, A., Vasylenko, S., Furik, N. (2016). Studies of the physiological and biochemical properties of *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus fermentum* bacteria to ensure their industrial cultivation. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials*, 10, 86–100. (In Russian)]
43. Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Mancini, L., Fox, P. F. (2015). Pros and cons for using non-starter lactic acid bacteria (NSLAB) as secondary/adjunct starters for cheese ripening. *Trends in Food Science and Technology*, 45(2), 167–178. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.016
44. de Souza, M. T. P., Fagnani, R., Aragon Alegro, L. C., de Santana, E. H. W. (2024). Non-starter lactic acid bacteria and citrate fermenting bacteria in milk supply chain: Are they easily controlled? *International Dairy Journal*, 149, Article 105839, https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105839
45. Gatti, M., Bottari, B., Lazzi, C., Neviani, E., Mucchetti, G. (2014). Invited review: Microbial evolution in raw-milk, long-ripened cheeses produced using undefined natural whey starters. *Journal of Dairy Science,* 97(2), 573–591. https://doi.org/10.3168/jds.2013-7187
46. De Pasquale, I., Di Cagno, R., Buchin, S., De Angeli, S. M., Gobbetti, M. (2019). Use of autochthonous mesophilic lactic acid bacteria as starter cultures for making Pecorino Crotonese cheese: Effect on compositional, microbiological and biochemical attributes. *Food Research International*, 116, 1344–1356. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.024
47. Aljewicz, M., Cichosz, G., Nalepa, B., Kowalska, M. (2014). Influence of probiotics on proteolysis of edam cheese. *Food Technology and Biotechnology,* 52(4), 439–447. https://doi.org/10.17113/ftb.52.04.14.3659
48. Nicosia, F.D., Pino, A., Maciel, G.L.R., Sanfilippo, R.R., Caggia, C., de Carvalho, A.F. et al. (2023). Technological characterization of lactic acid bacteria strains for potential use in cheese manufacture. *Foods*, 12(6), Article 1154. https://doi.org/10.3390/foods12061154
49. Carafa, I., Stocco, G., Franceschi, P., Summer, A., Tuohy, KM., Bittante, G. et al. (2019). Evaluation of autochthonous lactic acid bacteria as starter and non-starter cultures for the production of Traditional Mountain cheese. *Food Research International,* 115, 209–218. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.069
50. Araújo-Rodrigues, H., dos Santos, M. T. P. G., Ruiz-Moyano, S., Tavaria, F. K., Martins, A. P. L., Alvarenga, N. et al. (2021). Technological and protective performance of LAB isolated from Serpa PDO cheese: Towards selection and development of an autochthonous starter culture. *LWT,* 150, Article 112079. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112079
51. Pino, A., Liotta, L., Randazzo, CL., Todaro, A., Mazzaglia, A., De Nardo, F. et al. (2018). Polyphasic approach to study physico-chemical, microbiological and sensorial characteristics of artisanal Nicastrese goat's cheese. *Food Microbiology,* 70, 143–154. https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.005
52. Pisano, M.B., Fadda, M.E., Viale, S., Deplano, M., Mereu, F., Blažić, M. et al. (2022). Inhibitory effect of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lactococcus lactis* autochtonous strains against *Listeria monocytogenes* in a laboratory cheese model. *Foods,* 11(5), Article 715. https://doi.org/10.3390/foods11050715
53. Behera, S. S., Ray, R. C., Zdolec, N. (2018). Lactobacillus plantarum with functional properties: An approach to increase safety and shelf-life of fermented foods. *BioMed Research International*, 2018, 1–18. https://doi.org/10.1155/2018/9361614
54. Сорокина, Н.П., Кучеренко, И.В., Бруцкая, А.Л. (2022). Выделение и идентификация молочнокислых палочек, перспективных для сыроделия. *Сыроделие и маслоделие*, 5, 38–41. [Sorokina, N.P., Kucherenko, I.V., Brutskaya, A.L. (2022). Isolation and identification of lactic acid sticks promising for cheesemaking. *Cheese- and Buttermaking*, 5, 38–41. (In Russian)] https://doi.org/10.31515/2073-4018-2022-5-38-41
55. Кабисов, Р.Г., Козонова, С.Т., Рамонова, Э.В., Рехвиашвили, Э.И., Ваниев, А.Г. (2020). Выделение молочнокислых бактерий из растительных субстратов. *Известия Горского государственного аграрного университета,* 57(2), 145–151. [Kabisov, R.G., Kozonova, S.T., Ramonova, E.V., Rekhviashvili, E.I., Vaniev, A.G. (2020). Isolation of lactic acid bacteria from vegetal substrates. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*, 57(2), 145–151. (In Russian)]
56. Барейко, А.А., Сидоренко, А.В., Новик, Г.И. (2016). Выделение и характеристика молочнокислых бактерий из растительных источников. Микробные биотехнологии: фундаментиальные и прикладные аспекты. Сборник научных трудов. Минск: Издательский дом Белорусская наука, 2016. [Bareika, A.A., Sidarenka, A.V., Novik, G.I. (2016). Isolation and characterization of lactic acid bacteria from plant sources. Minsk: Publishing House "Belorusskaya Nauka", 2016. (In Russian)]
57. Келяшова, Ю. (2016). Низкожирные сыры: актуальный тренд российского рынка. *Сыроделие и маслоделие*, 2, 36–37. [Kelyashova, Yu. (2016). Low fat cheese: An actual trend of the russian market. *Cheese- and Buttermaking*, 2, 36–37. (In Russian)]
58. Вахрушева, Д. С. (2021). Влияние лактобацилл на формирование органолептического профиля сыров пониженной жирности. *Пищевые системы*, 4(3S), 31–36. [Vakhrusheva, D.S. (2021). Effect of lactobacillus on the formation organoleptic profile of low fat cheeses. *Food Systems*, 4(3S), 31–36. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-31-36
59. Свириденко, Г.М., Вахрушева, Д.С., Свириденко Ю. Я., Мордвинова В. А. (2022). Низкожирный сыр в фокусе диетического питания. *Вопросы питания*, 91(5), 105–115. [Sviridenko G. M., Vakhrusheva D. S., Sviridenko Yu. Ya., Mordvinova V. A., Delitskaya I. N. Low-fat cheese in the focus of dietary nutrition. *Voprosy Pitaniia*, 91(5), 105–115. (In Russian)] https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-105-115
60. Двоеженова, Е.А., Жабанос, Н.К., Муха, Д.В., Фурик Н. Н. (2022). Биохимическая активность культур молочнокислых бактерий, перспективных для использования при изготовлении сыров с пониженным содержанием жира. *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья,* 17, 129–139. [Dvoezhenova, E.A., Zhabanos, N.K., Mukha, D.V., Furik, N.N. (2022). Biochemical activity of lactic acid bacteria promising for use in the production of reduced-fat cheese. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials*, 17, 129–139. (In Russian)]
61. Китаевская, С. В., Пономарев, В. Я., Решетник, О. А. (2022). Оценка протеолитической активности новых штаммов лактобацилл с криорезистентными свойствами. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология,*12(1), 76–86. [Kitaevskaya, S.V., Ponomarev, V.Y., Reshetnik, O.A. (2022). Evaluation of the proteolytic activity of new cryoresistant lactobacillus strains. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 12(1), 76–86. (In Russian)] https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-76-86
62. Albano, C., Morandi, S., Silvetti, T., Casiraghi, M. C., Manini, F., Brasca, M. (2018). Lactic acid bacteria with cholesterol-lowering properties for dairy applications: In vitro and in situ activity. *Journal of Dairy Science*, 101(12), 10807–10818. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15096
63. Coelho, M. C., Malcata, F. X., Silva, C. C. G. (2022). Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: From starter cultures to probiotic functions. *Foods*, 11(15), Article 2276. https://doi.org/10.3390/foods11152276
64. Загайнова, А.В., Федец, З.Е., Панькова, М.Н., Новожилов, К.А., Грицюк, О. В. Курбатова, И.В. (2022). Лактобациллы как составная часть микробиоты кишечника и их значение в физиологическом состоянии человека. *Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine,* 4, 12–25. [Zagainova, A.V., Fedets, Z.E., Pankova, M.N., Novozhilov, K.A., Gritsyuk, O.V., Kurbatova, I.V. (2022). Lactobacilles as a component of the intestinal microbiota and their significance in the physiological state of humans. *Russian Journal of Environmental and Rehabilitation Medicine*, 4, 12–25. (In Russian)]
65. Petrova, P., Ivanov, I., Tsigoriyna, L., Valcheva, N., Vasileva, E., Parvanova-Mancheva, T. et al. (2021). Traditional Bulgarian dairy products: Ethnic foods with health benefits. *Microorganisms*, 9(3), Article 480. https://doi.org/10.3390/microorganisms9030480
66. Функ, И. А., Отт, Е. Ф., Дорофеев, Р. В. (2019). Пробиотический полутвердый сыр. *Ползуновский вестник*, 3, 29–32. [Funk, I.A., Ott, E.F., Dorofeev, R.V. (2019). Probiotic semi-hard cheese. *Polzunovskiy Vestnik,* 3, 29–32. (In Russian)] https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2019.03.006
67. Terzić-Vidojević, A., Veljović, K., Tolinački, M., Živković, M., Lukić, J., Lozo, J. et al. (2020). Diversity of non-starter lactic acid bacteria in autochthonous dairy products from Western Balkan Countries — Technological and probiotic properties. *Food Research International,* 136, Article 109494. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109494

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Сорокина Нинель Петровна — кандидат технических наук, Руководитель Экспериментальной биофабрики, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–485–32–9–82–05 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695 * автор для контактов	**Ninel P. Sorokina**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Experimental Biofabrics, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–485–32–9–82–05 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1108-3695 * corresponding author
Кучеренко Ирина Валентиновна — старший научный сотрудник, участок коллекции микроорганизмов и бактериофагов, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–485–329–82–21 E-mail: i.kucherenko@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8251-992X	**Irina V. Kucherenko,** Senior Researcher, Collection Area of Microorganisms and Bacteriophages, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–485–329–82–21 E-mail: i.kucherenko@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8251-992X
Бруцкая Анастасия Леонидовна — инженер контроля качества, Лаборатория контроля качества бактериальных препаратов, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия 152613, Ярославская область, Углич, ул. Красноармейский бульвар, 19 Тел.: +7–485–329–82–68 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0005-4070-8227	**Anastasiya L. Bruckaya**, Quality Control Engineer, Laboratory for Quality Control of Bacterial Preparations, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking 19, Krasnoarmeysky Boulevard, Uglich, 152613, Yaroslavl Region, Russia Tel.: +7–485–329–82–68 E-mail: n.sorokina@fncps.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0005-4070-8227
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-420-426

Поступила 27.05.2024
Поступила после рецензирования 20.09.2024
Принята в печать 23.09.2024
© Баскаков А. В., Зайцева Л. В., Мистенева С. Ю., Рубан Н. В., 2024

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

МИРОВАЯ ПРАКТИКА КЛАССИФИКАЦИИ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ

Баскаков А. В.[1,2*], Зайцева Л. В.[1], Мистенева С. Ю.[1], Рубан Н. В.[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности, Москва, Россия

[2] Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
мука, пшеничная мука, мучные кондитерские изделия, классификация, качество

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена обзору классификаций пшеницы, принятых в различных странах-производителях пшеницы и продуктов ее переработки (США, Канада, Италия, Франция, Германия, Китай и др.). Большое внимание уделено различиям в системах классификаций, рассмотрены критерии отнесения пшеницы к определенным классам, основанные на физических и химических свойствах зерна. Выделяются различия в классификации пшеницы по типам, включая морфологические особенности и достоинства зерна, такие как размер, цвет и содержание клейковины. Рассмотрены специфические требования и нормы качества пшеницы, продиктованные регуляторными органами и требованиями рынка каждой страны, такие как показатели массовой доли влаги, содержание примесей, плотность зерна и др. На основании анализа классификаций пшеницы в различных странах мира сделан вывод о необходимости установления единых и общепризнанных систем классификаций пшеницы. Это позволит упростить международную торговлю зерном, сделает рынок более прозрачным, укрепит доверие между странами-экспортерами и импортерами, а также будет способствовать развитию международного сотрудничества в сфере производства и переработки пшеничной муки. Несмотря на широкий ассортимент мучных кондитерских изделий на российском рынке, в стране выпускается преимущественно хлебопекарная мука общего назначения. Ее особенность — высокое содержание муки из твердозерных сортов пшеницы, отличающейся повышенным содержанием белка, сильной клейковиной и крупным размером частиц. По своим свойствам эта мука не подходит для производства большинства мучных кондитерских изделий. Произведенные из нее мучные кондитерские изделия существенно уступают по своим качественным характеристикам импортным аналогам, что снижает их конкурентоспособность. Это диктует потребность в разработке стандарта на муку для производства кондитерских изделий, в котором будут прописаны физико-химические показатели для различных типов муки с учетом их целевого назначения.

Received 27.05.2024
Accepted in revised 20.09.2024
Accepted for publication 23.09.2024
© Baskakov A. V., Zaytseva L. V., Misteneva S. Yu., Ruban N. V., 2024

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

WORLD PRACTICE OF WHEAT FLOUR CLASSIFICATION

Andrew V. Baskakov[1,2*], Larisa V. Zaytseva[1], Svetlana Y. Misteneva[1], Natalia V. Ruban[2]

[1] All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry, Moscow, Russia

[2] Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia

KEY WORDS:
flour, wheat flour, flour confectionery, classification, quality

ABSTRACT

The paper presents a review of wheat classification accepted in various countries — producers of wheat and products of its processing (USA, Canada, Italy, France, Germany, China and others). Much attention is given to differences in the classification systems. Criteria for assigning wheat to certain classes based on physical and chemical properties of grain are examined. Differences in wheat classification by types, including morphological features and merits of grain such as size, color and gluten content, are highlighted. The authors discuss specific requirements and norms of wheat quality dictated by the regulatory authorities and requirements of the market of each country such as the mass fraction of moisture, content of impurities, density of grain and others. Based on the analysis of wheat classification in various world countries, it has been concluded that it is necessary to establish unified and generally accepted systems of wheat classification. This will allow simplifying international grain trade, make the market more transparent, strengthen trust between exporting and importing countries and will also facilitate the development of the international cooperation in the sphere of production and processing of wheat flour. Despite the wide assortment of flour confectionery products on the Russian market, baker's flour of general purpose is mainly produced in the country. Its specific feature is a high content of flour from hard wheat varieties that are distinguished by higher protein content, strong gluten and large particle size. By its properties, this flour is not suitable for production of most flour confectionery products. Flour confectionery products produced from it are significantly inferior to import analogues in terms of their quality characteristics, which reduces their competitiveness. This dictates the need for the development of a standard for flour intended for production of confectionery products, which will include physico-chemical indicators for various flour types with consideration for their purpose.

1. Введение

Пшеница — одна из самых популярных зерновых культур в мире, используемая как для производства пищевой продукции, так и для кормов для животных. Зерно пшеницы классифицируют по ботаническим признакам и по технологическому потенциалу, учитывая морфологические особенности (форму, крупность, выравненность, цвет) и показатели качества (примеси, содержание белка, число падения, количество и качество клейковины и др.). В разных странах приняты стандарты, облегчающие классификацию зерен пшеницы и позволяющие корректно определять ее сорт и качество [1].

В основном для производства хлеба и кондитерских изделий используют муку пшеницы вида *Triticum aestivum*, которая также известна как пшеница обыкновенная. Свойства муки, полученной при помоле этого вида пшеницы, различаются в зависимости от ее сортовых особенностей, а также от агрономических и климатических условий, в которых выращивается пшеница. Например, при производстве

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Баскаков, А. В., Зайцева, Л. В., Мистенева, С. Ю., Рубан, Н. В.** (2024). Мировая практика классификации пшеничной муки. *Пищевые системы*, 7(3), 420–426. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-420-426

FOR CITATION: **Baskakov, A. V., Zaytseva, L. V., Misteneva, S. Y., Ruban, N. V.** (2024). World practice of wheat flour classification. *Food Systems,* 7(3), 420–426. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-420-426

изделий из муки мелкого помола процессы сахаро- и газообразования при замесе теста протекают более интенсивно. Крупные частицы муки имеют меньшую поверхность, что означает меньшую площадь контакта муки с водой, что приводит к снижению влажности теста [2]. Также на качество муки в значительной степени влияют следующие факторы: очистка и подготовка зерен пшеницы к помолу, формирование помольных смесей в зависимости от дисперсности, качество сырья и технологические приемы помола, формирование партий муки и состояние оборудования мельничных предприятий [3].

За рубежом пшеницу классифицируют как твердую (hard) и мягкую (soft) в зависимости от типа эндосперма. В характеристике помола зерна эти различия определяются как твердозерность и мягкозерность в соответствии с химическим составом муки и влияют на целевое использование конечного продукта. Твердозерную пшеницу обычно используют для выпечки хлеба, а мягкозерную — для изготовления кондитерских изделий [2].

Отсутствие распределения сортов и классов пшеницы и продуктов ее переработки, предназначенных для различных видов мучных изделий, на российском рынке препятствует повышению качества кондитерской продукции.

Целью обзора является анализ международных подходов к классификации зерна пшеницы и муки, который позволит определить оптимальные направления их использования для повышения качества и выхода готовой продукции.

2. Объекты и методы

Для исследования предметного поля были рассмотрены научные публикации российских и зарубежных авторов, посвященные критериям оценки качества пшеничной муки, основным характеристикам ее классификации. Эти исследования свидетельствуют о необходимости разделения пшеничной муки на классы для производства различных видов мучных изделий, включая кондитерские.

Поиск материалов для обзора осуществлялся в доступных на бесплатной основе базах ResearchGate, ScienceDirect, Scopus, при помощи научных электронных библиотек «КиберЛенинка», eLIBRARY, а также в открытых интернет-источниках.

Основными критериями отбора информации стали опубликованные за последние 10 лет статьи и обзоры на русском, английском, французском, итальянском и китайском языках. Охват публикаций на разных языках позволяет детальнее проанализировать состояние рынка. Учитывая быстро меняющиеся требования рынка, для оценки современных подходов к классификации пшеничной муки в разных странах мира мы посчитали необязательным проводить обзор публикаций более раннего периода.

Информационной базой также послужили аналитические материалы и справочные данные на официальных сайтах «Ассоциации производителей пшеницы США», «Совета по цельному зерну США», «Канадской зерновой комиссии», «Европейской комиссии Евросоюза», «Европейских стандартов классификаций зерна».

В контекст автоматического и ручного поиска были включены следующие комбинации ключевых слов: классификация пшеничной муки; критерии оценки качества пшеничной муки в различных странах; разделение пшеничной муки по типам; нормы содержания в муке белка, процента золы, качества клейковины; виды помола пшеничного зерна; разделение муки по классу используемого зерна.

В процессе анализа сохранялась информация об авторах, о годе издания, о ключевых выводах, относящихся к исследуемым вопросам, а также информация о идентификаторе объекта DOI (при наличии). Исключались дубли, нерелевантные источники и публикации с подтвержденным конфликтом интересов.

3. Результаты и обсуждение

«Американская пшеничная ассоциация» (U. S Wheat Associates) классифицирует пшеницу в США по шести классам. В основу классификации заложены различия по цвету, твердости и вегетационному периоду зерна [4]. Благодаря целому ряду качественных характеристик, потребители могут производить и использовать муку из зерна различных классов для любого конечного продукта (Таблица 1) [5,6].

В Канаде в 2017 году «Канадской Зерновой Комиссией» в «Руководстве по официальной классификации зерна» утверждена более развернутая классификация пшеницы, которая в зависимости от районов произрастания подразделяется на 3 группы: западную (western), прерии (североамериканская степь (prairie)) и восточную (eastern) [9]. При этом основная часть пшеницы относится к восточной группе (10 классов), меньшая часть — к западной (7 классов) и к прериям (2 класса). Каждый из классов, в свою очередь, подразделяется, в зависимости от значений показателей качества, на подклассы (от 2 до 5). Основные показатели качества — состояние зерна, содержание в нем белка и инородных веществ (Таблица 2) [7,8,9,10].

Северная Америка придерживается международных спецификаций и стандартов на качество зерна пшеницы, например ES665:2017 Пшеничное зерно — спецификация [11]. В данном стандарте прописано, что производители зерна пшеницы гарантируют соответствие его определенным показателям, при этом установлены также требования к подготовке земли под посев пшеницы и все этапы ее дальнейшей обработки. Применение этого стандарта помогает государственным органам оценить качество собранного урожая [11]. Класс зерна и соответствующее ему качество является основой для дальнейшего целевого использования муки [12].

Европейский союз является одним из крупнейших производителей и переработчиков пшеницы. В странах ЕС ежегодно перерабатывается около 47 миллионов тонн мягкой пшеницы и ржи, на более чем 3800 предприятиях занято 45 000 человек [13]. На Европу приходится 70% от общего объема экспорта пшеницы, она значительно опережает по этому показателю Северную Америку (14%), Азию (7%) и Океанию (7%). При этом мукомольный сектор стран ЕС является крупнейшим потребителем отечественных зерновых, что способствует производству около 600 различных видов муки, отвечающей высоким стандартам и уникальным запросам потребителей из различных стран. До 29% производимой в ЕС муки направляется на использование в промышленные пекарни, 28% — в ручные пекарни, 13% — на изготовление тортов, печенья и сухарей, 12% — в супермаркеты, 12% — для домашнего использования, а 6% — на другие цели и экспорт [14,15].

Различия в культурах потребления мучных изделий, основанных на вековых национальных традициях, нашли свое отражение в создании более сложной системы классификации зерна по сравнению с рассмотренными выше системами в США и Канаде. Общим подходом в системе классификации зерна в странах ЕС является

Таблица 1. **Классификация пшеницы в США**

Table 1. **Wheat classification in the USA**

Название класса	Целевое использование
Твердозерная краснозерная озимая (Hard red winter) HRW	Универсальная пшеница с высокими характеристиками помола пригодна для изготовления таких продуктов, как подовой хлеб, булочки, круассаны, лепешки, некоторые виды азиатской лапши. Используется в качестве улучшителя при производстве муки общего назначения.
Твердозерная краснозерная яровая (Hard red spring) HRS	Элитный сорт пшеницы, пригодна для производства таких продуктов, как домашний хлеб, булочки, круассаны, рогалики, пицца. Используется в качестве улучшителя в смесях муки.
Мягкозерная краснозерная озимая (Soft red winter) SRW	SRW является оптимальной для производства широкого ассортимента кондитерских изделий, таких как печенье, крекеры, торты и т. п. Используется для получения смесей муки для некоторых видов хлеба.
Мягкозерная белозерная (Soft White) SW	SW с низким содержанием влаги и с высокими характеристиками помола, обеспечивает белый цвет конечного продукта, идеально подходит для изготовления тортов, пирожных и других видов мучных кондитерских изделий.
Твердозерная белозерная (Hard White) HW	Пшеница пригодна для получения азиатской лапши, цельнозерновой муки или высокоэкстракционной муки, формового или плоского хлеба.
Дурум (Durum)	Самая твердая из всех видов пшеницы, имеет насыщенный янтарный цвет и высокое содержание глютена. Используется для производства макаронных изделий высшего качества, кускуса и некоторых средиземноморских сортов хлеба.

Таблица 2. **Классификация пшеницы в Канаде**
Table 2. **Wheat classification in Canada**

Название класса	Целевое использование
Западный регион	
Твердозерная краснозерная яровая (Canada Western Red Spring) CWRS	Обеспечивает превосходное качество выпеченных изделий благодаря определенному выбору помола. В зависимости от вида помола обеспечивает гарантированные уровни различного содержания белка в муке. Придает большой объем формовому хлебу, отдельно или в смесях с другими классами пшеницы рекомендуется для домашнего хлеба, лапши, плоского хлеба, макаронных изделий, изделий на пару.
Твердозерная краснозерная яровая (Canada Northern Hard Red) CNHR	Рекомендуется для производства подового хлеба, формового хлеба, лапши, изделий на пару.
Твердозерная краснозерная озимая (Canada Western Red Winter) CWRW	Обеспечивает хорошее качество помола. Подходит для французского хлеба, плоского хлеба, лапши, изделий на пару.
Экстра твердая краснозерная яровая (Canada Western Extra Strong) CWES	Обеспечивает получение муки с сильной клейковиной. Идеально подходит в приготовлении смесей муки и продуктов, для которых нужна сильная клейковина.
Краснозерная яровая (средней твердости) (Canada Prairie Spring Red) CPSR	Обеспечивает получение муки со средними показателями по силе для подового хлеба, формового хлеба, лапши.
Белозерная яровая (Canada Prairie Spring White) CPSW	Обеспечивает получение муки со средними показателями по силе для формового хлеба, лапши.
Янтарный дурум (Canada Western Amber Durum) CWAD	Обеспечивает высокий выход семолины и отличное качество макаронных изделий. Рекомендована для пасты и кускуса.
Мягкозерная белозерная яровая (Canada Western Soft White Spring) CWSWS	Пшеница с низким показателем содержания белка. Рекомендована для кондитерских изделий, некоторых видов хлеба, изделий на пару и лапши.
Твердозерная белозерная яровая (Canada Western Hard White Spring) CWHWS	Обеспечивает превосходное качество помола при производстве муки для хлебопродуктов и макаронных изделий.
Восточный регион	
Твердозерная краснозерная яровая (Canada Eastern Red Spring) CERS	Обеспечивает превосходное качество помола и выпеченных изделий. Придает большой объем формовому хлебу, отдельно или в смесях с другим классом пшеницы рекомендуется для изготовления домашнего хлеба, лапши, плоского хлеба, макаронных изделий, изделий на пару.
Твердозерная краснозерная озимая (Canada Eastern Hard Red Winter) CEHRW	Обеспечивает хорошее качество помола. Подходит для создания французского хлеба, плоского хлеба, лапши, изделий на пару.
Мягкозерная краснозерная озимая (Canada Eastern Soft Red Winter) CESRW	Пшеница с низким показателем содержания белка. Рекомендован для производства кондитерских изделий, зерновых хлопьев, крекеров, печенья и начинок.
Янтарный дурум (Canada Eastern Amber Durum) CEAD	Предназначена для изготовления пасты и кускуса.
Мягкозерная белозерная озимая (Canada Eastern White Winter) CEWW	Пшеница с низким показателем содержания белка. Рекомендована для производства кондитерских изделий, зерновых хлопьев, крекеров, печенья и начинок.

обязательное определение белка для твердых сортов пшеницы (Таблица 3). При этом отсутствует общая система стандартов для зерна и на практике используется понятие «среднего стандартного качества» зерна, применяемое при оценке соответствия требованиям интервенционных закупок ЕС. В странах Западной Европы не принято определять принадлежность зерна пшеницы к определенному классу. В связи с этим деление пшеницы происходит по типу произведенной из нее муки исходя из качественных показателей: выхода муки, содержания в ней белка, седиментации, числа падения. Также могут дополнительно использоваться показатели качества и количества клейковины или массовой доли влаги, в зависимости от конкретной страны (Таблица 4) [16,17].

Италия является лидером в мукомольной промышленности Европы, с 233 мельницами, производящими более 4 миллионов тонн муки в год. Итальянская мука, произведенная исключительно на территории страны, играет важную роль в национальной цепочке поставок пшеницы. Национальные продукты, произведенные из итальянской муки, высоко ценятся и служат основой для традиционных итальянских тортов и пирожных, по своим свойствам отличающихся от изделий, приготовленных по той же рецептуре, но из муки, производимой в других странах. До 61% муки, производимой в Италии, используется для выпечки хлеба и хлебобулочных изделий, таких как хрустящие таралли или гриссини (хлебные палочки), 18% — для производства тортов и бисквитов, 9% — для производства пиццы, 5% — для домашнего использования, 7% — для других продуктов и экспорта [7]. Ежегодно увеличивается спрос на продукты из органической или цельнозерновой муки и на инновационные продукты. За последнее десятилетие значительно увеличился экспорт итальянской муки из мягкой пшеницы, что повлияло на увеличение объема производства этого сорта муки на 350% и составило около 220 000 тонн/год. Так, например, экспорт итальянской муки в Индию увеличился на 560% [18].

Во Франции, по данным MI Prospects, официальная классификация пшеницы включает четыре сорта (E, A, B и K), разделение на которые основывается на следующих показателях: массовая доля белка, число падения и влажность [19].

Дальнейшее типирование муки во Франции и Италии осуществляется по принципу содержания белка (Таблица 3), при этом

Таблица 3. **Рекомендации по целевому использованию пшеничной муки в зависимости от содержания белка, принятые в странах ЕС**
Table 3. **Recommendations on the target use of wheat flour depending on the protein content accepted in the EU countries**

Тип муки	Общее содержание белка, %	Целевое использование
Мука для выпечки тортов (cake flour)	7,5–8.5	Пироги, хлеб быстрого приготовления, кексы, панкейки, блины
Кондитерская мука (pastry flour)	8–10	Открытые пироги и кондитерские изделия
Мука быстрого приготовления (instant flour)	9,5–11	Соусы и подливы
Отбеленная универсальная мука (bleached flour)	9,5–12	Мука общего назначения для некоторых видов хлебобулочных и мучных кондитерских изделий
Мука для хлеба (bread flour)	11,5–12.5	Дрожжевые сорта хлеба, паста, пицца
Мука из пшеницы дурум (семолины)	13–13,5	Паста

Таблица 4. **Пример классификации пшеницы по показателям качества муки в ЕС**
Table 4. **Example of wheat classification by flour quality indicators in the EU**

Параметр	Сорт муки			
	Экстра (E)	Высшее качество (A)	Среднее качество (B)	Мягкая мука (K)
Общее содержание белка, %	13,8	13,2	12,8	12,4
Выход муки, %	76	74	74	76
Число падения, сек.	285	255	255	235
Седиментация, мл.	47	33	26	19

Таблица 5. **Сводные данные типирования муки во Франции и Италии**

Table 5. **Summary data of flour typing in France and Italy**

Тип муки		Зола, %	Выход муки, %	Наименование (назначение) муки
Франция	Италия			
45	00	< 0,45	< 65	Кондитерская мука
55	0	~ 0,55	~ 70	Мука общего назначения
80	1	~ 0,8	~ 80	Мука с высоким содержанием клейковины
110	2	~ 1	~ 85	Мука низких сортов
150	Farina integrale	> 1,7	> 90	Цельнозерновая мука

Таблица 6. **Типирование муки по немецким стандартам**

Table 6. **Flour typing according to the German standards**

Тип муки	Содержание золы, %	Выход муки, %	Содержание белка, %
405	0,405	50	от 8 до 10
550	от 0,5 до 0,58	72	от 9 до 11
812	от 0,64 до 0,89	80	от 11 до 13
1050	< 1,05	—	от 13 до 14,5
1600	< 1,6	—	—
1700	< 1,7	—	—

вводятся дополнительные показатели качества зерна и устанавливаются рекомендации по применению произведенной из него муки. При этом принятые в этих странах классификации могут отличаться по дополнительному набору характеристик, таких как степень помола муки или количество минеральных примесей, а также иметь различное кодирование [20]. В Таблице 5 представлено сравнение некоторых типов муки двух стран с одинаковым целевым назначением.

Согласно французским стандартам, мука подразделяется на:

- испанскую муку (тип 45) — содержит не более 0,45% золы, отличается повышенной белизной и обычно используется для выпечки слоеных изделий;
- муку первого сорта (тип 55) — содержит не более 0,55% золы и используется для выпечки белого хлеба, булочек, пирожков и других изделий;
- муку высшего качества (тип 65) — содержит не более 0,65% золы, отличается более темным цветом по сравнению с мукой первого сорта и используется для выпечки грубых хлебов и пирогов;
- муку ржаную (типы 815 и 1370) — содержит от 0,8 до 1,37% золы, характеризуется темным цветом, ее часто используют для выпечки ржаного хлеба [21].

Согласно итальянским стандартам, мука подразделяется на:

- муку высшего качества (тип 00) — самая тонкая и очищенная мука, содержит минимальное количество золы, идеально подходит для выпечки белого хлеба, пасты и пиццы;
- муку первого сорта (тип 0) — содержит выраженные следы зерен, имеет более жесткую консистенцию, чем мука высшего качества, может быть использована для выпечки белого хлеба;
- муку второго сорта (типы 1 и 2) — содержит больше оболочек, чем мука первого сорта, используется для более плотных и темных хлебобулочных изделий и бисквитов;
- муку третьего сорта (типы 3 и 4) — содержит максимальное количество оболочек и клейковины, имеет самый темный цвет, используется для выпечки ржаного хлеба, хлеба с добавлением овсяной крупы и других зерновых [22].

По данным MI Prospects, в отличие от Франции и Италии, в Германии пшеница подразделяется на 6 сортов — E, A, B, EU, C и Unknown (неизвестная) — по следующим показателям: массовая доля белка, седиментация, выход муки [23].

Типизация немецкой муки (Mehltype) основана на ее зольности. В Таблице 6 приведены стандартные типы пшеничной муки (определенные в DIN10355:2017-11 [24]), которые варьируются от типа 405 для обычной белой пшеничной муки для выпечки до типов муки с повышенным содержанием белка (типы 550, 650, 812) и более темных сортов (типы 1050 и 1600) для цельнозернового хлеба. Эта система типизации действует в Германии с 1934 года, она была пересмотрена и дополнена в 1992 году в соответствии со стандартом DIN10355 (Deutsches Institut für Normung e.V.) [25].

Чем выше номер типа муки, тем больше в ней минеральных веществ (что повышает ее зольность) и белка, который делает тесто более плотным и эластичным.

В Китае на протяжении тысячелетней истории культивирования пшеницы сформировалась традиция готовить мучные изделия на пару, варить, запекать и обжаривать. Традиционными китайскими изделиями являются приготовленный на пару хлеб, лапша, клецки и жареные мучные изделия [26].

В Китае урожайность и качество пшеницы напрямую влияют на продовольственную безопасность, на удовлетворение потребительского спроса, а также на развитие мукомольной и пищевой промышленности. С быстрым развитием национальной экономики и постоянным повышением уровня жизни людей были выдвинуты более высокие требования к качественным показателям продуктов из пшеницы. В Китае разновидности пшеницы распределяются в зависимости от регионов выращивания, а также устанавливается взаимосвязь с количеством и качеством клейковины. В Таблице 7 представлена регионализация для выбора класса пшеницы и характеристика получаемой из него муки [27].

Из-за высокого содержания белка муку из твердой красной озимой пшеницы используют в производстве хлеба. Либо смешивают ее с мукой из мягких сортов пшеницы с целью получения муки общего назначения [28]. Твердая красная яровая пшеница содержит самое большое количество белка из всех сортов пшеницы. Как и твердую красную озимую пшеницу, твердую красную яровую измельчают для получения муки общего назначения и муки для хлеба. При выпечке разница между двумя классами твердой пшеницы невелика [29].

Мука из мягкой красной озимой пшеницы характеризуется низким содержанием белка. За счет этой особенности выпечка получается более рассыпчатой и хрустящей, чем из пшеничной муки с более высоким содержанием белка. Благодаря низкому содержанию белка она может быть использована для получения мучных кондитерских изделий, включая торты и пирожные, а также для выпечки лепешек.

Твердая белая пшеница напоминает твердую красную пшеницу по всем характеристикам, однако она не содержит генов, которые придают отрубям красную окраску. В результате мука из этой пшеницы получается более сладкой и мягкой, чем красная пшеничная мука, которую некоторые считают слегка горьковатой [30]. Поскольку она напоминает красную пшеницу по всем характеристикам, за исключением цвета, твердую белую пшеницу также измельчают для получения муки общего назначения и хлебопекарной муки [31].

Мягкая белая пшеница обладает теми же характеристиками, что и мягкая красная пшеница, за исключением цвета отрубей, и ее

Таблица 7. **Районное распределение посевов пшеницы в Китае**

Table 7. **Regional distribution of wheat crops in China**

Название класса	Субрегионы произрастания	Подходящий для посадки класс пшеницы	Характеристика муки
Яровая пшеница	Северо-восточный район	Красное зерно	Сильная клейковина
	Северный район	Красное зерно	Средняя клейковина
	Северо-западный район	Белое и красное зерно	Сильная клейковина
Озимая пшеница	Северный район	Белое зерно	Сильная клейковина
	Район Хуан-Хуай	Белое зерно	Средняя и сильная клейковина
	Район реки Янцзы	Красное зерно	Средняя и слабая клейковина
	Юго-западный район	Красное зерно	Средняя и слабая клейковина
	Площади в южном Китае	Красное зерно	Средняя и слабая клейковина
Озимая-яровая пшеница	Синьцзянская зона	Белое зерно	Средняя и сильная клейковина
	Уинхай-Тибетская зона	Красное зерно	Средняя клейковина

измельчают для получения муки общего назначения, муки для тортов (после дополнительного отбеливания), муки для кондитерских изделий и муки для приготовления мучных изделий в домашних условиях (с добавлением разрыхлителя и соли) [32].

Проведенный анализ позволил установить, что в странах-основных производителях пшеницы вопрос о выборе муки со свойствами, оптимальными для каждого вида мучных изделий, решается еще на мукомольных предприятиях [33]. Требования к муке четко дифференцированы: для мучных кондитерских изделий (с низким содержанием белка) и для хлебобулочных и макаронных изделий (с повышенным содержанием клейковины). При этом товарная классификация зерна предопределяет целевое использование полученной из него муки (Таблицы 3, 5).

В Российской Федерации действует два нормативных документа, определяющих качество зерна и муки, получаемой на его основе. Межгосударственный стандарт) ГОСТ 27186–86[1] устанавливает термин «твердость зерна», характеризующий его структурно-механические свойства, определяемый способностью зерна сопротивляться разрушающим усилиям во время дробления. Область определения стандарта распространяется на пшеницу хлебопекарную и для производства макаронных изделий [34].

В ГОСТ 9353–2016[2] приведена классификация зерна пшеницы на мягкую (*Triticum aestivum L.*) и твердую (*Triticum durum Desf.*). Дальнейшее деление муки на типы зависит от соотношения твердых и мягких зерен пшеницы в смеси, деление на подтипы основано на цвете и стекловидности зерна (Таблица 8) [35].

Таким образом, в Российской Федерации вся мука выпускается по стандартам для хлебопекарных и макаронных предприятий: ГОСТ 26574–2017[3], ГОСТ 31463–2012[4], ГОСТ 31491–2012[5]. Данные стандарты не содержат разделения зерна пшеницы вида *Triticum aestivum* по степени твердости, что приводит к тому, что среди зерна данного вида могут быть как твердозерные, так и мягкозерные сорта [2,3]. Если в европейских странах типизация муки происходит на основании содержания в ней белка, при этом показатель меняется в зависимости от типа муки в широком диапазоне от 7,5% до 13,5% (Таблица 3). В Российской Федерации этот показатель в муке разных сортов варьирует в узком диапазоне (10,3–11,7%) и приближен по европейским меркам к муке общего назначения, не подходящей для большинства кондитерских изделий. Поэтому, согласно ГОСТ 9353–2016[2], мука всех сортов, производимая в России, предназначается только для производства хлеба и хлебобулочных изделий (Таблица 9) [36].

В развитии кондитерской индустрии РФ приоритетным направлением является увеличение выпуска обогащенных и функциональных изделий, в частности, путем частичной замены пшеничной муки сырьем с повышенным содержанием пищевых волокон, омега-3 жирных кислот и других ценных нутриентов. Ассортимент мучных кондитерских изделий расширяется путем использования гречневой, овсяной, рисовой муки [37,38,39]. Наблюдается рост доли мучных изделий, не содержащих глютен, в производстве которых используются амарантовая, люпиновая мука, мука из семян чиа, а также другие виды зерновых и псевдозерновых культур [40,41,42,43].

Несмотря на широкий ассортимент выпускаемых мучных кондитерских изделий, существенно отличающихся по физико-химическим характеристикам, в России и странах ЕврАзЭС отсутствуют стандарты на муку для кондитерских изделий.

Присутствие на российском рынке только муки хлебопекарной, полученной из смеси различных сортов пшеницы *Triticum aestivum* с преобладанием твердозерных сортов, отличающихся повышенным содержанием белка и «сильной» клейковиной, а также крупным размером частиц, создает объективные трудности для производителей мучных кондитерских изделий. В результате предприятия кондитерской отрасли вынуждены сами подбирать муку, наиболее подходящую для определенных сортов мучных кондитерских изделий, для обеспечения высоких качественных характеристик готовому продукту [44,45].

Таблица 8. **Распределение типов пшеницы в России**
Table 8. **Distribution of wheat types in Russia**

Номер и наименование типа	Содержание зерен других классов, % не более		Характеристика подтипа		
	Всего	в том числе	Номер подтипа	Цвет	Общая стекловидность, %
Мягкая яровая краснозерная	10	5 твердой	1	Темно-красный	не менее 75
			2	Красный	не менее 60
			3	Светло-красный	не менее 40
			4	Преобладает желтый	менее 40
Твердая яровая	15	10 белозерной	1	Темно-янтарный	не менее 70
			2	Светло-янтарный	не ограничивается
Мягкая яровая белозерная	10	–	1	–	не менее 60
			2	–	менее 60
Мягкая озимая краснозерная	10	5 твердой	1	Темно-красный	не менее 75
			2	Красный	не менее 60
			3	Светло- или желто-красный	не менее 40
			4	Преобладает желтый	менее 40
Мягкая озимая белозерная	10	–	–	–	не ограничивается
Твердая озимая	15	–	–	–	не ограничивается

Таблица 9. **Сорта пшеничной хлебопекарной муки России**
Table 9. **Grades of wheat baker's flour in Russia**

Сорт муки	Количество белка, %	Количество клейковины, %	Выход муки, %
Высший сорт	10,3	28	25–30
Первый сорт	10,6	30	72
Второй сорт	11,7	25–28	85
Обойная	–	–	93–96
Крупчатка	–	30	10

4. Выводы

Аналитический обзор существующих подходов в классифицировании зерна пшеницы позволил установить, что страны-производители имеют свои стандарты и требования по классификации зерна и муки, которые могут отличаться друг от друга. В одних случаях большее внимание уделяется классификации зерна (США, Канада, Китай), в других случаях — типизации муки, основанной, в частности, на содержании в ней белка и зольности (Италия, Франция, Германия). На основании проведенного анализа сделан вывод о необходимости установления единых и общепризнанных систем классификаций пшеницы. Это поможет облегчить торговлю, повысить прозрачность рынка, укрепить доверие между участниками рынка из разных стран, а также поспособствует стимулированию развитие международных экономических отношений в сфере производства и переработки пшеничной муки.

При этом сравнение различных классификаций выявило их общую направленность — определение в конечном итоге целевого назначения того или иного типа (сорта) пшеничной муки в соответствии с ее физико-химическими показателями. Это облегчает производителям задачу выбора муки для конкретной области ее применения с целью получения продукта с приемлемыми потребительскими свойствами.

Также установлено, что во всех исследуемых странах для производства большинства мучных кондитерских изделий используется пшеница мягкозерных сортов, мука из которой характеризуется невысоким содержанием белка и низкой зольностью.

Несмотря на широкий ассортимент мучных кондитерских изделий на отечественном рынке, различающихся по своим физико-химическим характеристикам, в России выпускается только мука

[1] ГОСТ 27186–86 Зерно заготовляемое и поставляемое. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. — 10 с.
[2] ГОСТ 9353–2016 Пшеница. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. — 11 с.
[3] ГОСТ 26574–2017. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. (2019). М.: Стандартинформ, 2019. — 24 с.
[4] ГОСТ 31463–2012 Мука из твердой пшеницы для макаронных изделий. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. — 8 с.
[5] ГОСТ 31491–2012 Мука из мягкой пшеницы для макаронных изделий. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. — 11 с.

хлебопекарная общего назначения с преобладанием пшеницы твердозерных сортов с повышенным содержанием белка и с «сильной» клейковиной, а также с крупным размером частиц. По своим свойствам эта мука не подходит для производства большинства мучных кондитерских изделий. Изготовленные из нее мучные кондитерские изделия существенно уступают по своим качественным характеристикам импортным аналогам, что снижает их конкурентоспособность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Pagani, M. A. Marti, A., Bottega, G. (2014). Wheat milling and flour quality evaluation. Chapter in a book: Bakery Products Science and Technology, Second Edition. John Wiley and Sons, Ltd, 2014. https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch2
2. Баскаков, А. В. (2022). *Влияние продуктов переработки зерна пшеницы на формирование качественных характеристик печенья.* Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. М.: Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, 2022. [Baskakov, A. V. (2022). *The impact of wheat grain processing products on the formation щf quality characteristics of biscuit.* International scientific-practical conference of young scientists and specialists of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences. Moscow: V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 2022. (In Russian)]
3. Savenkova, T. V., Soldatova, E. A., Misteneva, S. Yu., Taleysnik, M. A. (2019). Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. *Food Systems*, 2(2), 13–19. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-13-19
4. Carcea, M., Turfani, V., Narducci, V., Melloni, S., Galli, V., Tullio, V. (2019). Stone milling versus roller milling in soft wheat: Influence on products composition. *Foods*, 9(1), Article 3. https://doi.org/10.3390/foods9010003
5. US wheat associates. (2013). Dependable people. Reliable wheat. Retrieved from https://www.uswheat.org/working-with-buyers/wheat-classes/ Accessed September 19, 2023
6. Bond, J., Lifert, O. (2017). Wheat forecast. USDA Economic Research Service, WHS-17b, 1–28. Retrieved from https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=83864 Accessed September 12, 2024
7. Шаймерденова, Д. А. (2018). Сравнительная характеристика классификаций зерна мягкой пшеницы Казахстана и основных зернопроизводящих стран. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* 80(1), 140–145. [Shaimerdenova, D. A. (2018). Comparative characteristics of grain classifications of soft wheat of Kazakhstan and the main grain-producing countries. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(1), 140–145. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-1-140-145
8. Ma, F., Baik, B. K. (2023). Grain and flour characteristics of eastern U.S soft winter wheat desirable for making soft-bite white salted noodles. *Cereal Chemistry*, 100(2), 445–459. https://doi.org/10.1002/cche.10625
9. Canadian Grain Commission. (2023). Canadian wheat classes. Retrieved from https://grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/grain-grading/wheat-classes.html Accessed October 10, 2023
10. Canadian Grain Commission. (2024). Official Grain Grading Guide. Retrieved from https://www.grainscanada.gc.ca/en/grain-quality/official-grain-grading-guide/pdf/OGGG-2024–25.pdf Accessed September 06, 2024
11. Ethiopian Standard ES665:2017. Second edition. (2017). Wheat grain is a characteristic. ICS: 67.060. Ethiopian Standards Agency, 2017.
12. Tozatti, P., Güldiken, B., Fleitas, M. C., Chibbar, R. N., Hucl, P., Nickerson, M. T. (2020). The interrelationships between wheat quality, composition, and dough rheology for a range of Western Canadian wheat cultivars. *Cereal Chemistry*, *97*(5), 1010–1025. http://dx.doi.org/10.1002/cche.10324
13. Kiszonas, A. M., Engle, D. A., Pierantoni, L. A., Morris, C. F. (2018). Relationships between falling number, a-amylase activity, milling, cookie, and sponge cake quality of soft white wheat. *Cereal Chemistry*, 95(3), 373–385. https://doi.org/10.1002/cche.10041
14. Баскаков, А. В. (2023). *Классификация пшеничной муки в некоторых странах Европейского Союза.* Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. М.: Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, 2023. [Baskakov, A. V. (2023). *Classification of wheat flour in some European Union countries.* International scientific-practical conference of young scientists and specialists of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences. Moscow: V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, 2023. (In Russian)]
15. Nadimi, M., Hawley, E., Liu, J., Hildebrand, K., Sopiwnyk, E., Paliwal, J. (2023). Enhancing traceability of wheat quality through the supply chain. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 2495–2522. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13150
16. Zanirato, S. (March 7–10, 2013). Wheat flour standards in European Union. Presentation presented at the TFIF International Grain Congress on "Wheat, Flour, Climatic Changes and New Trends". Antalya. Retrieved from http://www.tusaf.org/Eklenti/367, sandro-zaniratowheat-flour-standards-in-eupdf.pdf?0 Accessed October 27, 2023
17. European and Italian Flour Production. Retrieved from https://pureflourfromeurope.com/european-italian-flour-production/ Accessed October 30, 2023
18. Regulation (EU) No. 1308/2013 of the European Parliament and of the Council establishing a common organisation of the markets in agricultural products and repealing Council Regulations (EEC) No. 922/72, (EEC) No. 234/79, (EC) No. 1037/2001 and (EC) No. 1234/2007.
19. MI Prospects. (2021). Early Bird Survey. HGCA. Retrieved from https://ahdb.org.uk/cereals-oilseeds/early-bird-survey Accessed November 15, 2023
20. Popescu, A., Dinu, T. A., Stoian, E., Serban, V. (2021). Trends in the milling and baking industry in the EU-28 and Romania in the period 2015–2019. *Scientific Papers. Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 21(1), 601–612.
21. Yara. (2022). Les différentes catégories du blé. Retrieved from https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/ble/categorisation-ble/ Accessed November 29, 2023 [Yara (2022). The different categories of wheat. Retrieved from https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/ble/categorisation-ble/ Accessed November 29, 2023 (In French)]
22. Wheat quality and carboyhydrate research. North Dakota State University. Retrieved from https://www.ndsu.edu/faculty/simsek/wheat/overview.html Accessed September 9, 2024
23. Prabhasankar, P., Sudha, M. L., Haridas Rao, P. (2020). Quality characteristics of wheat flour milled streams. *Food Research International*, 33(5), 381–386. http://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00059-4
24. DIN10355:2017–11 Milled cereal products; requirements, types and testing. Mahlerzeugnisse aus Getreide; *Anforderungen, Typen, Prüfung* P. 8
25. Cook's info (2020). German flour. Retrieved from https://www.cooksinfo.com/german-flours Accessed November 15, 2023
26. Kim, M. J., Kim, S. S. (2017). Utilisation of immature wheat flour as an alternative flour with antioxidant activity and consumer perception on its baked product. *Food Chemistry,* 232(1), 237–244. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.007
27. Gao, Y., Wang, X., Shi, Y. (2022). The types, regional distribution, and consumption trend of Chinese traditional wheat-based foods. *Journal of Food Quality*. 2022, Article 9986119. https://doi.org/10.1155/2022/9986119
28. Wang, R., Y. Zhang, Y.K. (2018). Variability and relationship of quality characters of wheat at different product stages. *Journal of Triticeae Crops*, 38(8), 900–905.
29. Guttieri, M. J., Ahmad, R., Stark, J. C., Souza, E. (2000). End-use quality of six hard red spring wheat cultivars at different irrigation levels. *Crop Science*, 40(3), 631–635. https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403631x
30. Katagiri, M., Masuda, T., Tani, F., Kitabatake, N. (2011). Changes in textural properties of japanese tenobe somen noodles during storage. *Journal of Food Science*, 76(9), S500–S507. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02419.x
31. Wu, K., Gan, R., Dai, S., Cai, Y., Corke, H., Zhu, F. (2016). Buckwheat and millet affect thermal, rheological, and gelling properties of wheat flour. *Journal of Food Science*, 81(3), E627–E636. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13240
32. Zan, X. C., Zhou, G. Y., Wu, L. N. (2006). Present status of wheat quality in China. *Journal of Triticeae Crops*, 26(6), 46–49.
33. Sattarova, B., Makhmudova, A. (2023). The requirements for the quality and safety of flour confectionery products. *International Journal of Advance Scientific Research*, 3(01), 35–41. https://doi.org/10.37547/ijasr-03-01-07
34. Шершнева, П. С., Тимошенкова, И. А., Москвичева, Е. В. (2020). Влияние степени помола пшеничной муки на ее технологические характеристики. *Международный научно-исследовательский журнал*, 8–1(98), 100–104. [Shershneva, P. S., Timoshenkova, I. A., Moskvicheva, E. V. (2020). Influence of the grinding of wheat flour on its technological characteristics. *International Research Journal*, 8–1(98), 100–104. (In Russian)] https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.98.8.014
35. Рензяева, Т. В., Тубольцева, А. С., Рензяев, А. О. (2022). Мука различных видов в технологии мучных кондитерских изделий. *Техника и технология пищевых производств,* 52(2), 407–416. [Renzyaeva, T.V., Tuboltseva, A. S., Renzyaev, A. O., (2022). Various flours in pastry production technology. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(2), 407–416 (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2373
36. Саттфрова, Б. Н., Махмудова, А. А.-к., (2022). Классификация кондитерских изделий на основе товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности. *Международный журнал теоретических и практических исследований*, 2(10), 152–159. [Sattarova, B. N., Maxmudova, A. A.-g., (2022). Classification of confectionery products based on the commodity nomenclature of foreign economic activity. *International Journal of Theoretical and Practical Research,* 2(10), 152–159. (In Russian)] https://doi.org/10.5281/zenodo.7243958
37. Юдина, Т. А., Кандроков, Р. Х., Матюнина, А. В., Зайцева, Л. В. (2022). Ахлоридный хлеб, обогащенный омега-3 жирными кислотами и пищевыми волокнами. *Пищевая промышленность*, 2, 41–42. [Yudina, T. A., Kandrokov, R. H., Matyunina, A. V., Zaitseva, L. V. (2022). Achloride bread enriched with omega-3 fatty acids and dietary fiber. *Food Industry*, 2, 41–42. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.2.2.009
38. Nikitina, M., Nikitin, I., Kulakov, V. (2017). Applying simulation method in formulation of gluten-free cookies. *ITM Web of Conferences*, 10, Article 01008. https://doi.org/10.1051/itmconf/20171001008
39. Molinari, R., Costantini, L., Timperio, A. M. (2018). Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies. *Journal of Cereal Science*, 80, 37–43. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.11.011
40. Зайцева, Л. В., Юдина, Т. А., Рубан, Н. В., Бессонов, В. В., Мехтиев, В. С. (2020). Современные подходы к разработке рецептур безглютеновых хлебобулочных изделий. *Вопросы питания*, 89(1), 77–85. [Zaitseva, L. V., Yudina, T. A., Ruban, N. V., Bessonov, V. V., Mehdiyev, V.S. (2020). Modern approaches to the development of formulations of gluten-free bakery products. *Problems of Nutrition*, 89(1), 77–85. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10009
41. Урубков, С. А., Хованская, С. С., Смирнов, С. О. (2020). Перспективы использования амаранта и непропаренной гречихи в сухих безглютеновых смесях для детей с непереносимостью глютена. *Техника и технология пищевых производств,* 50(2), 232–241. [Urubkov, S. A., Khovanskaya, S. S.,

Smirnov, S. O. (2020). Prospects for using amaranth and native buckwheat in dry gluten-free mixes for children with gluten intolerance. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(2), 232–241. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-232-241
42. Жаркова, И. М., Сафонова, Ю. А., Густинович, В. Г., Ильева, Т. Л. (2020). Разработка технологии и оценка эффективности нового продукта — функционального безглютенового кекса. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 1, 70–85. [Zharkova, I. M., Safonova, Yu. A., Gustinovich, V. G., Ilyeva, T. L. (2020). Development of Technology and Evaluation of the Efficiency of a New Product -a Functional Gluten-Free Cup. *Storage and Processing of Farm Products*, 1, 70–85. (In Russian)] https://doi.org/10.36107/spfp.2020.215
43. Агафонова, С. В., Рыков, А. И., Мезенова, О. Я. (2019). Оценка биологической ценности белков люпина и перспектив его использования в пищевой промышленности. *Вестник Международной академии холода*, 2, 79–85. [Agafonova, S. V., Rykov, A. I., Mezenova, O. Ya. (2019). Biological value of lupine proteins and their prospects in the food industry. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*, 2, 79–85. (In Russian)] https://doi.org/10.17586/1606-4313-2019-18-2-79-85
44. Ческидова, А. С., Коломиец, С. Н., Сахарова, Е. А., Мелешкина, Е. П. (2015). *Классификация зерна и муки по целевому назначению — гарантия получения качественной и безопасной продукции.* IX Международная конференция молодых ученых и специалистов. Москва: РадиоСофт, 2015. [Cheskidova, A. S., Kolomiets, S. N., Sakharova, E. A., Meleshkina, E. P. (2015). Classification of grain and flour by purpose — guarantee of production of high-quality and safe products. The 9th International scientific-practical conference of young scientists and specialists. Moscow: RadioSoft, 2015. (In Russian)]
45. Николаева, М.А., Карташова, Л.В. (2018). Рынок зерномучных товаров: состояние и перспективы развития. Индустрия питания, 3(1), 77–85. [Nikolaeva, M. A., Kartashova, L. V., (2018). Grain and corn flour products market: conditions and development prospects. *Food Industry*, 3(1), 77–85 (In Russian)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Баскаков Андрей Владимирович — младший научный сотрудник, технологический отдел, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20/3 Тел.: +7–919–100–66–16 Аспирант, кафедра кондитерских, сахаристых, субтропических и пищевкусовых технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 E-mail: labmki@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-7043-7924 * автор для контактов	**Andrew V. Baskakov,** Junior Research, Technology Department, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry 20/3, Elektrozavodskaya str., 107023, Moscow, Russia Graduate Student, Department of Confectionery, Sugar, Subtropical and Food Technologies, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) 11, Volokolamskoe shosse, 125080, Moscow, Russia Tel.: +7–919–100–66–16 E-mail: labmki@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-7043-7924 * corresponding author
Зайцева Лариса Валентиновна — доктор технических наук, заведующая технологическим отделом, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20/3 Тел.: +7–495–962–17–35 E-mail: l.zaytseva@fncps.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0001-8176-1650	**Larisa V. Zaytseva**, Doctor of Technical Science, Head of Department Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry 20/3, Elektrozavodskaya str., 107023, Moscow, Russia Tel.: +7–495–962–17–35 e-mail: l.zaytseva@fncps.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0001-8176-1650
Мистенева Светлана Юрьевна — научный сотрудник, Технологический отдел, Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской промышленности 107023, Москва, ул. Электрозаводская, 20/3 Тел.: +7–495–962–17–35 E-mail: svetlana_mst@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-1439-7972	**Svetlana Yu. Misteneva**, Researcher, Technology department, All-Russian Scientific Research Institute of Confectionery Industry 20/3, Elektrozavodskaya str., 107023, Moscow, Russia Tel.: +7–495–962–17–35 E-mail: svetlana_mst@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-1439-7972
Рубан Наталья Викторовна — кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой кондитерских, сахаристых, субтропических и пищевкусовых технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 11 Тел.: +7 910 480–63–88 E-mail: labmki@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0003-2511-172X	**Natalia V. Ruban**, Candidate of Technical Science, Docent, Head of the Department of Confectionery, Sugar, Subtropical and Food Technologies, Russian Biotechnological University (BIOTECH University) 11, Volokolamskoe shosse, 125080, Moscow, Russia Tel.: +7 910 480–63–88 E-mail: labmki@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0003-2511-172X
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-427-437

Поступила 27.04.2024
Поступила после рецензирования 23.09.2024
Принята в печать 26.09.2024
© Посокина Н. Е., Бессараб О. В., Карастоянова О. В., Коровкина Н.В, 2024

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

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МАРКЁРОВ КАЧЕСТВА ШАМПИНЬОНОВ (*AGARICUS BISPORUS*)

Посокина Н. Е., Бессараб О. В.*, Карастоянова О. В., Коровкина Н. В.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
Agaricus bisporus, физико-химические показатели, маркёры качества, полимерная упаковка, условия хранения

АННОТАЦИЯ

Agaricus bisporus являются наиболее распространёнными среди культивируемых грибов. Шампиньоны являются источником хитина, гликогена и минеральных веществ, а также обладают привлекательными органолептическими свойствами. Физико-химические и органолептические показатели свежих *Agaricus bisporus* при хранении претерпевают значительные изменения вследствие транспирации влаги, дыхания и окислительных процессов. Целью настоящей работы являлось исследование влияния условий хранения культивируемых шампиньонов с неокрашенным эпителием шляпки на динамику их физико-химических показателей, а также её взаимосвязь с изменением органолептических показателей. Грибы хранили в холодильных камерах при постоянных температурах +2 °С и +6 °С в полипропиленовых лотках, помещённых, в пакеты из двуосноориентированной полипропиленовой (ВОРР) перфорированной плёнки и полиэтиленовой (РЕ) плёнки без перфорации. При всех исследованных условиях хранения характер динамики физико-химических показателей близок к линейному (за исключением влажности плодовых тел при хранении в РЕ-плёнке) — рассчитанные значения коэффициента корреляции Пирсона составляют от 0,67 до 0,97. Посредством двухфакторного дисперсионного анализа подтверждено влияние как упаковочного материала, так и температуры хранения на динамику содержания растворимых сухих веществ и плотности ткани гриба. При хранении в РЕ-плёнке без перфорации наблюдается более интенсивная отрицательная динамика этих критериев по сравнению с хранением в перфорированной ВОРР-плёнке. Выявленное различие объясняется тем, что в упаковке из РЕ-плёнки без перфорации к концу хранения формируются условия для анаэробного дыхания — содержание кислорода снижается с 20,5% до 1,5–2,5%, что также способствует активации процессов гниения. При повышении температуры хранения наблюдается более интенсивное изменение физико-химических показателей, что связано с увеличением скорости метаболизма. Статистически подтверждена взаимосвязь динамики всех исследованных физико-химических маркёров качества с динамикой сенсорных оценок (за исключением маркёра «содержание растворимых сухих веществ» при хранении в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре 2 °С). По результатам проведённых исследований подтверждена применимость критериев «влажность плодовых тел», «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба» в качестве маркёров для оценки качества культивируемых *Agaricus bisporus*.

Received 27.04.2024
Accepted in revised 23.09.2024
Accepted for publication 26.09.2024
© Posokina N. E., Bessarab O. V., Karastoyanova O. V., Korovkina N. V., 2024

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

THE INFLUENCE OF STORAGE CONDITIONS ON THE DYNAMICS OF PHYSICOCHEMICAL MARKERS OF CHAMPIGNON (*AGARICUS BISPORUS*) QUALITY

Natalya E. Posokina, Olga V. Bessarab*, Olga V. Karastoyanova, Nadezhda V. Korovkina

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

KEY WORDS:
Agaricus bisporus, physicochemical indicators, quality markers, polymer packaging, storage conditions

ABSTRACT

Agaricus bisporus are the most common cultivated mushrooms. Champignons are a source of chitin, glycogen and minerals, and also have attractive organoleptic properties. Physicochemical and organoleptic characteristics of fresh *Agaricus bisporus* undergo significant changes during storage due to moisture transpiration, respiration and oxidative processes. The purpose of this work was to study the influence of storage conditions of cultivated champignons with unstained cap epithelium on the dynamics of their physicochemical parameters, as well as its relationship with changes in organoleptic parameters. The mushrooms were stored in refrigerated chambers at a constant temperature of +2 °C and +6 °C in polypropylene trays placed in bags made of biaxially oriented polypropylene (BOPP) perforated film and polyethylene (PE) film without perforation. Under all storage conditions studied, the nature of the dynamics of physicochemical parameters was close to linear (with the exception of the humidity of fruiting bodies when stored in PE film) — the calculated values of the Pearson correlation coefficient ranged from 0.67 to 0.97. Using two-factor analysis of variance, the influence of both packaging material and storage temperature on the dynamics of soluble solids content and mushroom tissue density was confirmed. When stored in PE film without perforation, a more intense negative dynamics of these criteria was observed compared to storage in perforated BOPP film. The identified difference is explained by the fact that in packaging made of PE film without perforation, conditions for anaerobic respiration were formed by the end of storage — the oxygen content decreased from 20.5% to 1.5–2.5%, which also contributed to the activation of decay processes. With increasing storage temperature, a more intense change in physicochemical parameters was observed, which was associated with an increase in metabolic rate. The relationship between the dynamics of all studied physicochemical quality markers and the dynamics of sensory assessments (with the exception of the marker "content of soluble solids" when stored in a perforated BOPP film at a temperature of 2 °C) has been statistically confirmed. Based on the results of the studies, the applicability of the criteria “humidity of fruiting bodies”, “content of soluble dry substances” and “density of fungal tissue” as markers for assessing the quality of cultivated *Agaricus bisporus* was confirmed.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Посокина, Н. Е., Бессараб, О. В., Карастоянова, О. В., Коровкина, Н.В** (2024). Влияние условий хранения на динамику физико-химических маркёров качества шампиньонов (*Agaricus bisporus*). *Пищевые системы*, 7(3), 427–437. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-427-437

FOR CITATION: **Posokina, N. E., Bessarab, O. V., Karastoyanova, O. V., Korovkina, N. V.** (2024). The influence of storage conditions on the dynamics of physicochemical markers of champignon (*Agaricus bisporus*) quality. *Food Systems,* 7(3), 427–437. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-427-437

1. Введение

Грибы, как дикорастущие, так и культивируемые, популярны во многих странах мира в качестве деликатеса. Среди более чем 20 видов культивируемых грибов доминирующими являются *Agaricus bisporus* (шампиньоны двуспоровые). Помимо органолептических свойств, представляет интерес их химический состав и пищевая ценность [1]. Так, шампиньоны могут рассматриваться в качестве источника полисахаридов (гликоген, хитин) и минеральных веществ (калий, фосфор и др.) [2,3,4,5].

Культивируемые *Agaricus bisporus*, характеризующиеся высокой активностью воды, относятся к категории скоропортящихся продуктов. В процессе хранения шампиньонов происходит транспирация свободной (несвязанной) влаги, в результате чего тургор плодовых тел уменьшается [6]. Также наблюдается частичное разрушение клеточных стенок вследствие окисления хитина в процессе дыхания [7,8,9]. В свежих шампиньонах содержится большое количество тирозиназы, деятельность которой приводит к ферментативному потемнению при хранении. Эти процессы отрицательно сказываются на потребительских свойствах грибов [10].

Комбинирование пониженной температуры хранения, оптимальной влажности и модифицированной газовой среды позволяет замедлить интенсивность дыхания, транспирацию влаги и скорость биохимических процессов [11,12,13].

Изменение содержания кислорода и диоксида углерода внутри упаковки обычно осуществляется путём создания пассивной модифицированной газовой среды, которая формируется за счёт естественного дыхания грибов в процессе их хранения — снижение содержания кислорода и накопление углекислого газа, за счёт чего и уменьшается интенсивность дыхания [14,15]. Однако, излишнее увеличение концентрации углекислого газа в объёме упаковки приводит к анаэробному дыханию, при котором происходит неполное окисление углеводов с накоплением спиртов, альдегидов, карбоновых кислот, оказывающих отрицательное влияние на органолептические показатели грибов [16]. Кроме того, в анаэробных условиях активизируется деятельность гнилостных микроорганизмов. Таким образом, полимерные упаковочные материалы должны обладать газопроницаемостью, достаточной для удаления избытков углекислого газа [17]. С целью торможения гнилостных процессов также важно поддержание оптимальной влажности в объёме упаковки, что обычно обеспечивается за счёт применения плёнок с необходимой паропроницаемостью [18,19]. Оптимальным вариантом упаковки для свежих культивируемых *Agaricus bisporus* является двуосноориентированная полипропиленовая плёнка (BOPP) с перфорацией. Такая плёнка, благодаря высокой механической прочности, обеспечивает защиту грибов от случайных повреждений. Регулирование диаметра отверстий и плотности перфорации позволяет создать оптимальные условия для влаго- и газообмена [20,21,22].

В наших прошлых исследованиях было установлено, что физико-химические и органолептические показатели шампиньонов претерпевают статистически значимые изменения в процессе хранения. С учётом полученных результатов, в качестве маркёров качества были выбраны плотность (тургор) ткани, влажность плодовых тел и содержание растворимых сухих веществ [23,24,25,26].

Также важное значение имеют потребительские свойства свежих культивируемых *Agaricus bisporus*. При хранении наблюдается заметное ухудшение их органолептических показателей [27,28]. Транспирация влаги и расходование на дыхание хитина, составляющего клеточную стенку грибов, приводит к потере тургора, к частичной деформации (сморщиванию) и к формированию пустот внутри плодовых тел шампиньонов. Действие тирозиназы влечёт за собой изменение цвета поверхности — от розовато-белого у свежих шампиньонов до жёлтого и коричневого к окончанию хранения. В процессе хранения также происходит дозревание грибов, вследствие чего наблюдается раскрытие шляпки, потемнение и размягчение гименофора (пластин), удлинение ножки [29,30,31].

Целью настоящей работы было изучение влияния условий хранения на динамику физико-химических показателей — маркёров качества культивируемых *Agaricus bisporus* с неокрашенным эпителием шляпки. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- исследовать динамику физико-химических показателей *Agaricus bisporus* в процессе хранения при различных температурных условиях;
- исследовать динамику физико-химических показателей *Agaricus bisporus* в процессе хранения с учётом применяемых упаковочных материалов;
- исследовать взаимосвязь между динамикой физико-химических и органолептических показателей *Agaricus bisporus*.

2. Объекты и методы

2.1. Объекты исследования. Условия хранения

Объектами исследований являлись промышленно культивируемые шампиньоны двуспоровые (*Agaricus bisporus*) с неокрашенным эпителием шляпки среднего размера. Грибы были выращены в производственном комплексе, расположенном в Каширском районе Московской области. При подготовке к эксперименту свежие *Agaricus bisporus* подвергали визуальной инспекции, отбраковывая плодовые тела, имеющие неоднородный цвет поверхности, механические повреждения, частично или полностью раскрытую шляпку, неудаляемые загрязнения, а также значительно отличающиеся по размеру.

Грибы упаковывали в термоформованные лотки из полипропилена (PP), помещённые в пакеты из полимерной плёнки:

- перфорированной полипропиленовой двуосноориентированной (BOPP);
- полиэтиленовой (PE).

Количество грибов в одной упаковке — 5 штук.

Хранение шампиньонов осуществляли в холодильной камере при постоянной температуре 2 ± 1 °C и 6 ± 1 °C и относительной влажности воздуха 85%. Срок хранения составлял 21 сутки. Для отслеживания динамики органолептических и физико-химических показателей в процессе хранения осуществляли выемки на 0, 3, 8, 13, 16 и 21 сутки. Количество упаковок в одной выемке, хранившихся при одной температуре и с одним видом плёнки — 2 штуки.

Было проведено 2 серии параллельных испытаний в идентичных условиях.

2.2. Содержание растворимых сухих веществ

Содержание растворимых сухих веществ в плодовых телах определяли с помощью рефрактометра Аббе (ATAGO, Япония) по методике, установленной ГОСТ ISO 2173-2013[1] Для этого грибы предварительно измельчали и экстрагировали жидкую фазу через фильтрующий материал. Полученный фильтрат наносили на призму рефрактометра и проводили измерение в соответствии с инструкцией к прибору.

2.3. Определение влажности

Влажность плодовых тел измеряли ускоренным термогравиметрическим методом с применением нагрева инфракрасным излучением посредством анализатора влажности Sartorius MA35 (Sartorius, Германия). Измельчённую до пюреобразного состояния навеску массой 1,5–2 г наносили на предварительно взвешенный фильтр из стекловолокна. Кювету из алюминиевой фольги также предварительно взвешивали. Затем кювету вместе с подготовленной навеской помещали в держатель анализатора, устанавливали температуру нагрева 120 °C и запускали измерение. Регистрация изменения массы в процессе высушивания производилась в автоматическом режиме. По достижении постоянной массы навески испытание автоматически прекращалось.

2.4. Определение плотности

Плотность (упругость) ткани гриба измеряли пенетрометрическим методом с применением пенетрометра плодового FR-5120 (Lutron, Тайвань). Измерение проводили равномерным погружением наконечника диаметром 0,2 см в серединную часть шляпки гриба в течение 2–3 секунд. Пенетрометр показывает на дисплее выраженное в килограммах усилие, оказываемое на поверхность шляпки. Плотность ткани гриба (P, кг/см^2) рассчитывали по формуле:

$$P = 4N/\pi d^2 \quad (1)$$

где N — показания пенетрометра, кг;

d — диаметр наконечника, см.

2.5. Измерение газового состава

Газовый состав внутри упаковок определяли с помощью многокомпонентного газоанализатора МАГ-6 П-У (АО «Эксис», Россия), предназначенного для измерения объемной доли кислорода и диоксида углерода. Пробы из упаковки отбирали путем прокалывания плёнки и погружения пробоотборной иглы, соединенной газосбор-

[1] ГОСТ ISO 2173-2013 ««Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ» М.: Стандартинформ, 2019. — 13 с.

ной трубкой с входным штуцером прибора. Газоанализатор производит непрерывный забор газа, анализирует данные от встроенных сенсоров и индуцирует значение объемной доли газов в процентах. Результаты измерений отображаются на экране прибора. Измерение содержания кислорода производится посредством электрохимических сенсоров, пропорционально преобразующих парциальное давление газов в ток. Измерение содержания диоксида углерода производится посредством инфракрасных сенсоров, измеряющих поглощение электромагнитной волны специфичной длины для анализируемого вещества.

2.6. Контроль температуры и влажности

Температуру и влажность в холодильных камерах при хранении упаковок с шампиньонами контролировали и фиксировали с помощью регистратора температуры и влажности модели DT-172 (CEM, Китай). Регистратор позволяет контролировать и фиксировать измеряемые значения в течение длительного периода времени. Показания сохраняются на компьютер через программу для чтения и переноса данных.

2.7. Исследование органолептических показателей

Органолептические показатели исследовали профильно-дескрипторным методом, в соответствии с ГОСТ ISO 16779-2017[2] и ГОСТ ISO 13299-2015[3]. Система дескрипторов была разработана по результатам исследований прошлых лет [24, 29]. Дескрипторная модель включает в себя 12 дескрипторов, объединённых в 4 кластера: «внешний вид», «цвет», «структура», «запах». Дескрипторы представляют собой органолептические характеристики шампиньонов, подверженные изменению вследствие биохимических процессов, протекающих при хранении. Дескрипторная модель представлена на Рисунке 1. Квалиметрическая шкала отражает степень наблюдаемых изменений, где оценка «5» соответствует отсутствию изменений, а оценка «0» — полной потере потребительских свойств (Таблица 1).

Для проведения испытаний была сформирована дегустационная комиссия из 7 сотрудников лаборатории. Квалиметрические оценки по каждому из испытуемых образцов фиксировали в дегустационных листах единого формата. Обработка результатов дегустации включает в себя составление органолептических профилей на основании средних оценок по кластерам «внешний вид», «структура», «цвет», «запах цельного гриба» и «запах на разрезе».

Рисунок 1. **Дескрипторная модель для органолептической оценки свежих культивируемых *Agaricus bisporus***

Figure 1. **Descriptor model for sensory evaluation of fresh cultivated *Agaricus bisporus***

Таблица 1. **Квалиметрическая шкала для органолептической оценки свежих культивируемых *Agaricus bisporus***

Table 1. **Qualimetric scale for organoleptic evaluation of fresh cultivated *Agaricus bisporus***

Оценка, баллы	Описание
5	признаки порчи отсутствуют, органолептические характеристики полностью соответствуют требованиям ГОСТ Р 56827-2015
4	присутствуют незначительные естественные изменения, не влияющие на пригодность к употреблению
3	более выраженные естественные изменения; пригодны к употреблению или переработке
2	сильно выраженные естественные изменения; пригодны к переработке при определённых условиях
1	значительные естественные изменения; для оценки возможности переработки необходимы дополнительные испытания
0	порча, признаки гниения; непригодно для употребления и переработки

Среднюю квалиметрическую оценку для каждого из кластеров (K) рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{3} D_i}{3} \quad (2)$$

где D_i — средняя квалиметрическая оценка по дескриптору.

Площадь полученных профилей (S_p) рассчитывали по формуле:

$$S_p = \left(0{,}5\sin\frac{2\pi}{5}\right)\left(K_1K_2 + K_2K_3 + K_3K_4 + K_4K_5 + K_5K_1\right) \quad (3)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 — средние квалиметрические оценки по каждому из кластеров.

2.8. Статистический анализ

Статистический анализ полученных экспериментальных данных осуществляли при помощи программного обеспечения Microsoft Excel, в т. ч. посредством надстройки «Пакет анализа данных». Расчёты проводили для объединённых данных из 2 серий параллельных испытаний.

По каждой из выемок (точек) для определяемых маркёров (показателей) были рассчитаны:

- средние значения — посредством встроенной функции «СРЗНАЧ»;
- стандартные (средние квадратические) отклонения — посредством встроенной функции «СТАНДОТКЛОН.В»;
- коэффициент вариации (V, %) по формуле:

$$V = \frac{\delta}{\bar{X}} \times 100\% \quad (4)$$

где δ — стандартное отклонение;

$\bar{X}$ — среднее значение.

- доверительный интервал — посредством встроенной функции «ДОВЕРИТ.НОРМ» (при доверительной вероятности 0,95).

Проверку статистической значимости различий между полученными средними значениями для двух выемок (точек) проводили с помощью парного t-теста (Стьюдента) при уровне значимости 0,05, с использованием инструмента анализа данных «Парный двухвыборочный t-тест для средних».

Количество повторностей для каждой из выемок (точек), в зависимости от определяемых маркёров, представлено в Таблице 2.

Для оценки характера динамики исследованных маркёров качества были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (r_{xy}) посредством инструмента анализа данных «Корреляция».

Для маркёров, динамика которых характеризуется высокой тесноты линейной связи (при $|r_{xy}| \geqslant 0{,}7$; в соответствии с правилом Чеддока), а также установлены статистически значимые различия между выемками (точками) на 0 и 21 сутки, были выведены уравнения линейной регрессии, коэффициенты для которых были рассчитаны посредством инструмента анализа данных «Регрессия».

Значимость влияния вида упаковочной плёнки и температуры хранения на динамику маркёров качества *Agaricus bisporus* оценивали посредством дисперсионного анализа (ANOVA), с применением

[2] ГОСТ ISO 16779-2017 «Органолептический анализ. Оценка (определение и верификация) срока годности пищевой продукции» М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.

[3] ГОСТ ISO 13299-2015 «Органолептический анализ. Методология. Общее руководство по составлению органолептического профиля» М.: Стандартинформ, 2016. — 28 с.

Таблица 2. **Количество повторностей**
Table 2. **Number of repetitions**

Наименование маркёра	Кол-во серий испытаний, шт.	Кол-во упаковок в одной выемке, шт.	Повторностей на 1 упаковку, шт.	Всего повторностей, шт.
Органолептические показатели[1]	2	2	35[2]	140
Содержание растворимых сухих веществ	2	2	3	12
Плотность ткани гриба	2	2	5	20
Влажность	2	2	2	8

Примечание: [1] для каждого из дескрипторов; [2] по 5 оценок от каждого из 7 дегустаторов.

инструмента «Двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями». В качестве данных для ANOVA использовали разность между значениями маркёров на 0 и 21 сутки (Δ_X), рассчитанную по формуле:

$$\Delta_X = \bar{X}_0 - \bar{X}_{21} \quad (5)$$

где $\bar{X}_0, \bar{X}_{21}$ — средние значения маркёров на 0 и 21 сутки хранения, соответственно.

Взаимосвязь между динамикой различных исследованных маркёров оценивали посредством инструмента анализа данных «Корреляция».

3. Результаты и обсуждение

В Таблице 3 приведены расчётные данные по исследованным физико-химическим маркёрам качества *Agaricus bisporus;* в Таблице 4 — абсолютные значения t-критерия для пар точек на 0 и 21 сутки.

Таблица 4. **Парный t-критерий для выемок на 0 и 21 сутки**
Table 4. **Paired t-test for 0 and 21day samples**

Значение t-критерия	Исследуемые маркёры		
	Влажность плодовых тел, %	Содержание растворимых сухих веществ, %	Плотность ткани гриба, кг/см^2
Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 2 °C			
расчётное	3,95	3,67	4,03
критическое	2,36	2,20	2,09
Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 6 °C			
расчётное	3,97	10,03	5,99
критическое	2,36	2,20	2,09
Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 2 °C			
расчётное	0,88	4,78	9,69
критическое	2,36	2,20	2,09
Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 6 °C			
расчётное	3,23	6,84	11,01
критическое	2,36	2,20	2,09

Из расчётных значений коэффициента вариации (менее 33%) следует, что полученные экспериментальные данные по выемкам для каждого из физико-химических маркёров качества, представляют собой однородные совокупности. Таким образом, уровни маркёров для каждой из точек (выемок) могут быть охарактеризованы расчётным средним значением. Расчётное значение парного t-критерия для выемок на 0 и 21 сутки у всех исследованных маркёров превышает критические значение (Таблица 4), т. е. изменения уровней маркёров в процессе хранения являются значимыми.

Таблица 3. **Физико-химические маркёры качества *Agaricus bisporus***
Table 3. **Physicochemical quality markers of *Agaricus bisporus***

Сутки	Исследуемые маркёры											
	Влажность плодовых тел, %				Содержание растворимых сухих веществ, %				Плотность ткани гриба, кг/см^2			
	X_{AV}[1]	S[2]	V, %[3]	ε[4]	X_{AV}	S	V, %	ε	X_{AV}	S	V, %	ε
Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 2 °C												
0	91,73	1,31	1,43	0,91	7,43	0,73	9,76	0,41	26,08	5,34	20,48	2,34
3	91,55	0,86	0,94	0,59	7,03	0,70	9,89	0,39	21,23	3,09	14,54	1,35
8	91,66	0,69	0,76	0,48	6,75	0,61	9,10	0,35	22,18	3,21	14,46	1,41
13	91,16	0,70	0,77	0,49	7,22	0,61	8,41	0,34	20,53	3,46	16,84	1,52
16	90,81	1,69	1,87	1,17	7,24	1,41	19,47	0,80	20,65	3,35	16,22	1,47
21	90,17	0,50	0,55	0,34	7,95	0,41	5,21	0,23	21,00	2,80	13,31	1,23
Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 6 °C												
0	91,73	1,31	1,43	0,91	7,43	0,73	9,76	0,41	26,08	5,34	20,48	2,34
3	92,20	0,28	0,30	0,19	6,40	0,26	4,11	0,15	21,46	2,69	12,54	1,18
8	92,16	0,54	0,59	0,38	6,03	0,42	6,90	0,24	21,89	3,22	14,71	1,41
13	91,31	0,95	1,04	0,66	6,22	0,50	8,08	0,28	21,19	3,52	16,61	1,54
16	91,67	0,72	0,78	0,50	5,73	0,29	5,11	0,17	19,33	3,59	18,55	1,57
21	91,01	1,00	1,10	0,70	6,26	0,61	9,74	0,34	17,80	3,19	17,94	1,40
Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 2 °C												
0	91,73	1,31	1,43	0,91	7,43	0,73	9,76	0,41	26,08	5,34	20,48	2,34
3	91,70	0,51	0,56	0,35	6,98	0,35	4,99	0,20	21,16	3,87	18,29	1,70
8	91,67	0,75	0,81	0,52	6,84	0,63	9,19	0,36	21,54	2,19	10,15	0,96
13	92,12	0,63	0,69	0,44	6,48	0,52	8,08	0,30	19,82	2,86	14,40	1,25
16	91,88	0,57	0,62	0,39	6,50	0,36	5,60	0,21	17,99	3,28	18,25	1,44
21	92,08	0,45	0,48	0,31	6,22	0,19	3,13	0,11	17,15	3,32	19,39	1,46
Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 6 °C												
0	91,73	1,31	1,43	0,91	7,43	0,73	9,76	0,41	26,08	5,34	20,48	2,34
3	92,11	0,55	0,60	0,38	6,48	0,14	2,10	0,08	21,11	3,29	15,59	1,44
8	92,19	0,41	0,45	0,29	6,22	0,19	3,05	0,11	20,11	3,63	18,05	1,59
13	92,36	0,59	0,64	0,41	5,88	0,32	5,44	0,18	17,25	3,60	20,86	1,58
16	92,89	0,50	0,54	0,34	5,31	0,55	10,27	0,31	16,16	3,84	23,74	1,68
21	93,14	0,29	0,31	0,20	5,18	0,57	11,00	0,32	14,76	3,54	23,98	1,55

Примечание: [1] X_{AV} — среднее значение; [2] S — стандартное отклонение; [3] V — коэффициент вариации; [4] ε — доверительный интервал.

В Таблице 5 представлены расчётные значения коэффициентов корреляции Пирсона, указывающих на характер тесноты линейной связи физико-химических маркёров качества и продолжительности хранения *Agaricus bisporus*.

Таблица 5. **Расчётные значения коэффициентов корреляции Пирсона для определения характера динамики физико-химических маркёров качества**

Table 5. **Calculated values of Pearson correlation coefficients for determining the nature of the dynamics of physicochemical quality markers**

Условия хранения	Температура хранения, °С	r_{xy}		
		Влажность плодовых тел	Содержание растворимых сухих веществ	Плотность ткани гриба
ВОРР перфорированная	2	–0,93	–0,51	–0,70
	6	–0,73	–0,67	–0,90
РЕ	2	0,78	–0,97	–0,92
	6	0,96	–0,96	–0,96

Из расчётных значений коэффициента корреляции следует, что для всех исследованных маркёров при всех условиях хранения (за исключением маркёра «содержание растворимых сухих веществ» при хранении в ВОРР-плёнке) характерна тесная линейная взаимосвязь между уровнем маркёра и продолжительностью хранения.

Уравнения линейной регрессии для маркёра «влажность» имеют вид:

$$y = -0{,}07x + 91{,}89 \quad (6)$$

$$y = -0{,}04x + 92{,}11 \quad (7)$$

$$y = 0{,}06x + 91{,}76 \quad (8)$$

(6) — Упаковочная плёнка — ВОРР перфорированная; температура хранения t = 2 °С;
(7) — Упаковочная плёнка — ВОРР перфорированная; температура хранения t = 6 °С;
(8) — Упаковочная плёнка — РЕ; температура хранения t = 6 °С.

На Рисунке 2 представлены графики линейной регрессии для маркёра «влажность», построенные на основании уравнений (6) — (8), а также фактическая динамика маркёра, рассчитанная на основе средних значений, представленных в Таблице 3.

При хранении *Agaricus bisporus* в перфорированной ВОРР-плёнке коэффициент линейной регрессии и коэффициент корреляции имеют отрицательные значения, т. е. наблюдается уменьшение влажности плодовых тел в процессе хранения. При хранении в полиэтиленовой плёнке без перфорации наблюдается положительная динамика маркёра «влажность» (уравнения (6) — (8), Таблица 5). Выявленное различие обусловлено тем, что при хранении грибов в упаковке из перфорированной плёнки влага, в т. ч. выделяющаяся при дыхании, удаляется из объёма упаковки, а в случае отсутствия перфорации — частично сорбируется тканью гриба.

Уравнения линейной регрессии для маркёра «содержание растворимых сухих веществ» при хранении в полиэтиленовой плёнке имеют вид:

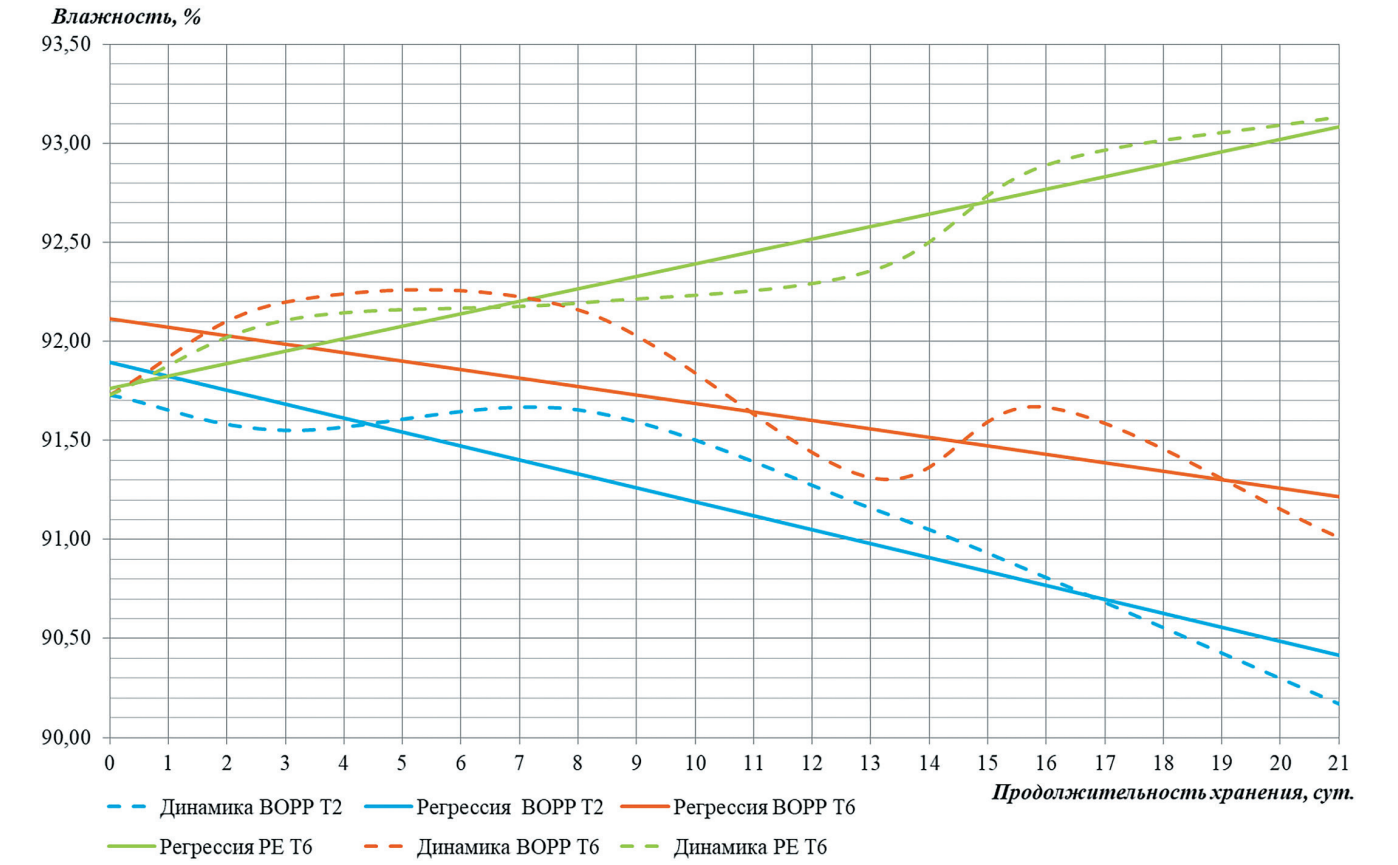
$$y = -0{,}05x + 7{,}28 \quad (9)$$

$$y = -0{,}1x + 7{,}09 \quad (10)$$

(9) — температура хранения t = 2 °С
(10) — температура хранения t = 6 °С.

На Рисунке 3 представлены графики линейной регрессии для маркёра «содержание растворимых сухих веществ», построенные на основании уравнений (9) и (10), а также фактическая динамика маркёра, рассчитанная на основе средних значений, представленных в Таблице 3.

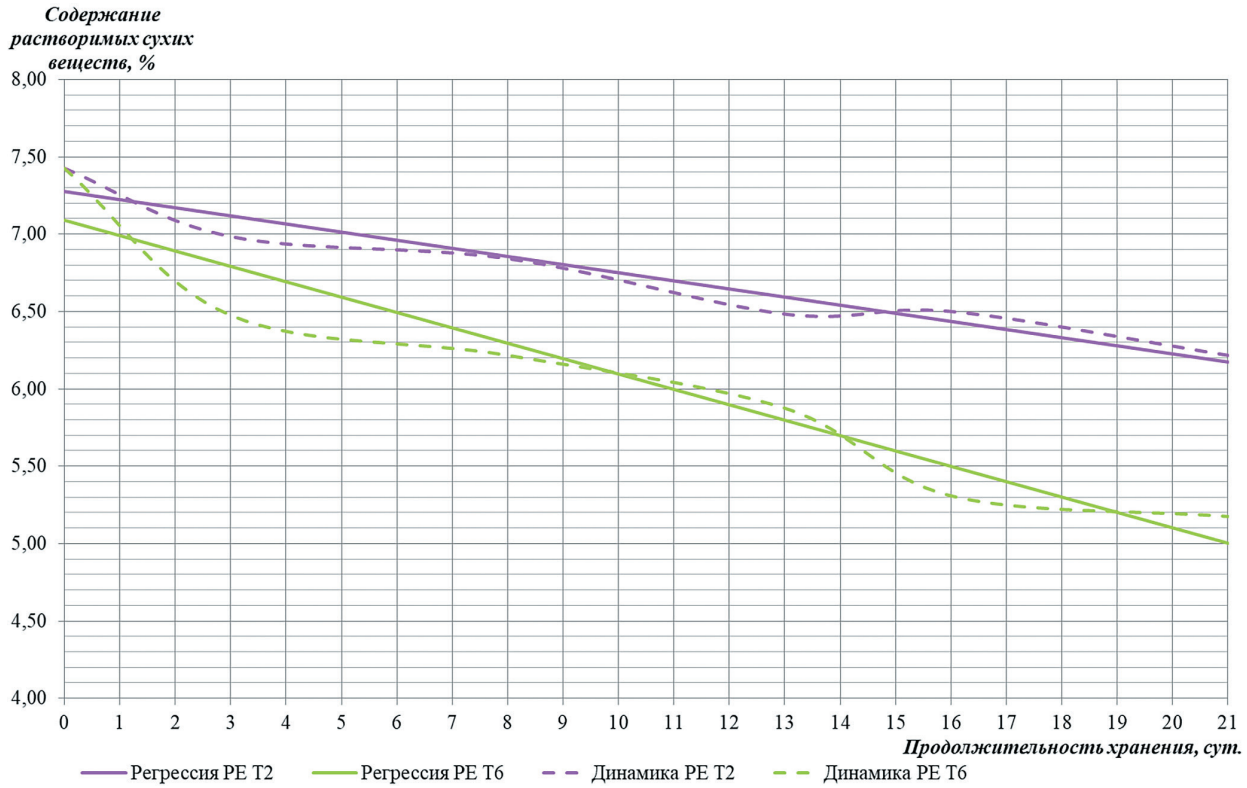
При хранении грибов в полиэтиленовой плёнке наблюдается отрицательная динамика по маркёру «содержание растворимых сухих веществ», что подтверждается расчётными значениями коэффициентов регрессии и корреляции (уравнения (9) и (10), Таблица 5). Снижение содержания растворимых сухих веществ объясняется их расходованием на дыхание. Изменение содержания растворимых сухих веществ при хранении в упаковке из перфорированной ВОРР-плёнки имеет нелинейный характер (Таблица 5),



«ВОРР Т2 линейная» — хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 2 °С, линейная регрессия; ***«ВОРР Т2 динамика»***- хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 2 °С, фактическая динамика; ***«ВОРР Т6 линейная»*** — хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 6 °С, линейная регрессия; ***«ВОРР Т6 динамика»***- хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 6 °С, фактическая динамика; ***«РЕ Т6 линейная»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, линейная регрессия; ***«РЕ Т6 динамика»***- хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, фактическая динамика.

Рисунок 2. **Линейная регрессия и фактическая динамика для маркёра «влажность»**

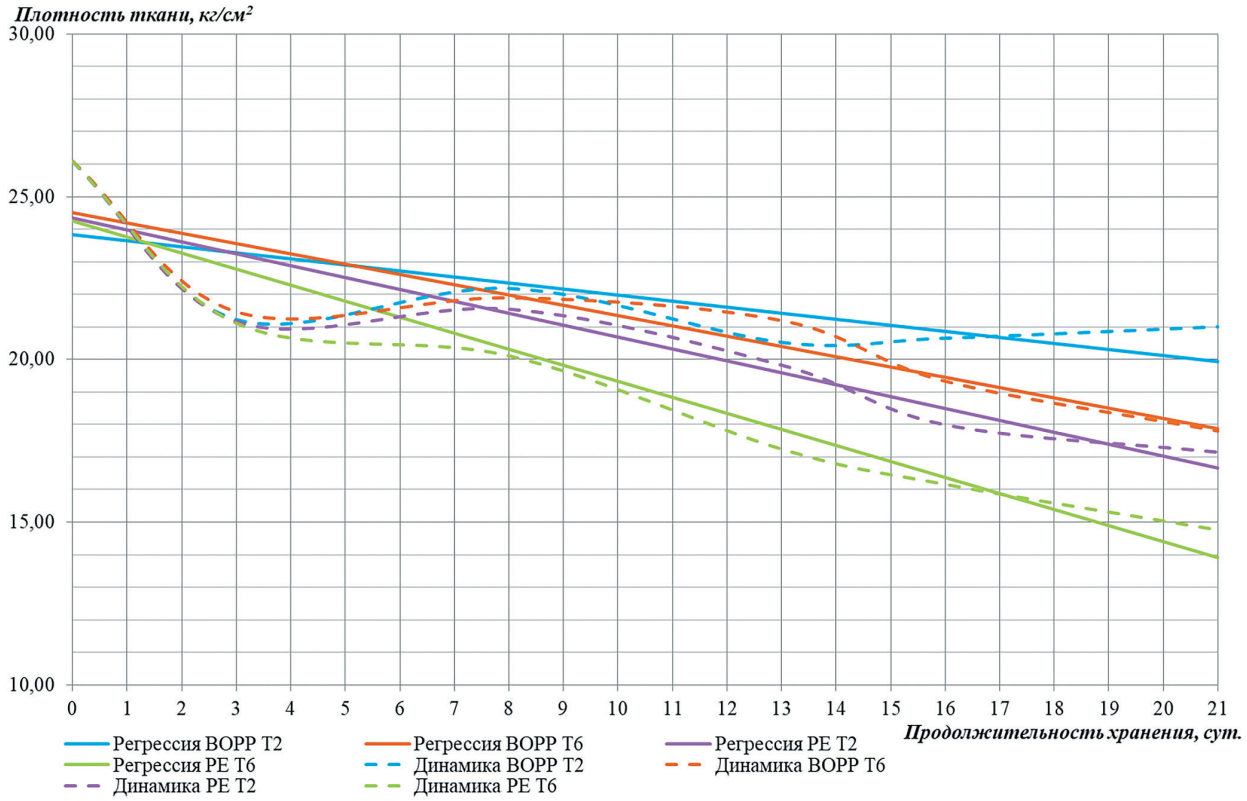
Figure 2. **Linear regression and actual dynamics for the marker “humidity”**



«РЕ Т2 линейная» — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 2 °С, линейная регрессия; ***«РЕ Т6 динамика»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 2 °С, фактическая динамика; ***«РЕ Т6 линейная»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, линейная регрессия; ***«РЕ Т6 динамика»***- хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, фактическая динамика

Рисунок 3. **Линейная регрессия и фактическая динамика для маркёра «содержание растворимых сухих веществ»**

Figure 3. **Linear regression and actual dynamics for the marker "soluble solids content"**



«ВОРР Т2 линейная» — хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 2 °С, линейная регрессия; ***«ВОРР Т2 динамика»***- хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 2 °С, фактическая динамика; ***«ВОРР Т6 линейная»*** — хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 6 °С, линейная регрессия; ***«ВОРР Т6 динамика»***- хранение в перфорированной ВОРР-плёнке при температуре t = 6 °С, фактическая динамика; ***«РЕ Т2 линейная»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 2 °С, линейная регрессия; ***«РЕ Т6 динамика»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 2 °С, фактическая динамика; ***«РЕ Т6 линейная»*** — хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, линейная регрессия; ***«РЕ Т6 динамика»***- хранение в РЕ-плёнке при температуре t = 6 °С, фактическая динамика.

Рисунок 4. **Линейная регрессия и фактическая динамика для маркёра «плотность ткани гриба»**

Figure 4. **Linear regression and actual dynamics for the marker "mushroom tissue density"**

что вероятно связано с потерей массы грибов вследствие транспирации.

Уравнения линейной регрессии для маркёра «плотность ткани гриба» имеют вид:

$$y = -0{,}19x + 23{,}83 \quad (11)$$

$$y = -0{,}32x + 24{,}51 \quad (12)$$

$$y = -0{,}37x + 24{,}34 \quad (13)$$

$$y = -0{,}49x + 24{,}25 \quad (14)$$

(11) — Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 2 °C;
(12) — Упаковочная плёнка — BOPP перфорированная; температура хранения t = 6 °C;
(13) — Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 2 °C
(14) — Упаковочная плёнка — PE; температура хранения t = 6 °C.

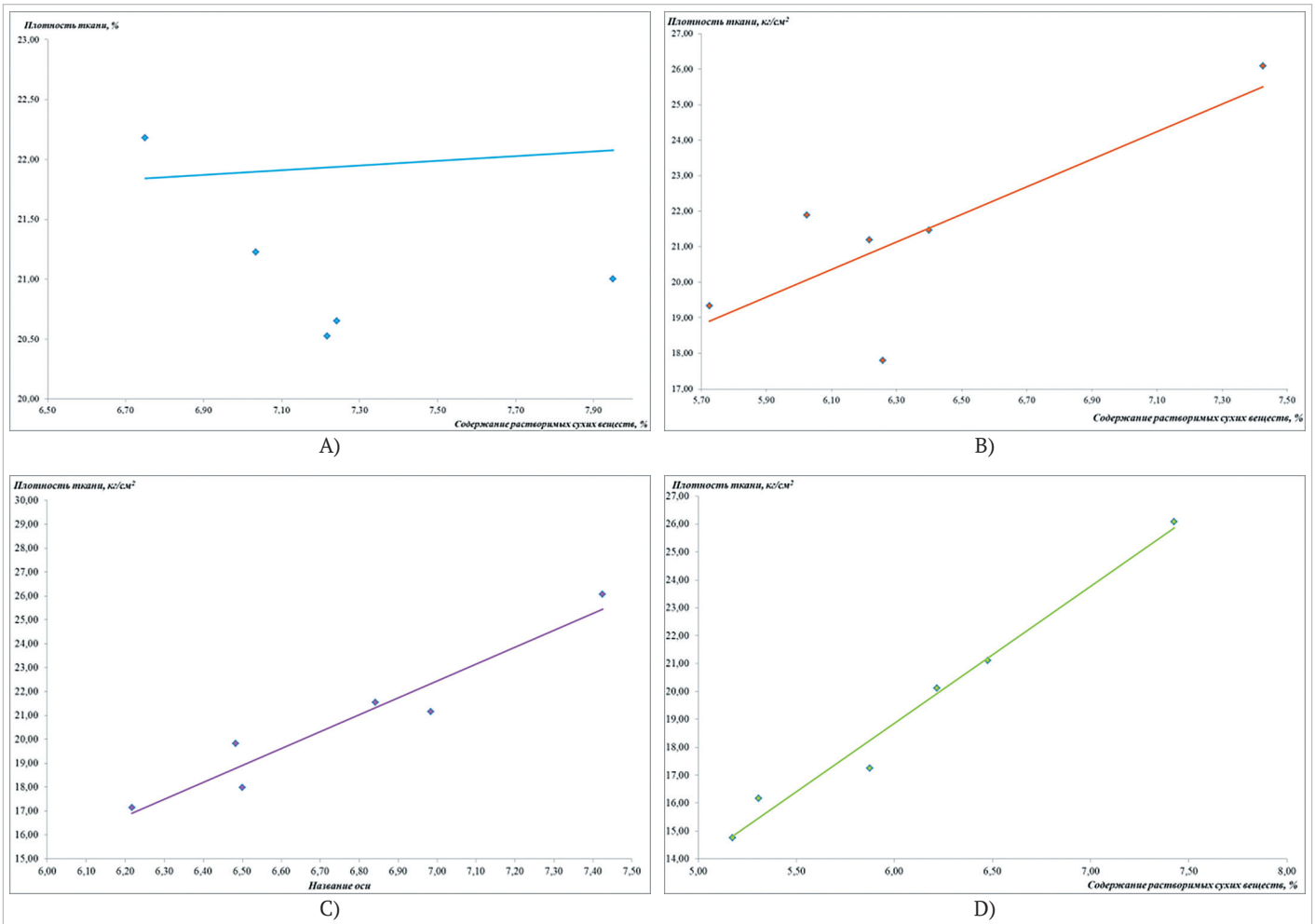
На Рисунке 4 представлены графики линейной регрессии для маркёра «влажность», построенные на основании уравнений (11) — (14), а также фактическая динамика маркёра, рассчитанная на основе средних значений, представленных в Таблице 3

При хранении *Agaricus bisporus* при всех исследованных условиях наблюдается отрицательная динамика плотности ткани гриба, что подтверждается рассчитанными значениями коэффициентов регрессии и корреляции (уравнения (11) — (14), Таблица 5).

Уменьшение плотности ткани при хранении объясняется расходованием на дыхание углеводов, образующих клеточную стенку грибов. Интенсивность дыхания, в свою очередь, увеличивается при повышении температуры хранения. Увеличение скорости изменения плотности ткани гриба при хранении в PE-плёнке можно объяснить тем, что влага, выделяющаяся вследствие дыхания, в отличие от перфорированной BOPP-плёнки, не удаляется из объёма упаковки, а частично сорбируется плодовыми телами, что приводит к их дополнительному размягчению.

Значимое изменение текстуры (плотности, твёрдости) ткани для *Agaricus bisporus* при хранении в различных условиях, а также применение этого параметра для оценки и прогнозирования срока годности описано у нескольких авторов. У группы исследователей из Тебризского университета (Тебриз, Иран) и Института сельскохозяйственной инженерии и биоэкономики им. Лейбниц (Потсдам, Германия) описано влияние предварительного охлаждения путём обдува воздухом при различных температурах и применения пассивной модифицированной газовой среды на изменение твёрдости шампиньонов в процессе хранения. Авторы сообщают, что наибольшее снижение твёрдости наблюдается у образцов, подвергнутых предварительному охлаждению, что связывают с большей потерей влаги при таком способе обработки [13]. Исследователи из Национального университета Кёнгпук (Тэгу, республика Корея) сообщают о том, что при хранении *Agaricus bisporus* в модифицированных газовых средах, содержащих N_2, CO_2 и Ar в различных соотношениях, наблюдается значительно меньшая потеря твёрдости по сравнению с хранением в естественной атмосфере, что связано с торможением биохимических реакций вследствие пониженного содержания кислорода [11]. Группа исследователей из Объединённых Арабских Эмиратов при создании кинетических моделей на основе гиперспектральной визуализации, предназначенных для оценки послеуборочной хранимоспособности *Agaricus bisporus*, в качестве дополнительных параметров использовали изменения текстурных свойств, в т. ч. твёрдости (плотности) ткани грибов [31]. В одном из прошлых наших исследований было установлено, что показатель текстуры (плотность) целесообразно применять в качестве маркёра, характеризующего деградацию ткани шампиньонов после обработки УФ-излучением и в процессе последующего хранения [23].

Результаты статистического анализа полученных экспериментальных данных (Рисунок 5, Таблица 6) подтверждают наличие тесной линейной связи (кроме хранения в перфорированной



A) — хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 2 °C; B) хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 6 °C; C) хранение в PE-плёнке при температуре t = 2 °C; D) хранение в PE-плёнке при температуре t = 2 °C

Рисунок 5. **Поле корреляции между маркёрами «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба»**
Figure 5. **Correlation field between the markers "soluble dry matter content" and "mushroom tissue density"**

Таблица 6. **Расчётные значения коэффициентов корреляции Пирсона между содержанием растворимых сухих веществ и плотностью ткани гриба**

Table 6. **Calculated values of Pearson correlation coefficients between the content of soluble solids and the density of fungal tissue**

Упаковочная плёнка	Температура хранения, °C	r_{xy}
BOPP перфорированная	2	0,04
	6	0,80
PE	2	0,96
	6	0,99

BOPP-плёнке при 2 ± 1 °C) между плотностью ткани гриба и содержанием растворимых сухих веществ.

При хранении в перфорированной BOPP-плёнке, как при температуре 2 °C, так и при 6 °C, газовый состав внутри упаковки в процессе хранения остаётся без изменений, и соответствует составу атмосферного воздуха (содержание O_2–20,5–20,6%; содержание CO_2–0,02–0,05%). При хранении в PE-плёнке снижается содержание O_2 и, соответственно, увеличивается содержание CO_2, т. е. формируется пассивная модифицированная газовая среда (МГС). При температуре хранения 2 °C содержание O_2 изменяется с 20,6% до 2,5%, а содержание CO_2 — с 0,02% до 4,5%. При температуре 6 °C содержание O_2 на 21 сутки хранения составляло 1,5%, содержание CO_2–6,5%.

Таким образом, при использовании упаковки из перфорированной BOPP-плёнки на протяжении всего срока хранения поддерживаются условия для аэробного дыхания, что способствует торможению процессов гниения. При хранении в PE-плёнке создаются условия для анаэробного дыхания и, следовательно, активируются процессы гниения.

В Таблице 7 представлены результаты двухфакторного дисперсионного анализа (уровень значимости $\alpha = 0,05$), характеризующие влияние упаковки и температуры хранения на динамику физико-химических маркёров качества *Agaricus bisporus*.

Для всех исследованных физико-химических маркёров качества подтверждается статистически значимое влияние на их динамику как вида упаковочной плёнки (наличие / отсутствие перфорации), так и температуры хранения. При этом, влияние взаимодействия этих факторов статистически не подтверждается. Следовательно, маркёры «влажность плодовых тел», «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба» целесообразно использовать при разработке алгоритма выбора оптимальных условий хранения *Agaricus bisporus*.

На Рисунках 6–9 представлены органолептические профили *Agaricus bisporus*, хранившихся в различных условиях.

Расчётные значения коэффициентов корреляции Пирсона для динамики площади профилей составляют от 0,94 до 0,99, что указывает на линейный характер регрессии квалиметрических оценок. Уравнения линейной регрессии площади профилей имеют вид:

$$y = -2,26x + 52,67 \quad (15)$$

$$y = -2,44x + 47,90 \quad (16)$$

$$y = -2,29x + 50,58 \quad (17)$$

$$y = -2,32x + 44,00 \quad (18)$$

(15) — хранение при температуре 2 °C в перфорированной BOPP-плёнке;
(16) — хранение при температуре 6 °C в перфорированной BOPP-плёнке;
(17) — хранение при температуре 2 °C в PE-плёнке;
(18) — хранение при температуре 6 °C в PE-плёнке.

На Рисунке 10 представлены графики линейной регрессии площади органолептических профилей, построенные на основании уравнений (15) — (18), а также фактическая динамика маркёра, рассчитанная на основе средних значений.

Из Рисунка 10 следует, что скорость изменения площади профилей при хранении в PE-плёнке выше, чем при хранении в перфорированной BOPP-плёнке. Выявленные различия объясняются развитием процессов гниения при хранении в PE-плёнке ввиду скопления влаги и увеличения концентрации углекислого газа внутри упаковки. При хранении в перфорированной BOPP-плёнке наблюдается торможение гнилостных процессов ввиду удаления избытков влаги и углекислого газа из объёма упаковки. При повышении температуры от 2 °C до 6 °C скорость изменения площади профилей увеличивается, что объясняется ускорением метаболических процессов.

Была установлена взаимосвязь между динамикой органолептических показателей и физико-химических маркёров качества в процессе хранения *Agaricus bisporus*. В таблице 8 представлены

Таблица 7. **Результаты дисперсионного анализа**

Table 7. **Analysis of variance**

Маркёры	Факторы						$F_{крит}$[1]
	Упаковочная плёнка		Температура хранения		Взаимодействие		
	$F_{расч}$[2]	Вклад, %	$F_{расч}$	Вклад, %	$F_{расч}$	Вклад, %	
Влажность плодовых тел	30,40	46,61	6,73	10,32	0,09	0,14	4,20
Содержание растворимых сухих веществ	41,95	31,35	46,18	34,51	1,68	1,25	4,06
Плотность ткани гриба	8,79	9,69	5,78	6,37	0,12	0,13	3,97

Примечание: [1]$F_{крит}$ — критическое значение критерия Фишера; $F_{расч}$ — расчётное значение критерия Фишера.

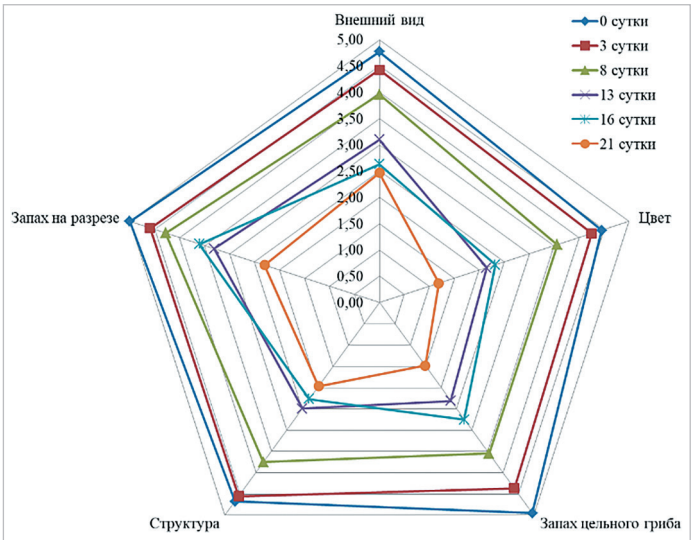


Рисунок 6. **Органолептические профили для условий хранения: перфорированная плёнка BOPP, температура 2 °C**

Figure 6. **Organoleptic profiles for storage conditions: perforated BOPP film, temperature 2 °C**

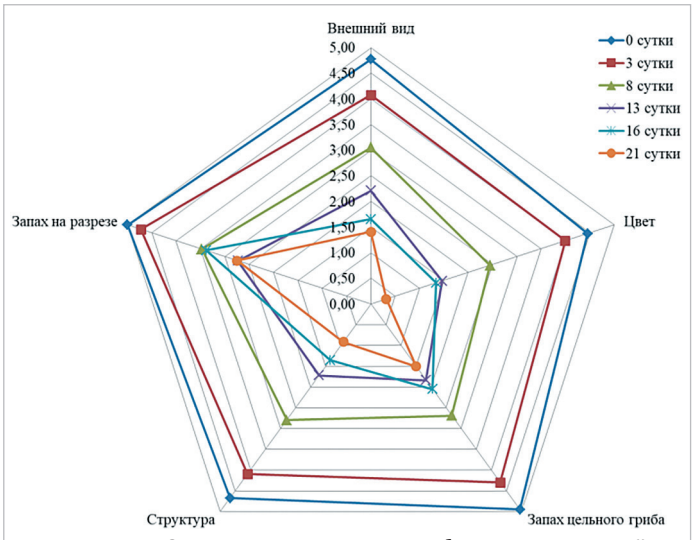


Рисунок 7. **Органолептические профили для условий хранения: перфорированная плёнка BOPP, температура 6 °C**

Figure 7. **Organoleptic profiles for storage conditions: perforated BOPP film, temperature 6 °C**

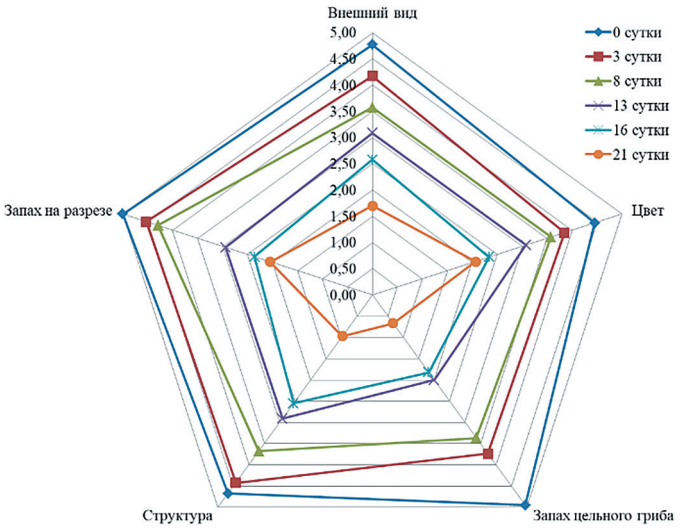


Рисунок 8. **Органолептические профили для условий хранения: плёнка PE, температура 2 °C**
Figure 8. **Organoleptic profiles for storage conditions: PE film, temperature 2 °C**

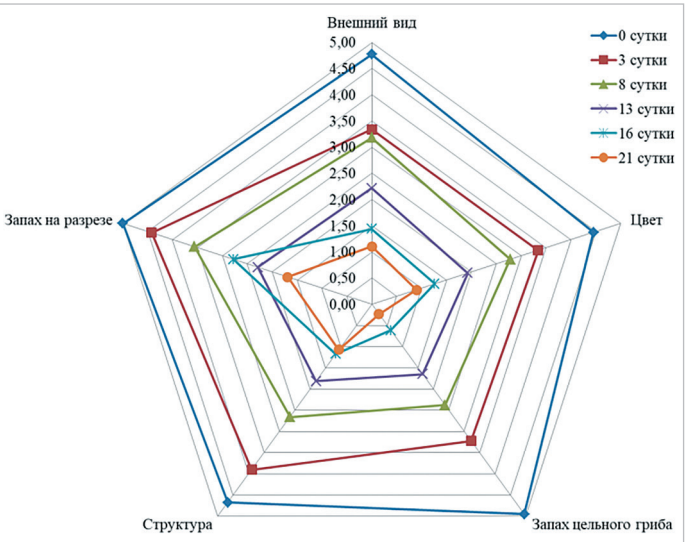
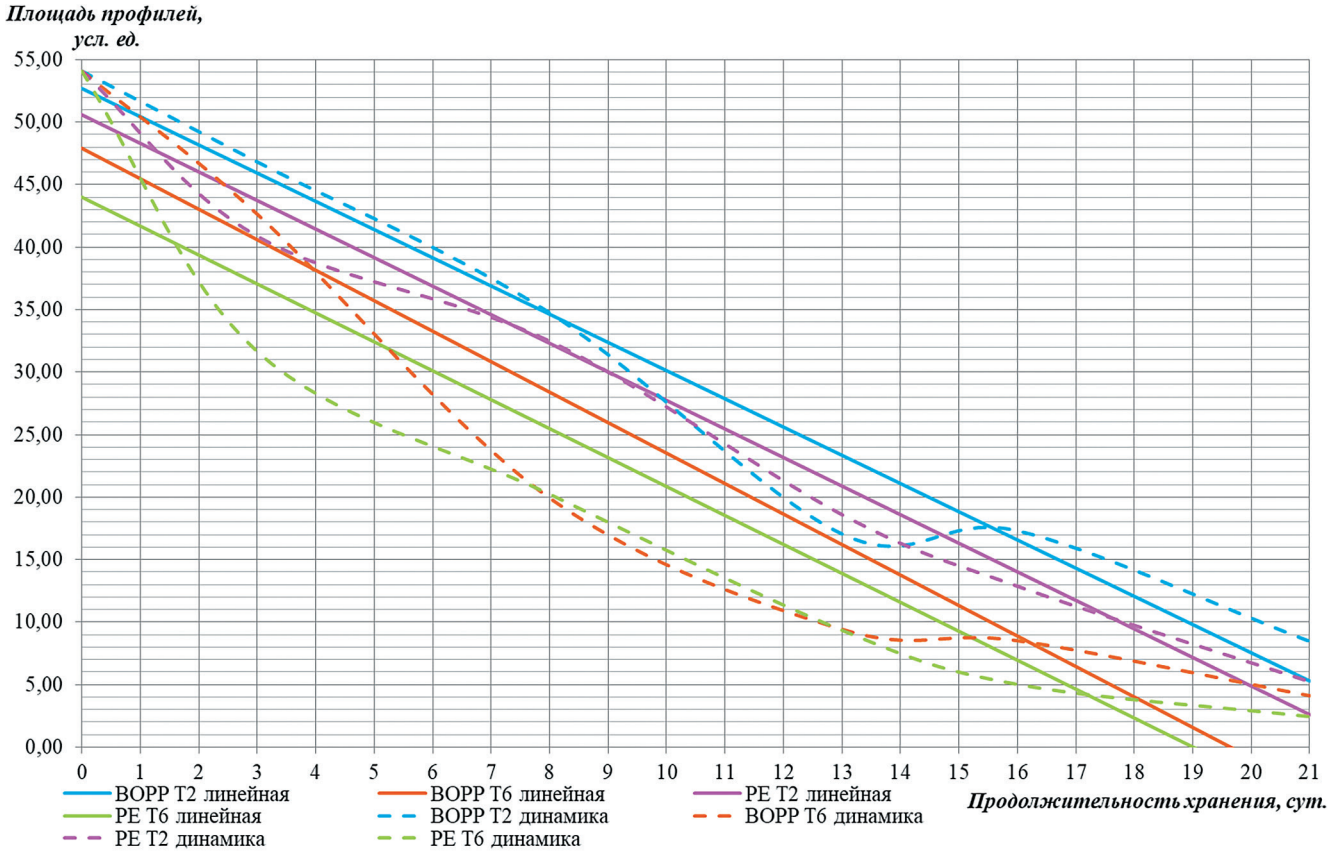


Рисунок 9. **Органолептические профили для условий хранения: плёнка PE, температура 6 °C**
Figure 9. **Organoleptic profiles for storage conditions: PE film, temperature 6 °C**



«BOPP T2 линейная» — хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 2 °C, линейная регрессия; ***«BOPP T2 динамика»*** — хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 2 °C, фактическая динамика; ***«BOPP T6 линейная»*** — хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 6 °C, линейная регрессия; ***«BOPP T6 динамика»***- хранение в перфорированной BOPP-плёнке при температуре t = 6 °C, фактическая динамика; ***«PE T2 линейная»*** — хранение в PE-плёнке при температуре t = 2 °C, линейная регрессия; ***«PE T6 динамика»*** — хранение в PE-плёнке при температуре t = 2 °C, фактическая динамика; ***«PE T6 линейная»*** — хранение в PE-плёнке при температуре t = 6 °C, линейная регрессия; ***«PE T6 динамика»***- хранение в PE-плёнке при температуре t = 6 °C, фактическая динамика.

Рисунок 10. **Линейная регрессия и фактическая динамика площади органолептических профилей**
Figure 10. **Linear regression and actual dynamics of the area of organoleptic profiles**

расчётные значения коэффициента корреляции Пирсона для пар «сенсорные характеристики — маркёры качества» при различных условиях хранения.

Для маркёра «влажность» выявлена тесная корреляция с сенсорными характеристиками при всех условиях хранения: расчётное значение коэффициентов Пирсона (0,59–0,97) указывает на линейный характер взаимосвязи между квалиметрическими оценками и этим показателем. Для маркёра «плотность ткани гриба» линейная взаимосвязь с квалиметрическими оценками также установлена при всех условиях хранении — значения расчётного коэффициента корреляции составляют 0,65–0,99. Для маркёра «содержание растворимых сухих веществ» также характерна линейная взаимосвязь с сенсорными оценками (значения коэффициента Пирсона — от 0,69 до 1,00), за исключением хранения в перфорированной плёнке BOPP при 2 °C, что можно объяснить отсутствием линейной взаимосвязи между этим маркёром и продолжительностью хранения (Таблица 5).

Таблица 8. **Расчётные значения коэффициентов корреляции Пирсона между сенсорными характеристиками и физико-химическими маркёрами качества**

Table 8. **Calculated values of Pearson correlation coefficients between sensory characteristics and physicochemical quality markers**

Кластеры / маркёры	Влажность	Растворимые сухие вещества	Плотность ткани
Плёнка BOPP перфорированная; T = 2 °C			
Внешний вид	0,91	0,47	0,72
Цвет	0,92	0,58	0,65
Запах цельного гриба	0,88	0,49	0,72
Структура	0,88	0,48	0,68
Запах на разрезе	0,93	0,62	0,66
Площадь профилей	0,88	0,44	0,74
Плёнка BOPP перфорированная; T = 6 °C			
Внешний вид	0,64	0,77	0,89
Цвет	0,71	0,69	0,86
Запах цельного гриба	0,63	0,77	0,84
Структура	0,68	0,74	0,87
Запах на разрезе	0,65	0,69	0,76
Площадь профилей	0,59	0,81	0,85
Плёнка PE; T = 2 °C			
Внешний вид	0,73	0,97	0,93
Цвет	0,70	0,95	0,95
Запах цельного гриба	0,81	0,99	0,95
Структура	0,78	0,93	0,86
Запах на разрезе	0,81	0,95	0,91
Площадь профилей	0,77	0,99	0,95
Плёнка PE; T = 6 °C			
Внешний вид	0,97	0,99	0,99
Цвет	0,96	0,99	0,99
Запах цельного гриба	0,96	1,00	0,99
Структура	0,92	0,97	0,97
Запах на разрезе	0,88	0,92	0,95
Площадь профилей	0,90	0,98	0,99

Наличие тесной линейной взаимосвязи между динамикой сенсорных характеристик и продолжительностью хранения *Agaricus bisporus* (коэффициент корреляции — 0,90–1,00) также показано в нашей ранее опубликованной статье [32].

Таким образом, подтверждена применимость показателей «содержание растворимых сухих веществ», «плотность ткани гриба» и «влажность» как маркёров изменения качества шампиньонов в процессе хранения в различных условиях.

4. Выводы

1. Динамика исследованных критериев оценки (маркёров) качества *Agaricus bisporus* «влажность плодовых тел», «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба» в процессе хранения имеет линейный характер, либо близкий к линейному (расчётный коэффициент корреляции Пирсона составляет от 0,51 до 0,96).
2. При разработке алгоритма выбора оптимальных условий хранения *Agaricus bisporus* целесообразно применение исследованных критериев (маркёров): влажность плодовых тел, содержание растворимых сухих веществ, плотность грибной ткани, т. к. они в полной мере характеризуют изменение качества грибов в процессе хранения.
3. Подтверждено статистически значимое влияние упаковочного материала на динамику критериев (маркёров) качества грибов «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба». При хранении в упаковке из полиэтиленовой (PE) плёнки наблюдается более интенсивное снижение уровня этих критериев. Это связано с формированием условий для анаэробного дыхания и накоплением выделяющейся влаги, что приводит к активизации процессов гниения. При хранении в перфорированной плёнке из ориентированного полипропилена (BOPP) поддерживаются условия для аэробного дыхания и транспирации влаги, что способствует торможению процессов гниения.
4. Выявлено влияние температуры хранения на динамику критериев (маркёров) качества грибов «содержание растворимых сухих веществ» и «плотность ткани гриба»: при увеличении температуры хранения наблюдается более интенсивное снижение уровня этих критериев, что связано с увеличением интенсивности дыхания и, следовательно, скорости метаболизма.
5. Установлена корреляционная зависимость между динамикой органолептических и физико-химических показателей, что подтверждает применимость параметров «содержание растворимых сухих веществ», «плотность ткани гриба» и «влажность» в качестве маркёров качества *Agaricus bisporus*.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Kalač, P. (2012). A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93(2), 209–218. https://doi.org/10.1002/jsfa.5960
2. Rizzo, G., Goggi, S., Giampieri, F., Baroni, L. (2021). A review of mushrooms in human nutrition and health. *Trends in Food Science and Technology*, 117, 60–73. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.025
3. Muszyńska, B., Grzywacz-Kisielewska, A., Kała, K., Gdula-Argasińska, J. (2018). Anti-inflammatory properties of edible mushrooms: A review. *Food Chemistry,* 243, 373–381. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.149
4. Лисицын А. Б., Чернуха И. М., Никитина М. А. (2023). Разработка персонализированного рациона питания методом структурной оптимизации. *Пищевые системы,* 6(1), 64–71. [Lisitsyn, A. B., Chernukha, I. M., Nikitina, M. A. (2023). Development of a personalized diet using the structural optimization method. *Food Systems*, 6(1), 64–71. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-64-71
5. El-Ramady, H., Abdalla, N., Badgar, K., Llanaj, X., Törős, G., Hajdú, P. et al. (2022). Edible mushrooms for sustainable and healthy human food: Nutritional and medicinal attributes. *Sustainability*, 14(9), Article 4941. https://doi.org/10.3390/su14094941
6. Zhang, K., Pu, Y.-Y., Sun, D.-W. (2018). Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review. *Trends in Food Science and Technology,* 78, 72–82. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.012
7. Li, Y., Ding, S., Kitazawa, H., Wang, Y. (2022). Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, Article 100865. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100865
8. Guo, Y., Chen, X., Gong, P., Deng, Z., Qi, Z., Wang, R. et al. (2023). Recent advances in quality preservation of postharvest golden needle mushroom (*Flammulina velutiper*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(12), 5647–5658. https://doi.org/10.1002/jsfa.12603
9. Priss, O., Yevlash, V., Zhukova, V., Kiurchev, S., Verkholantseva, V., Kalugina, I. et al. (2017). Investigation of the respiration rate during storage of fruit vegetables under the influence of abiotic factors. *EUREKA: Life Sciences*, 6, 10–15. https://doi.org/10.21303/2504–5695.2017.00494
10. Pretzler, M., Rompel, A. (2024). Mushroom tyrosinase: Six isoenzymes catalyzing distinct reactions. ChemBioChem, 25(14), Article e202400050. https://doi.org/10.1002/cbic.202400050
11. Park, D. H., Park, J. J., Olawuyi, I. F., Lee, W. Y. (2020). Quality of White mushroom (*Agaricus bisporus*) under argon- and nitrogen-based controlled atmosphere storage. *Scientia Horticulturae*, 265, Article 109229. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109229
12. Djekic, I., Vunduk, J., Tomašević, I., Kozarski, M., Petrovic, P., Niksic, M. et al. (2017). Application of quality function deployment on shelf-life analysis of *Agaricus bisporus Portobello*. *LWT,* 78, 82–89. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.036
13. Salamat, R., Ghassemzadeh, H. R., Ranjbar, F., Jalali, A., Mahajan, P., Herppich, W. B. et al (2020). The effect of additional packaging barrier, air moment and cooling rate on quality parameters of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food Packaging and Shelf Life*, 23, Article 100448. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100448
14. Han Lyn, F., Maryam Adilah, Z. A., Nor-Khaizura, M. A. R., Jamilah, B., Nur Hanani, Z. A. (2020). Application of modified atmosphere and active packaging for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Food Packaging and Shelf Life*, 23, Article 100451. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100451
15. Ghidelli, C., Pérez-Gago, M. B. (2017). Recent advances in modified atmosphere packaging and edible coatings to maintain quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(4), 662–679. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1211087
16. Ухарцева, И. Ю., Цветкова, Е. А., Гольдаде, В. А. (2019). Полимерные упаковочные материалы для пищевой промышленности: классификация, функции и требования (обзор). *Пластические массы*, 9–10, 56–64. [Ukhartseva, I. Yu, Tsvetkova, Ye. A., Gol'dade, V. A. (2019). Polymer packaging materials for the food industry: Classification, functions and requirements. *Plastic Masses*, 9–10, 56–64. (In Russian)] https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-9-10-56-64
17. Chen, C., Chen, W., Dai, F., Yang, F., Xie, J. (2022). Development of packaging films with gas selective permeability based on poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(butylene succinate) and its application in the storage of white

mushroom (*Agaricus Bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 15(6), 1268–1283. https://doi.org/10.1007/s11947-022-02794-4
18. Батаева, Д. С., Грудистова, М. А., Насыров, Н. А., Стаханова, О. А. (2022). Упаковка как важнейший элемент обеспечения срока годности пищевой продукции. *Все о мясе,* 3, 40–43. [Batayeva, D. S., Grudistova, M. A., Nasyrov, N. A., Stakhanova, O. A. (2022). Packaging as an important element for ensuring food shelf life. *Vsyo o Myase*, 3, 44–47. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-3-44-47
19. Zhou, Z., Han, P., Bai, S., Ma, N., Fang, D., Yang, W. et al. (2022). Caffeic acid-grafted-chitosan/polylactic acid film packaging enhances the postharvest quality of *Agaricus bisporus* by regulating membrane lipid metabolism. *Food Research International*, 158, Article 111557. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111557
20. Qu, P., Zhang, M., Fan, K., Guo, Z. (2020). Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(1), 51–65. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1811635
21. Ahmed, M. E. M., Mohamed, M. A. A., AlBallat, I. A., Nomir, K. A. I. (2020). Effect of packaging type and perforation rate on storability and quality of common beans pods: — A — physical properties. *Menoufia Journal of Plant Production*, 5(9), 451–463. https://doi.org/10.21608/mjppf.2020.172386
22. Lwin, H. P., Lee, J., Lee, J. (2022). Perforated modified atmosphere packaging differentially affects the fruit quality attributes and targeted major metabolites in bell pepper cultivars stored at ambient temperature. *Scientia Horticulturae,* 301, Article 111131. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111131
23. Кондратенко, В. В., Посокина, Н. Е., Федянина, Н. И., Карастоянова, О. В., Коровкина, Н. В. (2022). Показатели качества *Agaricus bisporus* после обработки УФ-излучением. *Техника и технология пищевых производств,* 52(4), 762–774. [Kondratenko, V. V., Posokina, N. E., Fedyanina, N. I., Karastoyanova, O. V. (2022). Quality indicators of *Agaricus bisporus* after ultraviolet treatment. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 762–774. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2404
24. Посокина, Н. Е., Бессараб, О. В., Карастоянова, О. В., Протункевич, И. В. (2022). Разработка алгоритма сенсорного анализа для оценки срока годности королевских шампиньонов с применением лексикона дескрипторов. *Пищевая промышленность*, 10, 84–89. [Posokina, N. E., Bessarab, O. V., Karastoyanova, O. V., Protunkevich, I. V. (2022). Development of a sensory analysis algorithm for assessing the shelf life of royal champignons using a lexicon of descriptors. *Food Industry*, 10, 84–89. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.10.10.019
25. Walkowiak-Tomczak, D., Idaszewska, N., Bieńczak, K., Kómoch, W. (2020). The effect of mechanical actions occurring during transport on physicochemical changes in *Agaricus bisporus* mushrooms. *Sustainability,* 12(12), Article 4993. https://doi.org/10.3390/su12124993
26. Xiao, K., Liu, Q., Wang, L., Zhang, B., Zhang, W., Yang, W. et al. (2020). Prediction of soluble solid content of *Agaricus bisporus* during ultrasound-assisted osmotic dehydration based on hyperspectral imaging. *LWT,* 122, Article 109030. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109030
27. Song, Y., Hu, Q., Wu, Y., Pei, F., Kimatu, B. M., Su, A. et al. (2018). Storage time assessment and shelf-life prediction models for postharvest *Agaricus bisporus*. *LWT,* 101, 360–365. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.020
28. Aisala, H., Laaksonen, O., Manninen, H., Raittola, A., Hopia, A., Sandell, M. (2018). Sensory properties of Nordic edible mushrooms. *Food Research International,* 109, 526–536. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.059
29. Посокина, Н. Е., Бессараб, О. В., Карастоянова, О. В., Коровкина, Н. В. (2022). Применение дескрипторно-профильного метода для органолептической оценки хранимоспособности грибов *Agaricus Bisporus*. *Вестник КрасГАУ*, 7, 154–163. [Posokina, N. E., Bessarab, O. V., Karastoyanova, O. V., Korovkina, N. V. (2023). The description-profile method application for the organoleptic assessment of the storage capability of Agaricus bisporus mushrooms. *Bulliten KrasSAU*, 7, 154–163. (In Russian)] https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-7-154-163
30. Wang, J., Chen, J., Hu, Y., Hu, H., Liu, G., Yan, R. (2017). Application of a predictive growth model of pseudomonas spp. for estimating shelf life of fresh *Agaricus bisporus*. *Journal of Food Protection*, 80(10), 1676–1681. https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-17-055
31. Nazir, A., AlDhaheri, M., Mudgil, P., Marpu, P., Kamal-Eldin, A. (2022). Hyperspectral imaging based kinetic approach to assess quality deterioration in fresh mushrooms (*Agaricus bisporus)* during postharvest storage. *Food Control*, 131, Article 108298. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108298
32. Посокина, Н. Е., Бессараб, О. В., Карастоянова, О. В., Коровкина, Н. В. (2024). Влияние условий хранения и упаковочных материалов на сенсорные характеристики шампиньонов двуспоровых (*Agaricus bisporus*). *Пищевая промышленность*, 3, 80–85. [Posokina, N. E., Bessarab, O. V., Karastoyanova, O. V., Korovkina, N. V. (2024). The influence of storage conditions and packaging materials on the sensory characteristics of bisporus champignons (*Agaricus bisporus*). *Food Industry*, 3, 80–85. (In Russian)] https://doi.org/ 10.52653/PPI.2024.3.3.015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Посокина Наталья Евгеньевна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 Тел.: +7–926–367–75–07 E-mail: n.posokina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785	**Natalia E. Posokina**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia Tel.: +7–926–367–75–07 E-mail: n.posokina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-6785
Бессараб Ольга Владимировна — старший научный сотрудник, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 Тел.: +7–963–726–13–27 E-mail; o.bessarab@ fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7485-0698 * автор для контактов	**Olga V. Bessarab**, Senior Researcher, Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia Tel.: +7–963–726–13–27 E-mail: o.bessarab@ fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7485-0698 * corresponding author
Карастоянова Ольга Вячеславовна — научный сотрудник, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 Тел.: +7–926–784–77–30 E-mail: o.karastoianova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7247-7519	**Olga V. Karastoyanova**, Researcher, Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia Tel.: +7–926–784–77–30 E-mail: o.karastoianova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7247-7519
Коровкина Надежда Вячеславовна — лаборант-исследователь, лаборатория технологии консервирования, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования 142703, Московская обл., Видное, Школьная ул., 78 Тел.: +7–977–447–73–45 E-mail: n.korovkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4108-5835	**Nadezhda V. Korovkina**, Laboratory Assistant-Researcher, Laboratory of Food Canning Technology, All-Russian Scientific Research Institute of Preservation Technology 78, Shkol'naya Str., Vidnoe, 142703, Moscow region, Russia Tel.: +7–977–447–73–45 E-mail: n.korovkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4108-5835
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-438-443

Received 14.05.2024
Accepted in revised 27.09.2024
Accepted for publication 30.09.2024
© Ammar A. S. M., Riyad Y. M., Ebrahiem A. A. A., 2024
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Original scientific article
Open access

UTILIZATION OF ARTICHOKE (*CYNARA SCOLYMUS* L.) BY-PRODUCTS FOR ENHANCING THE NUTRITIONAL VALUE AND PHYTOCHEMICAL CONTENT OF COOKIES

Abdalla S. M. Ammar*, Youssef M. Riyad, Azza A. A. Ebrahiem
Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt

KEY WORDS:
artichoke by-products, bakery products, antioxidant activity, functional foods

ABSTRACT
This study was conducted to make functional cookies using powdered artichoke stems and bracts, which are rich in phytochemicals. The chemical composition and phytochemicals in wheat flour, artichoke bract powder, artichoke stem powder and the produced cookies were determined. Physical properties, color and sensory characteristics were determined in wheat flour cookies, artichoke bract powder cookies and artichoke stem powder cookies. The results showed that artichoke bract powder cookies (15%) contained the highest levels of ash and protein being 2.07% and 9.65%, respectively. The cookies with powdered artichoke stems (15%) had the greatest overall lipid content (14.65%). Furthermore, the highest total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant activity were found in artichoke by-products (stems and bracts). The panelists approved of up to 15% artichoke by-product powder added to wheat flour. It can be seen from the results that the artichoke by-products are a good source of phytochemicals, minerals, total protein and total lipids, which improves the quality of cookies. Therefore, it can be concluded that using artichoke by-products up to 15% enhanced the antioxidant properties and nutritional value of the baked cookies.

Поступила 14.05.2024
Поступила после рецензирования 27.09.2024
Принята в печать 30.09.2024
© Аммар А. С.М., Рияд Ю. М., Ибрахим А. А.А., 2024
https://www.fsjour.com/jour
Научная статья
Open access

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ АРТИШОКА (*CYNARA SCOLYMUS* L.) ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ ЦЕННОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ФИТОХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЕЧЕНЬЕ

Аммар А. С. М.*, Рияд Ю. М., Ибрахим А. А. А.
Кафедра науки о пище и технологии, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Египет, Каир

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
побочные продукты переработки артишока, мучные кондитерские изделия, антиоксидантная активность, функциональные продукты

АННОТАЦИЯ
Проведено исследование по изготовлению функционального печенья, используя порошкообразные стебли и прицветники артишока. Определяли химический состав и фитохимические соединения в пшеничной муке, порошке прицветников артишока, стеблях артишока и изготовленном печенье. В печенье из пшеничной муки, печенье с порошком прицветников артишока и печенье с порошком стеблей артишока определяли физические свойства, цвет и сенсорные характеристики. Результаты показали, что печенье с порошком прицветников артишока (15%) содержало более высокие уровни золы и белка (2,07% и 9,65%, соответственно). Печенье с порошком стеблей артишока (15%) имело наиболее высокое содержание общих липидов (14,65%). Кроме того, наивысшее общее содержание фенольных соединений, общее содержание флавоноидов и антиоксидантная активность были выявлены в побочных продуктах переработки артишока (стебли и прицветники). Члены дегустационной комиссии одобрили до 15% порошка побочных продуктов переработки артишока, добавленного к пшеничной муке. Как видно из результатов, побочные продукты переработки артишока являются хорошим источником фитохимических соединений, минеральных веществ, общего белка и общих липидов, которые улучшают качество печенья. Таким образом, можно сделать вывод, что использование побочных продуктов переработки артишока на уровне до 15% повышает антиоксидантные свойства и питательную ценность испеченного печенья.

1. Introduction

Food loss and waste are two of the biggest issues the global food supply chain is now dealing with. A 2011 survey by the Food and Agriculture Organization of the United Nations found that around one-third of the food produced for human use is lost or wasted annually [1]. Food waste is the reduction in food quantity or quality that results from consumer, food service, and retailer decisions and actions, whereas food loss is the reduction in food quantity or quality that happens as a result of decisions and actions made by food suppliers along the supply chain [1]. Food processing generates a lot of by-products that are rich in valuable ingredients that can be used as functional ingredients, such as antioxidants. It would be advantageous to use these ingredients in food to give customers healthier options [2]. There is a growing demand for functional foods enhanced with by-products as people become more conscious of the impact their current dietary choices have on their health [3].

Cynara scolymus L., also known as the globe artichoke, is a crucial part of the Mediterranean diet. It is highly valued for its organoleptic qualities, whether it is used as a fresh vegetable or processed food. The globe artichoke is not only low in lipids but also a potential source of minerals, vitamins, and dietary ingredients. It also has a high concentration of inulin and a large number of naturally occurring antioxidants like flavonoids [4]. Approximately 80 to 85% of the entire plant biomass is lost during the industrial preparation of artichokes. The majority of this material is made up of stems and bracts, or exterior parts of flowers, as they are generally known. It is normally disposed of as solid trash because it is unfit for human consumption. However, an analysis of composition reveals that artichoke waste contains a significant amount of polyphenols [5].

Based on a 2018 FAO assessment, artichokes are widely cultivated in the Mediterranean region, including Egypt. The total area planted with artichokes in Egypt was 17287 hectares, with artichoke production around

FOR CITATION: **Ammar, A. S. M., Riyad, Y. M., Ebrahiem, A. A. A.** (2024). Utilization of artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-products for enhancing nutritional value and phytochemical content of cookies. *Food Systems,* 7(3), 438–443. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-438-443

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Аммар, А. С. М., Рияд, Ю. М., Ибрахим, А. А. А.** (2024). Использование побочных продуктов переработки артишока (*Cynara scolymus* L.) для повышения питательной ценности и содержания фитохимических соединений в печенье. *Пищевые системы*, 7(3), 438–443. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-438-443

323866 tons [6]. Globe artichokes provide various nutritional benefits, including high levels of water (91% of dietary portions) and minerals, as well as high levels of vitamins, carotenoids, and polyphenols [7]. According to Rangboo et al., [8] globe artichokes have the ability to decrease the production of reactive oxygen species, oxidation of low-density lipoproteins, lipid peroxidation, and increase the glutathione peroxidase activity. According to De Falco et al., [9] these effects are linked to artichoke phenolics, which can modify several important enzyme pathways as well as cell defensive antioxidants.

Eman et al. [10] studied the chemical composition of the globe artichoke by-products (bracts and floral stems) and found that raw bracts contained 84.51% moisture, 15.71% crude protein, 1.78% crude ether extract, 24.84% crude fiber, 7.33% ash and 50.34% nitrogen free extract, while raw stems had 89.57% moisture, 17.12% crude protein, 2.55% crude ether, 14.88% crude fiber, 10.45% ash and 55.00% nitrogen free extract (on dry weight basis). Lavecchia et al., [11] reported that the polyphenol content of stems was 51.10±0.74 mg GAE/g and that of bracts was 24.58±0.57 mg GAE/g. Using 50% aqueous ethanol provided the highest extraction yields, with over 80% of phenolic compounds recovered.

According to Cappa et al. [12], cookies are typically made using wheat flour, oil, and sugar, with a moisture content of no more than 20%. Cookies are the most popular snack because they are available in a wide range of flavors, kept well in storage for a long time, and can be eaten in between larger meals that do not provide enough nutrients [13]. Based on the above-mentioned considerations, therefore, the aim of this study was to assess and utilize the powdered artichoke by-products (either the stems or the bracts) as a rich source of bioactive components to improve the nutritional value and phytochemical content of cookies.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

Artichoke bracts (outside portions of the flowers), artichoke stems (floral stems), weak wheat flour (72% extraction –flour containing much less bran and germ), sugar, salt, shortening and baking powder were purchased from a local market in Cairo, Egypt. Folin–Ciocalteu reagent and DPPH reagent were purchased from Sigma Company (USA) and other chemicals were purchased from EL-Gomhoria Company, Egypt.

2.2. Methods

2.2.1. Preparation of artichoke bract powder (ABP) and artichoke stem powder (ASP)

The samples were washed with tap water and the stems were cut into small pieces. Samples were dried using an oven (Astell Hearson, England) at 50 °C for 24 h. The dried pieces were ground, and powder was sieved using a sieve of 425 µm (USA Standard Testing Sieve) to obtain a fine powder and preserved in the freezer (Fresh, Egypt) at –18 °C until used.

2.2.2. Preparation of flour blends

Wheat flour (72%) was partially replaced by ABP (0, 10 and 15%) or by ASP (0, 5 and 15%) as presented in Table 1.

Table 1. **Ingredients used in producing different cookie blends**

Таблица 1. **Ингредиенты, использованные при изготовлении различных смесей для печенья**

Ingredients (gram)	Control	Artichoke bract powder cookies (ABPC)		
		5%	10%	15%
WF	100	—	90	85
ABP	—	—	10	15
		Artichoke stem powder cookies (ASPC)		
WF		95	—	85
ASP	—	5	—	15
Powdered sugar		58		
Shortening		28		
Baking powder		1.1		
Salt		0.9		
Water		22		
Baking conditions				
Baking time (min)		25		
Temperature (°C)		180		

2.2.3. Preparation of cookies

In addition to the control sample, cookie samples with ABP or ASP were prepared using the flour combinations as follows. Control cookies were made with 100 g wheat flour (WF), 58 g sugar, 28 g shortening, 1.1 g baking powder, 0.9 g sodium chloride, and 22 ml water as the ingredients. ABPC and ASPC were prepared from wheat flour with addition of ABP or ASP at the ratios indicated in 2.2.2 and Table 1 with all other ingredients being the same. After the dough was ready, it was sheeted to a thickness of 1.1 cm and cut into a circle with a diameter of 4.1 cm. In a preheated oven, cookies were baked for 25 minutes at 180 °C as mentioned in Table 1. After cooling to room temperature, the baked cookies were sealed in polythene bags.

2.2.4. Proximate chemical composition

Chemical analyses were performed on both the raw materials and the final cookies. The A. O.A.C. [14] was followed in determining the contents of moisture, ash, total lipids, and total protein.

Moisture determination: In a weighed clean crucible, 5 g of sample were weighed. The crucible and the sample were put in an oven at 105 °C. Then crucible was weighed, this was repeated until a constant weight was reached.

$$\text{Moisture, \%} = \frac{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_1)}{W_2 - W_1} \times 100, \quad (1)$$

where: W_1 = weight of empty crucible; W_2 = weight of crucible + sample; W_3 = weight of crucible +dried sample.

Ash determination: In a weighed clean crucible, 5 g of sample were weighed. Then the sample in the crucible was put in a muffle furnace at 550–650 °C for more than 3 hours until getting ash. After that, the crucible was cooled in a desiccator, and then weighed.

$$\text{Ash, \%} = W_2 - W_1 / W_3 \times 100, \quad (2)$$

where: W_1 = weight of empty crucible; W_2 = weight of crucible with ash; W_3 = weight of sample.

Lipid determination: Using a weighed clean thimble (W_1), a 10-g sample was placed and re-weighed (W_2). Soxhlet extractor was fixed and 200 ml of petroleum ether (40–60 °C) was used as a solvent. Then, lipids in the sample were extracted for 4 h. After that, the thimble was removed, dried, then cooled and weighed again (W_3):

$$\text{Lipids, \%} = (W_2 - W_3)/(W_2 - W_1) \times 100. \quad (3)$$

Protein determination: Protein was determined using the micro-Kjeldahl distillation procedure. The samples were digested by heating with concentrated H_2SO_4 in the presence of the digestion mixture (K_2SO_4 + $CuSO_4$). The mixture was then made alkaline with 40% NaOH. Ammonium sulphate thus formed, released ammonia, which was collected in 4% boric acid solution and titrated against standard HCl. The percent nitrogen content of the sample was calculated as follows:

$$\text{Nitrogen, \%} = 1.4\ (\text{ml HCl}_{\text{sample}} - \text{ml HCl}_{\text{blank}}) \times \text{conc. of HCl} \times \times\ 100 / \text{sample weight (g)}. \quad (4)$$

Total protein was calculated by multiplying nitrogen% with appropriate conversion factor (6.25).

$$\text{Protein, \%} = N\% \times 6.25. \quad (5)$$

Total carbohydrate determination: Total carbohydrates were calculated by difference as follows:

$$\text{Total carbohydrates, \%} = = 100 - (\text{Moisture\%} + \text{Lipids\%} + \text{Protein\%+ash\%}) \quad (6)$$

2.2.5. Physical characteristics of cookies

Weight (g), height (cm), volume (cm^3), specific volume (cm^3 /g), diameter (cm), and spread ratio (diameter/height) were measured according to Rabie et al. [15] and Ganorkar and Jain [16].

2.2.6. Color measurement of cookies

The L^*, a^* and b^* uniform color space was used to determine the color parameters of the cookies according to CIE [17] using a colorimeter (Model CR-410, Konica Minolta, Japan). The Hue angle (θ) is defined as a color wheel, with red-purple at angles of 0° and 360°, yellow at 90°, bluish-green at 180°, and blue at 270°. Chroma (C) represents color saturation or purity and is calculated from $C = (a^2 + b^2)^{1/2}$. The formula for calculating hue angles (θ) was $\theta = \tan^{-1}$ (b/a).

2.2.7. Samples Extraction

Samples were extracted in accordance with Khanavi et al. [18] with some modifications. A magnetic stirrer (IKA-Combimag RCT, Germany) was used to mix about 0.2 g of powdered artichoke by-products with 50 ml of methanol in a flask at 1100 rpm at room temperature for one

hour. The mixture was then filtered using Whatman No. 5 filter paper. The total flavonoid and total phenolic contents, and antioxidant activity of each extract were measured.

2.2.8. Total phenolic content (TPC)

Total phenolic content was estimated by the Folin–Ciocalteu method [19]. Two hundred microliters of the diluted sample were added to 1 ml of 1:10 diluted Folin–Ciocalteu reagent. An amount of 800 µl of saturated sodium carbonate (75 g/l) was added after 4 min. After 2 h of incubation at room temperature, the absorbance at 765 nm was measured. Gallic acid (0–500 mg/l) was used for the standard calibration curve. The TPC was expressed as milligrams of gallic acid equivalents per gram of the sample (mg GAE/g).

2.2.9. Total flavonoid content

Total flavonoid content was determined according to the colorimetric aluminum chloride method described by Zhishen et al. [20]. An amount of 1.25 ml of water and 75 µl of a 5% $NaNO_2$ solution were added to an aliquot (250 µl) of each extract or standard solution. Then, 150 µl of 10% $AlCl_3$ solution were added after 6 minutes. Next, 0.5 ml of 1 M NaOH solution was added after 5 minutes, and the total volume was then brought to 2.5 ml with water. Absorbance was measured at 510 nm against a blank. Quercetin acid was used as a standard and the total flavonoid content of the samples was expressed as mg of quercetin equivalent per g dry sample.

2.2.10. Antioxidant activity

The DPPH• radical scavenging activity was measured by following the method as described by Platat et al. [21]. Briefly, 3.9 mL of DPPH• solution (0.25mM) was added to 100 µL of extract. Absorbance of the extract was read at 515 nm at 0 and 30 min using methanol as blank. Percent (%) DPPH• scavenging activity was calculated as follows:

$$\text{Inhibition (\%)} = (A_{\text{control}} - A_{\text{sample}} / A_{\text{control}}) \times 100, \quad (7)$$

where A_{control}: the absorbance of the control; A_{sample}: the absorbance of the sample.

2.2.11. Sensory evaluation of cookies

Ten semi-trained panelists, including employees and students from the Food Science Department of the Faculty of Agriculture, Cairo University, assessed cookie samples organoleptically. A ten-point hedonic scale was used to rate appearance, color, texture, flavor, taste, and overall acceptability of each sample. A score of 10 indicated the qualities that were most preferred, a score of 5 indicated the characteristics that were unacceptable, and a score of 1 indicated the characteristics that were most disliked [22].

2.2.12. Statistical analysis

Every measurement was carried out in triplicate, except for sensory evaluation (n=10). Analysis of variance (ANOVA) was performed on the data. The significance level was set at ⩽ 0.05.

3. Results and discussion

3.1. Artichoke bracts

3.1.1. Proximate chemical composition, phytochemical compounds and antioxidant activity of wheat flour (WF) and artichoke bract powder (ABP)

The proximate chemical composition, total phenolic and total flavonoid contents, and antioxidant activity of *ABP* and *WF* are presented in Table 2. Data showed that significant differences ($p \leqslant 0.05$) were observed among *ABP* and *WF* in their composition. In contrast to commercial wheat flour, *ABP* contained significantly less moisture. *ABP* had higher protein and ash contents than *WF*. The protein content of *ABP* was 19.57%, whereas the ash content was 8.95%. These results are in agreement with Boubaker et al. [23] and Eman et al. [10]. The content of phenolic compounds in *WF* and ABP was 0.16 and 7.49 mg GAE/g, respectively. The content of flavonoid compounds in *WF* and ABP was 0 and 1.79 mg QE /g, respectively. The antioxidant activity as DPPH radical scavenging activity in *WF* and *ABP* was 4.79 and 74.67%, respectively. The results are in agreement with Sihem et al. [24] who noted that artichoke bracts and stems have the high content of polyphenols and antioxidant activity.

Table 2. **Proximate chemical composition (%), phytochemical compounds and the antioxidant activity of WF and ABP**

Таблица 2. **Химический состав (%), фитохимические соединения и антиоксидантная активность пшеничной муки (WF) и порошка прицветников артишока (ABP)**

Parameters \ Constituent	WF	ABP
Moisture (%)	$11.63^{a} \pm 0.38$	$4.42^{b} \pm 0.01$
Ash (%)	$0.57^{b} \pm 0.00$	$8.95^{a} \pm 0.02$
Total lipids (%)	$1.00^{a} \pm 0.00$	$0.45^{b} \pm 0.02$
Total protein (%)	$10.00^{b} \pm 0.00$	$19.57^{a} \pm 0.23$
Total carbohydrates* (%)	$76.80^{a} \pm 0.38$	$66.61^{b} \pm 0.20$
Total phenolic content (mg GAE/g)	$0.16^{b} \pm 0.01$	$7.49^{a} \pm 0.64$
Total flavonoid content (mg QE/g)	$0.00^{b} \pm 0.00$	$1.79^{a} \pm 0.12$
Antioxidant activity DPPH (%)	$4.79^{b} \pm 0.00$	$74.67^{a} \pm 0.45$

* Total carbohydrates were calculated by difference. Means ± (SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leqslant 0.05$).

3.1.2. Proximate chemical composition (%), total phenolic content and antioxidant activity of wheat flour cookies (WFC) and artichoke bract powder cookies (ABPC)

The addition of powdered artichoke bracts to cookies had an impact on their chemical composition, as shown in Table 3. Compared to the control, the cookie samples with the added artichoke bract powder had higher contents of moisture, ash, and total protein. Cookies made with artichoke bracts also had lower contents of total lipids and total carbohydrates. These results imply that adding artichoke bracts to cookies improved their mineral and total protein contents. The results are in agreement with the results found by Eman et al., [10] who noted that artichoke bracts have high moisture, high total protein and high ash contents, but the low total lipid content. The *ABPC* (15%) showed significant difference ($p \leqslant 0.05$) and the highest phenolic content, flavonoid content and antioxidant activity followed by *ABPC* (10%). With an increase in the *ABP* concentrations in cookies, the phenolic content and antioxidant activity increased. An increase in the antioxidant activity in cookies may be due to the high levels of polyphenols that are present in *ABP*. These results are in agreement with those reported by Sihem et al. [24] who found that *ABP* contains high levels of polyphenolic compounds.

3.1.3. Physical characteristics and color measurement of WFC and ABPC

The physical properties and color parameters of the cookies prepared either from wheat flour (*WFC*) or from wheat flour with artichoke bract powder (*ABPC*) are shown in Table 4 and Figure 1. Data show that supplemented cookies with artichoke bracts exhibited significantly ($p \leqslant 0.05$) lower values of volume, specific volume and diameter than the control cookies. There were no significant ($p \leqslant 0.05$) differences between the values obtained for weight, height and spread ratio of the cookies enriched with 10 and 15% *ABPC* and the control (100% wheat flour) cookies. The

Figure 1. **Wheat flour cookies (control) and artichoke bract powder cookies.**

Рисунок 1. **Печенье из пшеничной муки (контроль) и печенье с порошком прицветников артишока**

Table 3. **Proximate chemical composition (%), total phenolic content and the antioxidant activity of WFC and ABPC**

Таблица 3. **Химический состав (%), фитохимические соединения и антиоксидантная активность печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком прицветников артишока (ABPC)**

Parameters \ Samples	WFC	ABPC 10%	ABPC 15%
Moisture (%)	$5.40^{b} \pm 0.14$	$7.14^{a} \pm 0.01$	$7.16^{a} \pm 0.10$
Ash (%)	$1.07^{c} \pm 0.02$	$1.62^{b} \pm 0.14$	$2.07^{a} \pm 0.13$
Total lipids (%)	$13.70^{a} \pm 0.24$	$12.70^{b} \pm 0.01$	$10.9^{c} \pm 0.14$
Total protein (%)	$6.15^{c} \pm 0.07$	$8.15^{b} \pm 0.07$	$9.65^{a} \pm 0.01$
Total carbohydrates* (%)	$73.68^{a} \pm 0.14$	$70.39^{b} \pm 0.22$	$70.22^{b} \pm 0.37$
Total phenolic content (mg GAE/g)	$0.01^{c} \pm 0.00$	$0.86^{b} \pm 0.07$	$1.75^{a} \pm 0.11$
Antioxidant activity DPPH (%)	$6.55^{c} \pm 0.42$	$34.98^{b} \pm 0.67$	$58.46^{a} \pm 0.81$

WFC — wheat flour cookies, ABPC — artichoke bract powder cookies. Means ± (SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leqslant 0.05$). *Total carbohydrates were calculated by difference.

Table 4. **Physical characteristics and color measurement of WFC and ABPC**

Таблица 4. **Физические характеристики и измерение цвета печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком прицветников артишока (ABPC)**

Samples / Parameters		WFC	ABPC 10%	ABPC 15%
Weight (g)		16.28^{a}±0.54	16.44^{a}±0.60	16.43^{a}±0.44
Height (cm)		1.30^{a}±0.00	1.15^{a}±0.07	1.15^{a}±0.07
Volume (cm^3)		29.50^{a}±0.70	20.5^{b}±0.70	20.5^{b}±0.70
Specific volume (cm^3 /g)		1.81^{a}±0.10	1.24^{b}±0.00	1.24^{b}±0.07
Diameter (cm)		4.60^{a}±0.14	4.30^{b}±0.00	4.30^{b}±0.00
Spread ratio (diameter/height)		3.53^{a}±0.10	3.74^{a}±0.22	3.74^{a}±0.22
Color	***L****	70.45^{a}±0.53	53.59^{b}±0.30	53.85^{b}±0.43
	a*	1.55^{b}±0.06	3.31^{a}±0.10	3.16^{a}±0.15
	b*	18.67^{a}±0.02	10.97^{b}±0.36	10.40^{b}±0.37
	C	18.73^{a}±0.08	11.45^{b}±0.44	10.87^{b}±0.51
	H	85.25^{a}±0.33	73.20^{b}±0.77	73.09^{b}±0.32

WFC — wheat flour cookies, ABPC — artichoke bract powder cookies. Means ± (SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leq 0.05$).

results are in agreement with Canale et al. [25] and Eman et al. [10]. The color was changed to green by the addition of artichoke ABP. The *a** value significantly increased, but *b**, *L**, C and H decreased, with a greater decrease at the 15% substitution level. According to the findings of Frutos et al. [26], there was a tendency for the cookies to get noticeably darker as more artichoke bract flour was added. According to Manonmani et al. [27], the Maillard reaction is primarily responsible for the cookie color.

3.1.4. Sensory evaluation of WFC and ABPC

Sensory evaluation values of *WFC* and *ABPC* are presented in Table 5. Data showed that the panelists approved of all properties of all samples. Also, data showed that the sample that contained 10% artichoke bracts was described as most liked. Statistical analysis revealed that there were no significant differences between the cookies containing 0, 10, 15% *ABP* in all properties except taste and overall acceptability in 15% *ABP* that had lower scores. Overall acceptability refers to how customers or panelists accept the product in general. The results of taste and overall acceptability are in agreement with Natale et al. [28] who reported that artichoke bracts may be a cause of bitter taste due to the presence of flavanols.

3.2. Artichoke stems

3.2.1. Proximate chemical composition, phytochemical compounds and antioxidant activity of wheat flour and artichoke stem powder (ASP)

The proximate chemical composition, total phenolic and total flavonoid contents, and the antioxidant activity of artichoke stem powder (*ASP*) and wheat flour (*WF*) are presented in Table 6. Data showed that significant differences ($p \leq 0.05$) were observed between *ASP* and *WF* in their composition. In contrast to commercial wheat flour, *ASP* contained significantly less moisture. *WF* had more protein than *ASP*, whereas the ash content was higher in *ASP* than in *WF*. These results are in agreement with the results reported by Boubaker et al. [23] and Eman et al. [10]. The content of phenolic compounds in *WF* and *ASP* was 0.16 and 27.25 mg GAE/g, respectively. The content of flavonoid compounds in *WF* and *ASP* was 0 and 1.77 mg QE/g, respectively. Moreover, the antioxidant activity as the DPPH radical scavenging activity in *WF* and *ASP* was 4.79 and 77.96%, respectively. The results are in agreement with Sihem et al. [24] who noted that artichoke bracts and stems have the high content of polyphenols and antioxidant activity.

3.2.2. Proximate chemical composition, total phenolic content and the antioxidant activity of wheat flour cookies (WFC) and artichoke stem powder cookies (ASPC)

The addition of powdered artichoke stems to cookies had an impact on their chemical composition, as shown in Table 7. Compared to the control, the cookie samples with the added artichoke stem powder had higher contents of moisture, ash, and total lipids. Cookies made with artichoke stems also had lower contents of total protein. These results imply that adding artichoke stems to cookies improved their mineral and total lipid contents. The results of ash and total protein contents are in agreement with Boubaker et al. [23]. The highest antioxidant activity, total phenolic and total flavonoid contents were found in the *ASPC* (15%), followed by *ASPC* (5%). This difference was significant ($p \leq 0.05$). The total phenolic and antioxidant activity of cookies were all increased by raising *ASP* concentrations. The high quantities of polyphenols found in *ASP* may be the cause of the increased antioxidant activity in cookies. These findings were supported by the findings of Sihem et al. [24] who mentioned that ASP contains a significant amount of polyphenolic compounds.

3.2.3. Physical characteristics and color measurement of WFC and ASPC

The physical characteristics of the cookies made with either wheat flour (*WFC*) or wheat flour with artichoke stem powder (*ASPC*) are displayed in Table 8 and Figure 2. The data demonstrate that cookies containing artichoke stems had significantly ($p \leq 0.05$) lower values for height, volume, specific volume, and diameter than control cookies. In

Table 5. **Sensory evaluation of WFC and ABPC**

Таблица 5. **Сенсорная оценка печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком прицветников артишока (ABPC)**

Parameters / Samples	Appearance (10)	Color (10)	Texture (10)	Flavor (10)	Taste (10)	Overall acceptability (10)
WFC	9.80^{a}±0.44	9.60^{a}±0.89	9.20^{a}±0.83	9.80^{a}±0.44	9.60^{a}±0.54	9.80^{a}±0.44
ABPC 10%	9.60^{a}±0.54	9.37^{a} ±0.57	9.20^{a}±0.83	9.20^{a}±0.83	9.40^{a}±0.89	9.20^{a}±0.83
ABPC 15%	9.60^{a}±0.54	9.31^{a}±0.65	9.20^{a}±0.83	9.20^{a}±0.83	8.10^{b}±0.89	8.20^{b}±0.44

WFC — wheat flour cookies, ABPC — artichoke bract powder cookies. Means ± (SD) followed by different superscripts within columns are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 6. **Proximate chemical composition (%), phytochemical compounds and the antioxidant activity of WF and ASP**

Таблица 6. **Химический состав (%), фитохимические соединения и антиоксидантная активность пшеничной муки (WF) и порошка стеблей артишока (ABP)**

Constituent / Parameter	WF	ASP
Moisture	11.63^{a}±0.38	5.22^{b}±0.02
Ash	0.57^{b}±0.00	10.57^{a}±0.07
Total lipids	1.00^{a}±0.00	1.42^{a}±0.39
Total protein	10.00^{a}±0.00	8.93^{b}±0.01
Total carbohydrates*	76.80^{a}±0.38	73.86^{b}±0.33
Total phenolic content (mg GAE/g)	0.16^{b}±0.01	27.25^{a}±0.35
Total flavonoid content (mg QE/g)	0.00^{b}±0.00	1.77^{a}±0.26
Antioxidant activity DPPH (%)	4.79^{b}±0.00	77.96^{a}±0.09

* Total carbohydrates were calculated by difference. Means ± (SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 7. **Proximate chemical composition (%), total phenolic content and the antioxidant activity of WFC and ASPC**

Таблица 7. **Химический состав (%), фитохимические соединения и антиоксидантная активность печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком стеблей артишока (ASPC)**

Samples / Parameters	WFC	ASPC 5%	ASPC 15%
Moisture (%)	5.40^{b}±0.14	6.22^{a}±0.04	6.18^{a}±0.04
Ash (%)	1.07^{b}±0.02	1.25^{ab}±0.31	1.69^{a}±0.05
Total lipids (%)	13.70^{b}±0.24	14.22^{ab}±0.25	14.65^{a}±0.21
Total protein (%)	6.15^{a}±0.07	5.55^{b}±0.07	4.90^{c}±0.00
Total carbohydrates* (%)	73.68^{a}±0.14	72.76^{a}±0.61	72.58^{a}±0.22
Total phenolic content (mg GAE/g)	0.01^{c}±0.00	0.58^{b}±0.08	1.7^{a}±0.00
Antioxidant activity DPPH (%)	6.55^{c}±0.42	18.52^{b}±0.54	35.46^{a}±0.79

WFC — wheat flour cookies, ASPC — artichoke stem powder cookies. Means ± (SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leq 0.05$). * Total carbohydrates were calculated by difference.

Table 8. Physical characteristics and color measurement of WFC and ASPC

Таблица 8. **Физические характеристики и измерение цвета печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком стеблей артишока (ASPC)**

Parameters \ Samples		WFC	ASPC5%	ASPC15%
Weight (g)		16.28^{a}±0.54	16.16^{a}±0.10	14.06^{b}±0.10
Height (cm)		1.30^{a}±0.00	1.20^{ab}±0.00	1.15^{b}±0.07
Volume (cm^3)		29.50^{a}±0.70	25.25^{b}±0.35	21.50^{c}±0.70
Specific volume (cm^3 /g)		1.81^{a}±0.10	1.56^{b}±0.03	1.52^{b}±0.03
Diameter (cm)		4.60^{a}±0.14	4.30^{b}±0.00	4.30^{b}±0.00
Spread ratio (diameter/height)		3.53^{a}±0.10	3.58^{a}±0.00	3.74^{a}±0.22
Color	***L****	70.45^{a}±0.53	61.33^{b}±0.65	58.42^{c}±0.85
	a*	1.55^{c}±0.06	2.70^{b}±0.09	3.17^{a}±0.24
	b*	18.67^{a}±0.02	15.10^{b}±0.50	13.37^{c}±0.67
	C	18.73^{a}±0.08	15.33^{b}±0.14	13.74^{c}±0.34
	H	85.25^{a}±0.33	79.86^{b}±0.48	76.66^{c}±0.22

WFC — wheat flour cookies, ASPC — artichoke stem powder cookies. Means±(SD) followed by different superscripts within rows are significantly different ($p \leq 0.05$).

Figure 2. **Wheat flour cookies (control) and artichoke stem powder cookies**

Рисунок 2. **Печенье из пшеничной муки (контроль) и печенье с порошком стеблей артишока**

terms of weight there were no significant differences between the control samples of cookies made with 100% wheat flour and the enriched cookies with 5% *ASPC* ($P \leq 0.05$). Also, there were no significant differences in spread ratio between the control samples of cookies made with 100% wheat flour and the enriched cookies with 5% and 15% *ASP* ($P \leq 0.05$). The results of height, volume and specific volume are consistent with Canale et al. [25] and Eman et al. [10]. The color was changed to green by the addition of artichoke stem flour. The *a** value significantly increased, but *b**, *L**, C and H decreased, with a greater decrease at 15% substitution level. According to the findings of Frutos et al. [26], there was a tendency for the cookies to get noticeably darker as more artichoke stem flour was added. According to Manonmani et al. [27], the Maillard reaction is primarily responsible for the cookie color.

3.2.4. Sensory evaluation of WFC and ASPC

Sensory evaluation values of *WFC* and *ASPC* are presented in Table 9. Data showed that the panelists approved of all properties of all samples. Also, data showed that there were no significant differences between *ASPC* (5 and 15%) and *WFC* in appearance, texture and flavor. Cookies made with artichoke stem powder had lower scores for color, taste and overall acceptability. Overall acceptability refers to how customers or panelists accept the product in general. According to Elhassaneen et al. [29], color which can be a sign of baking completeness, has a significant impact also on the initial acceptability of baked goods.

4. Conclusion

The current study showed that artichoke by-products were rich in phenolic compounds, flavonoids, and minerals. Furthermore, artichoke by-products demonstrated high levels of the inherent antioxidant activity. Artichoke by-product flour has a high mineral, total protein and total lipid contents, which makes it a useful ingredient in many local foods, including cookies and other bakery products. Artichoke by-products were found to significantly affect the phytochemical properties of cookies when added in small amounts (15%). Specifically, they increased the amount of polyphenolic compounds compared to the control cookies. The spread ratio of the cookies enhanced with 15% artichoke by-products and was comparable to that of the control cookies. Additionally, a color difference between the cookies with artichoke by-products and the control cookies was seen.

Table 9. **Sensory evaluation of WFC and ASPC**

Таблица 9. **Сенсорная оценка печенья из пшеничной муки (WFC) и печенья с порошком стеблей артишока (ASPC)**

Parameters \ Samples	Appearance (10)	Color (10)	Texture (10)	Flavor (10)	Taste (10)	Overall acceptability (10)
WFC	9.80^{a}±0.44	9.60^{a}±0.89	9.20^{a}±0.83	9.80^{a}± 0.44	9.60^{a}±0.54	9.80^{a}±0.44
ASPC 5%	9.80^{a}±0.44	8.77^{ab}±0.83	9.40^{a}±0.89	9.60^{a}±0.54	9.00^{ab}±0.70	9.45^{ab}±0.50
ASPC 15%	9.60^{a}±0.54	8.04^{b}±0.71	9.40^{a}±0.83	9.60^{a}±0.89	8.80^{b}±0.44	8.90^{b}±0.12

WFC — wheat flour cookies, ASPC — artichoke stem powder cookies. Means±(SD) followed by different superscripts within columns are significantly different ($p \leq 0.05$).

REFERENCES

1. FAO. (2019). The State of Food and Agriculture (SOFA): Moving forward on food loss and waste reduction, Rome. Retrieved from http://www.fao.org/publications/sofa/en/ Accessed April 12, 2024
2. Antonic, B., Dordevic, D., Jancikova, S., Holeckova, D., Tremlova, B., Kulawik, P. (2021). Effect of grape seed flour on the antioxidant profile, textural and sensory properties of waffles. *Processes*, 9(1), Article 131. https://doi.org/10.3390/pr9010131
3. Helkar, P.B., Sahoo, A.K., Patil, N.J. (2016). Review: Food industry by-products used as a functional food ingredients. *International Journal of Waste Resources*, 6(3), Article 1000248. https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000248
4. Rejeb, I. B., Dhen, N., Gargouri, M., Boulila, A. (2020). Chemical composition, antioxidant potential and enzymes inhibitory properties of globe artichoke by-products. *Chemistry and Biodiversity*, 17(9), Article e2000073. https://doi.org/10.1002/cbdv.202000073
5. Carpentieri, S., Augimeri, G., Ceramella, J., Vivacqua, A., Sinicropi, M. S., Pataro, G., et al. (2022). Antioxidant and anti-inflammatory effects of extracts from pulsed electric field-treated artichoke by-products in lipopolysaccharide-stimulated Human THP-1 macrophages. *Foods*, 11(15), Article 2250. http://doi.org/10.3390/foods11152250
6. FAO. (2018). Crops and livestock products. Retrieved from http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC Accessed April 18, 2024
7. Lombardo, S., Pandino, G., Mauromicale, G. (2018). The influence of pre-harvest factors on the quality of globe artichoke. *Scientia Horticulturae*, 233, 479–490. http://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.036
8. Rangboo, V., Noroozi, M., Zavoshy, R., Rezadoost, S. A., Mohammadpoorasl, A. (2016). The effect of artichoke leaf extract on alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase in the patients with nonalcoholic steatohepatitis. *International Journal of Hepatology*, 2016, 1–6. http://doi.org/10.1155/2016/4030476
9. de Falco, B., Incerti, G., Amato, M., Lanzotti, V. (2015). Artichoke: Botanical, agronomical, phytochemical, and pharmacological overview. *Phytochemistry Reviews*, 14(6), 993–1018. http://doi.org/10.1007/s11101-015-9428-y
10. Eman, A.M., Zeitoun, M.A.M., Wafaa, A.A., Hanem, M.O (2018). Evaluation of globe artichoke by-products for enhancing functional properties of some foods. *Journal of the Advances in Agricultural Researches,* 23(1), 112–129.
11. Lavecchia, R., Maffei, G., Paccassoni, F., Piga, L., Zuorro, A. (2019). Artichoke waste as a source of phenolic antioxidants and bioenergy. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 2975–2984. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0305-y
12. Cappa, C., Kelly, J. D., Ng, P. K. W. (2020). Baking performance of 25 edible dry bean powders: Correlation between cookie quality and rapid test indices. *Food Chemistry*, 302, Article 125338. http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125338
13. Köten, M. (2020). Influence of roasted and unroasted terebinth (*Pistacia terebinthus*) on the functional, chemical and textural properties of wire-cut cookies. *Food Science and Technology*, 41(1), 245–253. https://doi.org/10.1590/fst.17020
14. A.O.A.C. (2012). Official methods of analysis: Association of Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, USA, 2012.
15. Rabie, M.M., Ibrahim, F.Y., Youssif, M.R.G., Ezz El-Ragal, N.M. (2020). Effect of Moringa oleifera leaves and seeds powder supplementation on quality characteristics of cookies. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 11(2), 65–73. https://doi.org/10.21608/jfds.2020.78888
16. Ganorkar, P.M., Jain, R.K. (2014). Effect of flaxseed incorporation on physical, sensorial, textural and chemical attributes of cookies. *International Food Research Journal*, 21(4), 1515–1521.
17. CIE (International Commission on Illumination) (1976). Official recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations and metric colour terms, Suppl. 2. CIE Publication No. 15 Colourimetry. Paris.

18. Khanavi, M., Saghari, Z., Mohammadirad, A., Khademi, R., Haji, A.A., Abdollahi, M. (2009). Comparison of antioxidant activity and total phenols of some date varieties. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 17, 104–108.
19. Mohsen, S. M., Ammar, A. S. (2009). Total phenolic contents and antioxidant activity of corn tassel extracts. *Food Chemistry*, 112(3), 595–598. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.014
20. Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555–559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2
21. Platat, C., Habib, H.M., Al Maqbali, F.D., Jaber, N.N., Ibrahim, W.H. (2014). Identification of date seeds varieties patterns to optimize nutritional benefits of date seeds. *Journal of Nutrition and Food Sciences*, S8, Article 008. https://doi.org/10.4172/2155-9600.S8-008
22. Poste, L.M., Mackie, D.A., Butler, G., Larmond, E. (2001). Laboratory methods for sensory analysis of food, 2. *Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology (Japan)*, 48(5), 378–392. https://doi.org/10.3136/NSKKK.48.378
23. Boubaker, M., Damergi, C., Ben Marzouk, C., Blecker, C., Bouzouita, N. (2016). Effect of artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-product on the quality and total phenol content of bread. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 5(5), 548–553. https://doi.org/10.13171/mjc55/01606041425/bouzouita
24. Sihem, D., Samia, D., Gaetano, P., Sara, L., Giovanni, M., Hassiba, C. et.al. (2015). *In vitro* antioxidant activities and phenolic content in crop residues of Tunisian globe artichoke. *Scientia Horticulturae*, 190, 128–136. https://doi.org/10.13171/10.13140/RG.2.1.5122.8568
25. Canale, M., Spina, A., Summo, C., Strano, M. C., Bizzini, M., Allegra, M. et al. (2022). Waste from artichoke processing industry: Reuse in bread-making and evaluation of the physico-chemical characteristics of the final product. *Plants*, 11(24), Article 3409. http://doi.org/10.3390/plants11243409
26. Frutos, M. J., Guilabert-Antón, L., Tomás-Bellido, A., Hernández-Herrero, J.A. (2008). Effect of artichoke (*Cynara scolymus* L.) fiber on textural and sensory qualities of wheat bread. *Food Science and Technology International*, 14(5 Suppl), 49–55. http://doi.org/10.1177/1082013208094582
27. Manonmani, D., Bhol, S., Bosco, S.J.D. (2014). Effect of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour on bread quality. *Open Access Library Journal*, 1, 1–6. http://doi.org/10.4236/oalib.1100366
28. Natale, A., Nardiello, D., Palermo, C., Muscarella, M., Quinto, M., Centonze, D. (2015). Development of an analytical method for the determination of polyphenolic compounds in vegetable origin samples by liquid chromatography and pulsed amperometric detection at a glassy carbon electrode. *Journal of Chromatography A*, 1420, 66–73. http://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.09.082
29. Elhassaneen, Y., Ghamry, H., Elbassyouny, G. (July 16–17, 2018). *Improvement of rheological properties, bioactive compounds content and antioxidant activity in soft dough biscuits with the incorporation of prickly pear peels powder*. Proceeding of the 1st Scientific International Conference of the Faculty of Specific Education, Minia University, Specific Education, Innovation and Labor Market. Minia Egypt, 2018.

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Abdalla S. M. Ammar, Professor, Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 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 * corresponding author	**Аммар Абдалла С. М.** — профессор, кафедра науки о питании и технологии, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0101–997–17–99 E mail: abdallaammar@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9919-8760 * автор для контактов
Youssef M. Riyad, Professor, Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt Tel: +2–0102–332–1933 E-mail: yriyad74@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1782-1599	**Рияд Юсеф М.** — профессор, кафедра науки о питании и технологии, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0102–332–1933 E mail: yriyad74@yahoo.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1782-1599
Azza A. A. Ebrahiem, Master Science Student, Food Science and Technology Department, Faculty of Agriculture, Cairo University 1 Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt Tel: +2–0115–786–9698 E-mail: azzaadel336@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1336-4383	**Ибрахим Азза А. А.** — аспирант, кафедра науки о питании и технологии, Сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0115–786–9698 E-mail: azzaadel336@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1336-4383
Contribution	**Критерии авторства**
Authors 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/10.21323/2618-9771-2024-7-3-444-453

Поступила 14.05.2024
Поступила после рецензирования 09.08.2024
Принята в печать 26.09.2024
© Мелешкина Е. П., Ванина Л. В., Витол И. С., 2024

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

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ О ЗЕРНЕ. ОБЗОР

Мелешкина Е. П., Ванина Л. В., Витол И. С.*

Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
зерно и продукты его переработки, композитные виды муки и крупы, хранение, качество и безопасность, отруби, зерновые гидролизаты

АННОТАЦИЯ

Представлен аналитический обзор публикаций по наиболее актуальным и перспективным направлениям в области науки о зерне: инновационным технологиям переработки злаковых, бобовых и масличных культур, получению композитных видов муки и крупы, обладающих сбалансированным составом и функциональными свойствами; оценке их технологических, биохимических, реологических и органолептических показателей. Рассмотрены варианты их использования при производстве обогащенных мучных и крупяных продуктов как общего, так и специального назначения; ферментативным способам модификации побочных (вторичных) продуктов переработки зерна и зерносмесей; использованию микробных ферментных препаратов целлюлолитического, протеолитического и фитазного действия в качестве инструментария глубокой переработки побочного (вторичного) сырья для получения зерновых гидролизатов и структурно-модифицированных отрубей — ценных компонентов для повышения пищевой и биологической ценности пищевых продуктов и кормов, а также как источник доступного азотного и фосфорного питания для дрожжей в технологиях брожения; разработке методов определения норм и сроков безопасного хранения зерна и зернопродуктов — муки пшеничной и крупы манной, по показателю кислотного числа жира; оценке качества и микробиологической безопасности зерна; разработке требований целевого использования муки хлебопекарной, кондитерской, макаронной, кулинарной; научно обоснованным подходам к мероприятиям по защите хлебных запасов от вредителей. Анализ публикаций, в которых отражены наиболее важные и актуальные вопросы науки о зерне, свидетельствует о тесной взаимосвязи фундаментальных и прикладных исследований, которые в целом направлены на обеспечение продовольственной безопасности и сохранения здоровья населения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS-2022-0006 и № FGUS-2022-0016 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 14.05.2024
Accepted in revised 09.08.2024
Accepted for publication 26.09.2024
© Meleshkina E. P., Vanina L. V., Vitol I. S., 2024

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

CURRENT DEVELOPMENTS IN GRAIN SCIENCE. REVIEW

Elena P. Meleshkina, Lyudmila V. Vanina, Irina S. Vitol*

All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing, Moscow, Russia

KEY WORDS:
grain and its processed products, composite types of flour and groats, storage, quality and safety, bran, grain hydrolysates

ABSTRACT

An analytical review of publications on the most relevant and promising areas in the field of grain science is presented: innovative technologies for processing cereals, legumes and oilseeds, obtaining composite types of flour and cereals with a balanced composition and functional properties; assessment of their technological, biochemical, rheological and organoleptic indicators. The authors examined options for their use in the production of fortified flour and cereal products for both general and special purposes; enzymatic methods for modifying by-products (secondary products) of grain and grain mixtures processing; the use of microbial enzyme preparations with cellulolytic, proteolytic and phytase action as a tool for deep processing of by-products (secondary raw materials) to obtain grain hydrolysates and structurally modified bran — valuable components for increasing the nutritional and biological value of food products and feed, as well as a source of available nitrogen and phosphorus nutrition for yeast in fermentation technologies; development of methods for determining norms and duration of safe storage of grain and grain products — wheat flour and semolina, based on the acid value of fat; assessment of the quality and microbiological safety of grain; development of requirements for the targeted use of bakery, confectionery, pasta, and culinary flour; scientifically based approaches to measures to protect grain reserves from pests. An analysis of publications that reflect the most important and pressing issues in grain science demonstrates the close relationship between fundamental and applied research, which is generally aimed at ensuring food security and maintaining public health.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2022-0006 and No. FGUS-2022-0016 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Зерновая отрасль — одна из важнейших стратегических отраслей, которой принадлежит ключевая роль в обеспечении продовольственной безопасности. Роль зернопродуктов — мучных и крупяных изделий в питании современного человека трудно переоценить. Они популярны и пользуются высоким спросом во всем мире среди различных возрастных и социальных групп населения [1–3]. Традиционно зернопродукты занимают особое место в рационе питания населения и в нашей стране: на их долю приходится до 40% от общего рациона, при этом большинство готовых мучных и крупяных продуктов, присутствующих на рынке, до последнего времени не отвечали требованиям сбалансированности состава для создания рационов на основе принципов рационального питания [4,5].

В то же время зерно — с биохимической точки зрения — это уникальный биологический объект. И несмотря на то, что современная наука накопила огромное количество информации о биохимических и физиологических процессах, протекающих в зерновке при созревании, хранении, переработке, многие вопросы остаются до конца не исследованными. С развитием и появлениим новых современных инструментальных методов анализа, применением системного подхода в исследованиях, опираясь на накопленный опыт, в настоящее время появилась возможность восполнить существующие пробелы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Мелешкина, Е. П., Ванина, Л. В., Витол, И. С.** (2024). Актуальные направления развития науки о зерне. Обзор. *Пищевые системы,* 7(3), 444–453. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-444-453

FOR CITATION: **Meleshkina, E. P., Vanina, L. V., Vitol, I. S.** (2024). Current developments in grain science. Review. *Food Systems*, 7(3), 444–453. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-444-453

в нашем представлении об этих процессах с учетом многочисленных факторов, оказывающих влияние на зерно и зернопродукты [6,7].

ВНИИ зерна и продуктов его переработки проводит фундаментальные и прикладные исследования процессов хранения, очистки, сушки зерна; создает технологии для комплексной переработки зерна, крупяных культур и композитных зерносмесей на основе зерновых, бобовых и масличных культур для создания новых сбалансированных продуктов питания, в том числе и функционального назначения; разрабатывает мероприятия по защите хлебных запасов от вредителей, способы ферментативной модификации побочных (вторичных) продуктов переработки зерна и зерносмесей, методики определения норм и сроков безопасного хранения зерна и зернопродуктов, оценки его качества и безопасности, в том числе и микробиологической; методов и средств экспрессной оценки качества по спектральным характеристикам зерна и продуктов его переработки; на основе ранее разработанной математической модели создает систему классификации зерна и муки по целевому назначению — хлебопекарной, кондитерской, макаронной, кулинарной; решает приоритетные задачи стандартизации: актуализация действующих ГОСТов и разработка новых национальных и межгосударственных стандартов; разрабатывает научное обеспечение для решения вопросов, связанных с формированием зерновых агропромышленных кластеров России. Инновационные разработки ВНИИЗ, в первую очередь, направлены на сохранение зернового потенциала страны, развитие мукомольной и крупяной отраслей, создание безопасных продуктов, отвечающих современным требованиям, для сохранения здоровья населения и обеспечения продовольственной независимости.

Это в полной мере соответствует концепции государственной политики в области здорового питания[1], один из механизмов реализации которой предусматривает «разработку и промышленный выпуск широкого ассортимента продуктов здорового питания, создаваемых с использованием наукоемких инновационных технологий. Это касается новых видов отечественных пищевых продуктов. Использование этих продуктов направлено на достижение адекватной обеспеченности макро- и микронутриентами, минорными биологически активными компонентами пищи, оказывающими доказанное благоприятное влияние на физиологические функции организма и повышение адаптационного потенциала организма человека».

Опираясь на накопленный опыт, двигаясь вперед, развиваясь, наука о зерне не только решает насущные вопросы, но и во многом предопределяет дальнейшие направления как фундаментальных исследований, так и перспективы практических подходов и технологических решений для индустриальных партнеров в зерновой отрасли.

Цель исследования — анализ современных публикаций для определения направлений дальнейшего развития науки о зерне; научного обеспечения инновационных технологий переработки зерна, включая глубокую переработку; решения вопросов, связанных с хранением зерна и зернопродуктов, оценкой их качества и безопасности.

2. Материалы и методы

Настоящий аналитический обзор построен на основе результатов исследований, опубликованных в отечественных и зарубежных научных журналах, в сборниках национальных и международных конференций за период с 2019 по июнь 2024 года. Из рассмотренных 315 научных публикаций для обзора была отобрана 61 публикация, отражающая все наиболее актуальные направления в области исследования зерна и зернопродуктов, проводимых во ВНИИЗ за последние пять лет.

С целью систематизации обширного материала были выбраны следующие основные направления:

- инновационные технологии переработки композитных зерносмесей для создания сбалансированных мучных и крупяных продуктов здорового питания;
- качество и безопасность зерна;
- сроки и нормы безопасного хранения зернопродуктов;
- вторичные (побочные) продукты переработки зерна — ценное сырье для глубокой переработки.

Приоритетным критерием при отборе публикаций наряду с актуальностью, научной и практической значимостью служила индексация в российских и международных наукометрических базах данных: *РИНЦ, ВАК, RSCI, Agris, Google Scholar, Scopus, Web of Science.*

[1] Государственная политика Российской Федерации в области здорового питания: Доклад. — М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2015. — 89 с.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Инновационные технологии переработки композитных зерносмесей для создания сбалансированных мучных и крупяных продуктов здорового питания

Современные тенденции развития мукомольной и крупяной отрасли в России, как и во всем мире направлены на получение продуктов сложного, поликомпонентного состава, благодаря которому удается в одном продукте аккумулировать биопотенциал нескольких исходных компонентов, сбалансировать состав по макро- и микронутриентам, а также увеличить долю эссенциальных компонентов: незаменимых аминокислот, ПНЖК, макро- и микроэлементов, витаминов, минорных биологически активных соединений, что, в конечном счете, отвечает современным требованиям нутрициологии [8–10].

Учеными ВНИИЗ научно обоснованы инновационные технологии совместной переработки двух- и трехкомпонентной зерновой смеси на основе зерна пшеницы, семян чечевицы и льна. При этом было учтено влияние обогащающих компонентов (семян чечевицы и белого масличного льна) на процесс совместного размола, технологические, физико-химические, биохимические, реологические и органолептические свойства композитной муки, теста и хлеба.

При изучении возможности получения композитной пшенично-льняной муки, в которой сохранен весь биопотенциал семян льна, выявлено, что подготовка компонентов зерновой смеси должна осуществляться независимо, параллельными потоками [8]. При подготовке зерна пшеницы осуществляли холодное кондиционирование, режимы которого составили: влажность — 15,5%, продолжительность отволаживания — 24 часа. Основой структурной схемы размола бинарной смеси служила схема сокращенного сортового помола пшеницы. Моделирование процесса размола проводили на установках РСА. В драном процессе использовали рифленые вальцы (Р-10/см), для размольных и шлифовочной системы использовали вальцы с микрошероховатой поверхностью [9].

Определены оптимальные режимы извлечения пшенично-льняной смеси. Разработаны технологические схемы и сформированы новые сорта пшенично-льняной муки. Выявлены особенности распределения белков, жиров, углеводов и основных ферментных систем в сформированных сортах пшенично-льняной муки, полученной из бинарной смеси, состоящей из 93% зерна пшеницы и 7% семян льна. Показано, что общее содержание жира в муке из двухкомпонентных смесей возрастает примерно в 4 раза, а общее содержание белка в исследуемых образцах увеличивается на 1–2%. Содержание линолевой кислоты (ω-6) в образцах пшенично-льняной муки в 1,6…3,3 раза больше, чем в пшеничной муке; содержание линоленовой кислоты (ω-3) в образцах пшенично-льняной муки в 36,8…57,2 раза больше, чем в пшеничной муке (с учетом общего содержания жира в образцах) [10]. Проведено комплексное исследование белково-протеиназного, углеводно-амилазного и липидного комплекса сформированных сортов муки [11].

Дана оценка возможного срока безопасного хранения на основании динамики изменения показателя кислотного числа жира (КЧЖ), который составил 9,4 месяца (прогноз). Хлеб, выпеченный из пшенично-льняной муки, имел достаточно хороший объёмный выход от 422 до 449 см^3/100 г муки. Все образцы хлеба отличались высокой оценкой внешнего вида и суммарной органолептической оценкой выше средней, что свидетельствует о возможности её использования для получения специализированных видов хлеба и производства мучных кондитерских изделий [12].

Исследователями ВНИИЗ были предложены и альтернативные (другие) способы получения пшенично-льняной муки, в которых зерно пшеницы заменяли на крупу пшеничную шлифованную, типа «Полтавская» № 1 и крупу манную марки М, что позволило существенно упростить процесс размола, отказаться от многосортного помола, добиться равномерного распределения жира по сортам муки [13,14].

Во ВНИИ зерна и продуктов его переработки разработана технология совместной переработки трехкомпонентной зерновой смеси, состоящей из 85% зерна пшеницы, 10% семена чечевицы и 5% семян льна, позволяющей обогатить пшеничную муку не только ПНЖК, но и хорошо усваиваемыми растительными белками [15,16]. Схема размола включала три драные системы и 6 размольных, что соответствовало сокращенной схеме сортового пшеничного помола. Режим измельчения обеспечил получение суммарного количества круподунстовых продуктов драных систем не менее 60%. Показано, что наличие в составе помольной смеси 5% семян льна и 10% чечевицы не снижает выход готовой продукции, более того, установлено, что

выход муки увеличивается на 3–5%. Введение в состав помольной смеси семян льна и чечевицы позволило увеличить содержание белка в муке примерно на 50% (с 12% до 18%), содержание жира в 2 раза (с 1,6% до 3,6%), при этом, как показали исследования, целесообразным видом переработки трехкомпонентной зерносмеси является односортный помол, так как формирование нескольких сортов муки приводит к неравномерному распределению белка и жира [15,16].

Таким образом, получаемая различными способами композитная мука, является продуктом повышенной пищевой ценности и может быть востребована для производства хлебобулочных и мучных кондитерских изделий как общего назначения, так и для создания функциональных и специализированных продуктов для различных групп населения.

Для кондитерской отрасли, в частности производства мучных кондитерских изделий, интерес представляют исследования, посвященные получению пшенично-ореховой муки с высоким содержанием жира и белка [17]. В качестве исходного сырья были использованы смеси, состоящие из продуктов мукомольного производства в виде манной крупы марки М, ТМ, Т, муки макаронной высшего сорта (крупки), 1-го сорта (полукрупки), продуктов крупяного производства в виде крупы цельной или дробленой (типа Полтавская, Артек), и ядра орехов, измельченных на ножевом измельчителе (молотковой дробилке) с размером частиц 1–2 мм для смеси с продуктами мукомольного производства или 3–4 мм — для смеси с продуктами крупяного производства. Химический состав композитной муки с внесением 5% измельченных орехов — пшенично-миндальная/пшенично-кедровая/пшенично-грецко-ореховая: белки отличались лишь по содержанию жира (%) — 12,8/12,5/12,6; жиры — 3,64/4,37/4,00; углеводы — 67,7/67,7/67,6; пищевые волокна — 3,4/3,6/3,5 [17]. На основании проведенных исследований учеными ВНИИЗ и РОСБИОТЕХА разработаны технологические решения применения пшенично-кедровой муки при производстве хлебобулочных изделий. Пробные лабораторные выпечки с использованием безопарного способа приготовления теста показали, что наилучшими обобщенными характеристиками по органолептическим и физико-химическим показателям качества обладали хлебобулочные изделия, приготовленные из пшенично-кедровой муки с содержанием кедрового ореха в количестве 7,5% [17].

Интересные данные были получены при исследовании возможности обогащения пшеничной хлебопекарной муки 1-го сорта [18] и получения 2-х видов двухкомпонентной муки: пшенично-льняной и пшенично-миндальной. Проведенная комплексная оценка по физико-химическим, биохимическим показателям, реологическим свойствам теста, пробной лабораторной выпечке и органолептической оценке хлеба показала следующие результаты: пшенично-льняная и пшенично-миндальная мука характеризовались повышенным содержанием жира и белка. Водопоглотительная способность пшенично-миндальной муки уменьшилась на 2,4%, а пшенично-льняной — осталась на том же уровне, что и в образце пшеничной муки. Анализ выпеченного хлеба (методом пробной лабораторной выпечки) показал высокие результаты по показателям объемного выхода и пористости хлеба. Суммарная органолептическая оценка была высокой и составила 9,5–10,0 баллов [18].

Для обогащения пшеничной муки высшего сорта учеными ВНИИЗ предложено использовать белково-жировой концентрат (чечевично-льняная мука) с содержанием белка 27,5%, жира 11,9%. Разработанная технологическая схема совместного размола семян чечевицы (67%) и льна (33%) включала I–III драные системы, шлифовочную систему, вымольную систему, 1-ую-3-ю размольные системы. При исследовании физико-химических, биохимических показателей установлено, что по механическим характеристикам белково-жировой концентрат был близок к соответствующим показателям пшеничной муки. Значительная доля альбумино-глобулиновой фракции растворимых белков (88%), а также высокое содержание наиболее дефицитной эссенциальной α-линоленовой кислоты (6,11% против 0,05% в пшеничной муке с учетом общего содержания жира) свидетельствуют о высокой пищевой и биологической ценности полученного продукта. Оценка влияния белково-жирового концентрата на показатели готовых изделий (крекеры, вафли) показала, что его внесение в количестве 15% от общего объема муки не только не ухудшает, а по некоторым критериям (цвет, форма, текстура, вкус) даже улучшает органолептические показатели. Высокая суммарная органолептическая оценка (32 балла) свидетельствует о стандартном качестве полученного продукта [19].

Расчеты методом баланса аминокислотных скоров с использованием оригинальной программы в среде «Wolfram Mathematica — 10», позволили оценить интервал варьирования добавки муки из широкого спектра бобовых культур, в пределах которого происходит дополнение белка смеси до полноценного. Объектами исследования служили мука из пшеницы, ржи и тритикале, чечевицы, соевого шрота, маша, гороха, белой фасоли, нута, а также мука из конопляного жмыха (обрушенного) и льняного шрота [20,21].

Разработке многокомпонентных (комбинированных) круп посвящен цикл работ, проводимых во ВНИИЗ [22,23], в том числе, совместно с коллегами из «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН [24], Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского [25], Федерального научного центра зернобобовых и крупяных культур [26]. Научно обоснованы и смоделированы следующие виды комбинированных круп:

- двухкомпонентные (всего 23 варианта): 1-й компонент — крупы ячневая, кукурузная, рисовая; 2-й компонент — бобовые: нут, чечевица, фасоль, горох;
- трехкомпонентные (всего 27 вариантов): 1-й компонент — крупы ячневая, кукурузная, рисовая; 2-й компонент — бобовые: нут, чечевица, фасоль, горох; 3-й — компонент: саго, конопля, кунжут.

Авторы отмечают, что требованиям формальных критериев оценки по сбалансированности состава (аминокислотный скор и соотношение белки/углеводы) отвечают двухкомпонентная ячневая крупа с добавлением бобовых культур — нута, чечевицы, фасоли, гороха и все варианты трехкомпонентных круп [20,24,26]. Для отбора перспективных многокомпонентных круп необходимы дополнительные показатели их потребительских свойств, в первую очередь, органолептические. Органолептическая оценка (внешний вид, консистенция, запах, вкус) каш из композитных двухкомпонентных круп показала, что присутствие в смеси чечевицы (30%) придает приятный сладковатый вкус при отсутствии бобового привкуса; а присутствие нута и гороха наоборот — выраженный бобовый привкус за исключением кукурузно-нутовой, ячменно-нутовой и кукурузно-гороховой. Дегустация каши из трехкомпонентной кукурузно-нутово-конопляной крупы (с добавлением конопли 5%) также дала хорошие результаты: отсутствие бобового привкуса, нежный, сладкий вкус [22,26].

Еще один актуальный аспект, связанный с созданием сбалансированных продуктов лечебно-профилактического и специального назначения, это снижение относительно высокого гликемического индекса, характерного для традиционных круп (ГИ >40 ед.), что ограничивает их использования в питании людей, страдающих диабетом 2-го типа. Было установлено, что добавка крупы из бобовых культур существенно снижает ГИ. Кроме этого, ситуацию можно еще улучшить, добавляя в смесь крупу из топинамбура. При этом, получаемая комбинированная крупа содержит полноценный белок и сохраняется соотношение белки / углеводы, отвечающее требованиям рационального питания [23].

Сегодня совершенно очевидно, что мировой тренд развития пищевой индустрии нацелен на направленную трансформацию сырья и создание многокомпонентных продуктов питания, химический состав которых отвечает современным требованиям нутрициологии. Это относится и к продуктам на зерновой основе: композитным крупяным и мучным смесям, специализированным видам хлеба и мучным кондитерским изделиям, обогащенным эссенциальными компонентами. К этому ряду продуктов следует отнести и различные виды муки и круп, получаемые по разработанным во ВНИИЗ технологиям.

Произведенная таким образом продукция может быть востребована предприятиями малого и среднего бизнеса, и, в конечном счете, поможет преодолеть проблему несбалансированного рациона питания различных групп населения.

3.2. Качество и безопасность зерна. Разработка сроков и норм безопасного хранения зернопродуктов

Исследования в области оценки качества и безопасности зерна и продуктов его переработки были и остаются приоритетными в научной деятельности ВНИИЗ и охватывают широкий спектр фундаментальных и практических вопросов. Анализ публикаций за последние 5 лет показывает, что к ним относятся: стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации (переработка и использование зерна) [27,28]; современная оценка хлебопекарных свойств российской пшеницы [29], в том числе и требования к качеству сильной и ценной пшеницы в России [30]; разработка требований к качеству пшеничной муки целевого назначения [31]; изучение технологических, реологических, физико-химических, биохимических свойств зерна и зернопродуктов [32–34]; разработка и усовершенствование инструментальных методов анализа качества муки [35–37]; микробиологические аспекты безопасности зерна и муки [38,39].

Как отмечают ученые ВНИИЗ в своем аналитическом исследовании [28], развитие зернового комплекса России, всестороннее использование его потенциала возможно при условии системного решения вопросов, начиная от производства зерна и заканчивая экспортом зерна и продуктов его переработки, за счет создания в основных зернопроизводящих регионах страны агропромышленных кластеров [29,30].

Всесторонняя оценка качества зерна и разработка требований к зернопродуктам целевого назначения, их неукоснительное соблюдение на практике позволяет обеспечить необходимые свойства в готовых мучных изделиях как на крупных промышленных предприятиях, так и на предприятиях малого бизнеса и пекарнях. Учеными ВНИИЗ на основе всесторонних, комплексных исследований были разработаны требования к целевому использованию пшеничной муки для производства различных мучных кондитерских изделий, например, вафель [31], крекеров [32], а также мучных кулинарных замороженных изделий вида пельменей [33].

Так, при разработке специализированных требований к качеству пшеничной муки для кондитерской промышленности было установлено, что муку с количеством клейковины 20–23% использовать для изготовления вафель нельзя. При количестве клейковины 25–27% и 23–25% качество клейковины должно быть не ниже 50 ед. ИДК (I хорошая и II удовлетворительно слабая), число падения 200–300 с, упруго-эластичные свойства муки, а именно отношение упругости теста к его растяжимости, которое характеризует такой показатель альвеографа как форма кривой P/L — не более 1,8 и не более 2,0 соответственно; энергия деформации теста — не более 190×10^{-4} Дж; степень разжижения — не более 100 ЕВ (единицы валориграфа) средний диаметр вафель — 97–99 мм и 97–107 мм; жёсткость вафельного листа — не более 0,200 Н, кгс [31].

С помощью корреляционного и регрессионного анализа удалось выявить взаимосвязь таких показателей муки как количество и качество клейковины, число падения, крупность, зольность и ряда реологических показателей теста с показателями качества крекера, выпеченного методом пробной лабораторной выпечки, разработанного во ВНИИЗ и установить нормы для этих показателей [31,32].

Авторы подчеркивают необходимость создания системы классификаций зерна и муки разного целевого назначения, которая учитывала бы все значимые показатели качества. Это, в свою очередь, позволит производителям мучных кондитерских и кулинарных изделий избежать таких проблем, как деформация теста при раскатке и формовке изделий, а потребителю — получить качественную и безопасную продукцию [29].

Еще одним важным аспектом работы ВНИИЗ, отраженным в научных публикациях, является разработка и усовершенствование методов анализа качества зерна и зернопродуктов. К ним следует отнести: изучение возможности использования инструментальных методов анализа качества муки целевого назначения [34], использование системы Миксолаб (Chopin, Франция) для сравнительной оценки хлебопекарных свойств российской пшеницы [40], установления взаимосвязи между количеством поврежденного крахмала и технологическими свойствами пшеничной муки с использованием анализатора повреждённого крахмала Y41 (YUCEBAS MACHINERY, Турция) [35], разработка экспресс-метода спектроскопии в ближней инфракрасной области для определения влажности, белка и количества клейковины [37]; а также разработку метода пробной лабораторной выпечки крекера для оценки качества пшеничной муки.

Учеными ВНИИЗ изучена возможность определения хлебопекарных свойств пшеницы по реологическим свойствам теста приборным методом с использованием системы Миксолаб (Chopin, Франция) на этапе поступления зерна на мукомольное предприятие. Цель исследования — изучить возможность применения прибора Миксолаб для оценки хлебопекарных свойств зерна и муки из российской пшеницы и выявить взаимосвязь между зарубежной и отечественной системами оценки качества пшеницы. Приведены результаты исследований качества российской мягкой пшеницы (67 образцов), выращенной в разных почвенно-климатических условиях и обладающих широким диапазоном показателей качества: количество клейковины варьировало от 5,7 (Южный федеральный округ) до 33,2% (Приволжский федеральный округ), качество клейковины — от 9 (Центральный ФО) до 128 ед. ИДК (ЮФО), число падения — от 66 до 449 с. (Приволжский ФО). По показателям профайлера (радиальная диаграмма), полученного в классическом режиме «Chopin Wheat+» установлено, что исследуемые образцы зерна характеризовались в среднем повышенной водопоглотительной способностью, максимальной вязкостью и ретроградацией крахмала, пониженной амилолитической активностью и устойчивостью теста. Расчет парной корреляции между показателями профайлера и качества зерна пшеницы выявил умеренную связь водопоглощения с количеством клейковины (0,466) и числом падения (0,384), а также тесную связь вязкости, амилолитической активности и ретроградации крахмала с числом падения (0,659; 0,821 и 0,866 соответственно). Индекс «глютен+» не показал устойчивой связи ни с одним из показателей качества зерна, но имелась слабая связь с числом падения. Регрессионным анализом выявлена наиболее тесная криволинейная связь между крутящим моментом и числом падения на участках клейстеризации и ретроградации крахмала [40].

Использование анализатора повреждённого крахмала Y41 (YUCEBAS MACHINERY, Турция) позволило исследователями ВНИИЗ выявить существенное влияние количества поврежденного крахмала в муке на физико-химические показатели качества муки и реологические свойства теста по показаниям фариниграфа Y38 (YUCEBAS MACHINERY, Турция) [35,36]. Известно, что качество хлеба и хлебобулочных изделий напрямую зависит как от состояния белково-протеиназного, так и углеводно-амилазного комплексов муки, из которой они выпекаются. В характеристике последнего важное значение имеет количество поврежденного крахмала, образующегося в процессе переработки зерна в муку. В то же время, несмотря на свое важное значение, этот показатель редко контролируется на мукомольных предприятиях, тогда как систематическое определение количества поврежденного крахмала в условиях производства позволяет осуществлять контроль за ходом мукомольного процесса: проверять параллельность и износ мельничных валков при размоле, оптимизировать давление, что в свою очередь оказывает влияние на выход готовой продукции, ее цвет, реологические свойства теста и сроки хранения.

Приведенные в работе результаты исследования показали прямую корреляционную зависимость между количеством поврежденного крахмала в муке и показателями белизны (коэффициент корреляции составил 0,85) и качеством клейковины (коэффициент корреляции составил 0,42). Отрицательная корреляция наблюдалась у показателя количества клейковины (–0,89) и числа падения (–0,93).

При анализе реологических свойств теста было отмечено, что количество поврежденного крахмала коррелировало со всеми показателями: водопоглощением (0,99), временем замеса теста (–0,89), устойчивостью теста (–0,88), разжижением (0,99), валориметрической оценкой (0,96). Наилучшей суммарной оценкой хлеба обладали пробы с количеством поврежденного крахмала в диапазоне от 19 до 23 UCD. Дальнейшее увеличение количества поврежденного крахмала приводило к снижению суммарной оценки выпечки хлеба, отмечалась неравномерная окраска корки хлеба.

Значительный практический интерес представляет разработка экспресс-метода спектроскопии в ближней инфракрасной области для определения влажности, белка и количества клейковины с использованием отечественных ИК-анализаторов, выполненная совместно с исследователями Уральского НИИ метрологии им. Д. И. Менделеева (Екатеринбург) и ООО «ЭКАН» (Санкт-Петербург) [37]. Межлабораторные испытания позволили оценить процедуру контроля точности измерений в соответствии как с применением стандартных образцов утверждённого типа, так и стандартизованных методик (методики сравнения), получены значения пределов повторяемости, воспроизводимости и точности. Авторы отмечают, что создание и внедрение в практику производства и переработки зерна стандартизированного экспресс-метода определения влажности, белка, количества клейковины методом спектроскопии в ближней инфракрасной области с применением ИК-анализаторов позволит обеспечить элеваторы, хлебоприёмные предприятия и испытательные лаборатории быстрым и надежным методом оценки качества зерна, обеспечивающим систематический контроль на всех этапах его хранения и переработки [37].

Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года[2] предусматривает разработку методов обоснования сроков годности пищевой продукции и совершенствование системы мониторинга качества и безопасности пищевой продукции. Снижение потерь продовольственного зерна пшеницы при хранении в масштабах страны потенциально даёт результаты, схожие с повышением валового сбора. В Российской Федерации для продовольственного зерна пшеницы, являющегося одним из основных продуктов питания и экспорта, в настоящее время не существует методологии определения научно-обоснованных сроков

[2] Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением правительства РФ от 29 июня 2016 г. № 1264-р. — 16 с.

безопасного хранения, что не гарантирует сохранения качества, не обеспечивает безопасность при длительном хранении и приводит к потерям зерна. Не установлены нормативы содержания мочевой кислоты, обеспечивающие безопасность зерна при хранении.

Учёными ВНИИЗ были изучены изменения биохимических и физико-химических показателей продовольственного зерна пшеницы в процессе длительного лабораторного хранения: кислотность, кислотное число жира, число падения, качество клейковины, микробиологические показатели и установлено, что при хранении продовольственного зерна пшеницы наиболее закономерно изменялось значение показателя кислотного числа жира (КЧЖ) [41,42].

Кроме того, были проведены исследования по оценке органолептических показателей продовольственного зерна пшеницы при установлении норм свежести и годности по органолептическим показателям муки, выработанной из исследуемых образцов зерна. В отличии от проведения органолептической оценки при установлении сроков годности метод определение КЧЖ является наиболее простым в определении, достаточно экономичным, информативным, не длительным по времени и не требующим большого числа высококвалифицированных дегустаторов. Однако, для определения достоверности любого аналитического метода как способа оценки продукта важную роль играет степень корреляции результатов измерений с органолептическим качеством пищевого продукта.

С этой целью учёными ВНИИЗ был проведён ряд исследований. Для установления взаимосвязи КЧЖ продовольственного зерна пшеницы и КЧЖ выработанной из него муки были отобраны 35 проб зерна пшеницы со значениями КЧЖ от 9,1 до 53,4 мг КОН на 1 г жира. Из каждой отобранной пробы по стандартной методике лабораторного помола вырабатывалась мука высшего сорта.

Была установлена прямолинейная зависимость изменения КЧЖ муки, выработанной из исходных проб зерна, от КЧЖ зерна с высоким коэффициентом детерминации, что свидетельствует о сильной корреляционной зависимости. Полученные результаты с высокой достоверностью (R=0,9709) позволили считать норму свежести продовольственного зерна пшеницы по значению КЧЖ, равному 29 мг КОН на 1 г жира, норму годности — 50 мг КОН на 1 г жира [43].

Известно, что свежевыработанная пшеничная мука сразу после помола в хлебопечении не используется. Она должна пройти процесс созревания. В зависимости от ряда факторов сроки созревания пшеничной муки варьируются от 2 до 7 недель. Во время созревания в пшеничной муке проходят важные биохимические процессы, в результате которых хлебопекарные свойства муки существенно улучшаются. Необходимо отметить, что слишком длительное хранение ее после помола, даже в условиях, исключающих ее порчу, может привести не к улучшению, а к ухудшению ее хлебопекарных свойств [44,45].

Органолептическую оценку и установление взаимосвязи КЧЖ зерна и выработанной из него муки проводили после, так называемого, процесса «отлёжки». В ходе данной работы сотрудниками ВНИИЗ были исследованы изменения показателей качества пшеничной муки в процессе её созревания и установлены сроки созревания по показателю КЧЖ [46,47].

В настоящее время нет научно-обоснованных сроков хранения зернопродуктов при различных температурных условиях, не установлена зависимость сроков годности продукта от исходного значения КЧЖ в сырье, что не гарантирует в достаточной мере сохранение качества и не обеспечивает безопасность при реализации.

Действующие сроки хранения не учитывают исходную величину КЧЖ зернопродукта, при этом на хранение может быть заложен зернопродукт с разным исходным качеством; условия хранения могут изменяться в зависимости от типа хранилища, зоны хранения, а также от фасовки и упаковки продукта, поэтому говоря о сроках безопасного хранения необходимо учитывать совокупность всех воздействий и условий, возникающих в процессе хранения зернопродуктов.

Выявлен высокий уровень линейной связи между показателем КЧЖ и органолептическими свойствами крупы манной и каши, сваренной из этой крупы, что позволяет сделать вывод о возможности использовать показатель КЧЖ для характеристики органолептических свойств крупы манной и каши, а также для установления норм свежести и годности для манной крупы марки «М». Разработана методика оценки органолептических показателей крупы манной марки М и сваренной из неё каши. По результатам проведённых дегустаций и статистического анализа, впервые установлена предварительная норма свежести для крупы манной марки «М» по величине кислотного числа жира, она составила 90–95 мг КОН на 1 г жира. Норма годности для крупы манной марки «М» по величине кислотного числа жира составила 105–110 мг КОН на 1 г жира [48–50].

Кроме установления критериев хранимоспособности зернопродуктов важно разработать инструментальные средства оперативного мониторинга состояния зерновой массы в хранилищах, что потенциально предоставляет возможность своевременного применения технологических корректирующих воздействий. Показано, что поражение зерна вредными насекомыми и клещами не только снижает его массу и ухудшает качество, но и делает зерно ядовитым. Поэтому рядом нормативных документов установлен показатель безопасности, связанный с загрязненностью зерна продуктами жизнедеятельности вредителей хлебных запасов (мочевой кислотой), и определены его максимально допустимые уровни (МДУ) по количеству насекомых и клещей в зерне [51]. Но в действующих нормативных документах этот показатель трактуется неоднозначно.

Определение загрязненности зерна вредителями хлебных запасов по их количеству в межзерновом пространстве в ряде случаев (например, после сепарирования зерна) дает ложную картину его фактической безопасности для питания людей, является лазейкой для вывода на рынок фальсифицированной зерновой продукции и приводит к периодическому подтравливанию населения при питании продуктами, выработанными из ядовитого зерна.

В связи с чем, учёными ВНИИЗ на основе проведённых исследований разработана методика определения мочевой кислоты в зерне и зернопродуктах с помощью ВЭЖХ [52,53]. С помощью анализа мочевой кислоты в зерне и зернопродуктах, установлена зависимость содержания мочевой кислоты в зерне от плотности заселения его разными видами вредителей хлебных запасов. Показано, что увеличение числа жуков в зерне влечет за собой повышение содержания в нем мочевой кислоты. Зависимость эта описывается уравнением прямой линии. Совпадение фактических и теоретических данных доказано расчетом коэффициента Пирсона. При этом коэффициент корреляции (R=0,9967) вплотную приближается к максимальной его величине — единице [54–56].

Проведены исследования распределения мочевой кислоты в различных анатомических частях зерна, семян и выработанных из них продуктах с целью определения возможности и разработки технологий получения продуктов питания с минимальным содержанием мочевой кислоты. Установлено, что из 460 мг мочевой кислоты (как суммы ее количества во всех фракциях помола) 252 мг или 55% пришлось на продукт от 1-й драной системы, который по массе составляет всего 6,75% от суммы масс всех продуктов.

На основе полученных результатов показана возможность нивелирования отрицательного воздействия насекомых на зерно путем значительного, более чем наполовину, снижения содержания мочевой кислоты в продуктах помола за счет удаления небольшого количества (около 7%) выхода муки первого сорта с 1-й драной системы [57].

Таким образом, разработка сроков и норм безопасного хранения муки пшеничной, ржаной, крупы манной, рисовой, овсяной, гречневой, пшенной по показателю КЧЖ, включенного в межгосударственные стандарты, а также научно-обоснованный подход к мероприятиям по защите хлебных запасов от вредителей позволяют своевременно обнаруживать некачественную продукцию, выявлять фальсификацию и недобросовестных производителей, тем самым устранить риски и снизить негативные последствия для здоровья потребителей.

С позиции микробиологической безопасности зерна интересными представляются экспериментальные данные по изучению воздействия гамма-лучей и ускоренных электронов на поверхностную микробиоту зерна пшеницы. Использование ионизирующих излучений, по заключению авторов, является эффективным и безопасным способом стерилизации, который обеспечивает снижение на 60–80% количество бактерий уже при поглощенной дозе облучения 190 Гр, а при дозе 372–726 Гр начинается подавление развития грибов хранения *Aspergillus* sp. и *Penicillium* sp. На грибы *Fusarium* sp. и *Alternaria* sp. γ-излучение воздействует не так эффективно: максимальное воздействие — 90%-ое снижение роста и развития грибов (максимальное воздействие) было отмечено при дозе облучения 1000 Гр [38,39].

Фузариоз зерна — еще одна острая проблема — заболевание, которое широко распространено во всем мире и связанное с поражением посевов грибами рода *Fusarium*, что приводит к накоплению в зерне опасных для здоровья человека микотоксинов. Исследователи ВНИИЗ провели сравнительную оценку различных методов обнаружения фузариозных зерен и выявления загрязнения дезоксиниваленолом в анализируемых образцах. Результаты исследований свидетельствуют о хорошей корреляционной зависимости между микробиологическими, микотоксикологическими показателями и визуальным определением пораженных фузариозом зерен. При этом авторы отмечают, что иммуноферментный анализ (ИФА) является более

объективным, так как основан на высокоспецифичной реакции «антиген-антитело»; он характеризуется высокой чувствительностью и быстротой получения результатов [39].

Анализ публикаций свидетельствует о широком спектре задач, касающихся качества зерна и его безопасности. Они направленны на выявление проблемных вопросов, обеспечения контроля качественных показателей зерна на разных стадиях: производство, хранение, переработка, с целью получения безопасной мучной и крупяной продукции надлежащего качества.

3.3. Вторичные (побочные) продукты переработки зерна — ценное сырье для глубокой переработки

Зерновые отруби, продукты шелушения, обрушения, шлифования – побочные (вторичные) продукты, получаемые в процессе переработки зерна на мукомольных и крупяных предприятиях. Это дополнительный ценный ресурс для получения пищевых и кормовых ингредиентов — обогащающих компонентов сбалансированных рецептур широкого спектра пищевых продуктов и кормов [58–60]. Их принято относить к возобновляемым и доступным сырьевым ресурсам [61].

Количество вторичных сырьевых ресурсов, образующихся при переработке зерна на мукомольных заводах, составляет в среднем 21,3% к объёму производства муки. При переработке зерна в крупу количество вторичных сырьевых ресурсов варьирует в достаточно широком диапазоне, например, при переработке пшеницы в крупу оно достигает 37%, из них 30% приходится на мучку, а при переработке проса в пшено образуется в качестве побочного продукта 7,5% мучки [62].

В настоящее время использование в пищевых технологиях отрубей (преимущественно однокомпонентных — пшеничных или ржаных) невелико. Например, для обогащения клетчаткой некоторых видов хлебобулочных изделий, мультизерновых видов хлеба, их включают в состав поликомпонентных мучных смесей. Кроме того, как самостоятельный продукт зерновые отруби представлены в чистом виде и с различного рода добавками — сухофрукты, ягоды, орехи и т. п. Наряду с этим активно разрабатываются способы использования различных зерновых отрубей при получении зерновых дистиллятов [63,64].

Богатый химический состав вторичных продуктов, в частности зерновых отрубей: макро- и микронутриенты, растворимые и нерастворимые пищевые волокна, белки, ферменты и другие минорные биологически активные соединения, сосредоточенные в периферийной части зерновки, наряду с высокими объемами производства свидетельствуют о необходимости и целесообразности их использования для дальнейшей глубокой переработки [65,66].

Так, во ВНИИЗ были получены растворимые и нерастворимые пищевые волокна из вторичных продуктов переработки овса, ячменя, тритикале, изучены их водопоглотительная и водоудерживающая способности, реологические свойства коллоидных систем, содержащих пищевые волокна. Показана возможность использования ингредиентов, содержащих пищевые волокна в качестве стабилизаторов пищевых систем [67].

Еще одно направление глубокой переработки, которое активно разрабатывается — получение зерновых гидролизатов и структурно-модифицированных отрубей с использованием ферментных препаратов целлюлолитического, протеолитического, фитолитического действия и композиций на их основе [63,64].

Последнее стало возможным благодаря бурному развитию биотехнологии, в частности производства микробных ферментных препаратов разной специфичности действия. Это, в свою очередь, дало новый импульс в развитии ферментативного катализа как современного инструментария глубокой переработки растительного сырья, в том числе зерновых, бобовых и масличных культур. Хорошо известно, что использование ферментных препаратов (ФП) для решения различных технологических задач в пищевой промышленности в настоящее время является достаточно распространенным приемом [68,69]. Целью применения ФП при производстве продуктов питания являются интенсификация биохимических процессов, лежащих в основе той или иной пищевой технологии, а также увеличение выхода продукта, улучшение его качественных характеристик [65,69].

Использования ферментов в качестве инструментария в глубокой переработке является актуальной научно-практической задачей и активно изучается с использованием различного сырья — животного (мясо, молоко и продукты их переработки), растительного (зерновые, бобовые, масличные культуры и продукты их переработки), биомассы дрожжей и др. Преимуществом ферментативного способа модификации белков являются мягкие режимы проведения реакций, возможность регулирования степени гидролиза, определенная направленность и сохранение биологической ценности [66,70].

В результате модификации белковых компонентов зерна и продуктов его переработки с применением ферментных препаратов протеолитического действия могут быть получены продукты гидролиза с определенным профилем пептидов и набором аминокислот, обладающие специфическими свойствами [71,72].

Анализ публикаций по результатам исследований ВНИИЗ, направленных на разработку способов ферментативной модификации различных видов отрубей отражают классический подход к работе с ферментами, ферментными препаратами и их композициями, алгоритм работы заключается в следующем:

- изучение химического состава и биохимических особенностей природных субстратов — одно-, двух-, трехкомпонентных отрубей.
- скрининг ферментных препаратов: изучение основных кинетических характеристик ФП при действии на стандартный и природные субстраты (определение начальной скорости ферментативной реакции, оптимумов температуры и pH, оптимальная концентрация фермента, насыщающая концентрация субстрата); эффективность действия ферментных препаратов при оптимальных условиях.
- разработка мультэнзимных композиций (МЭК) с учетом специфичности действия, оптимумов pH и температуры, эффективности (способности активно гидролизовать соответствующие субстраты — белки, некрахмальные полисахариды, фитин).
- учет автолитических процессов под действием собственных (эндогенных) ферментных систем и возможности синергетического эффекта при действии ФП разной специфичности (в данном случае ФП целлюлолитического и протеолитического действия).

Образцы композитных отрубей были получены в результате совместного размола зерна пшеницы, семян чечевицы и масличного льна. Изучение биохимических особенностей белково-протеиназного, углеводно-амилазного и липидного комплекса трех видов композитных отрубей: пшенично-льняные; пшенично-чечевично-льняные; чечевично-льняные отражены в работах [58,59,61]. Во всех образцах отрубей выявлено высокое содержание белка, жира, клетчатки, а доля альбумино-глобулиновой фракции растворимых белков составила 75, 78 и 86% соответственно. Внесение в помольную смесь семян льна приводит не только к увеличению общего количества жира, но и существенно влияет на жирнокислотный состав, увеличивая содержание ПНЖК. При этом для чечевично-льняных отрубей характерно наиболее благоприятное соотношение линолевой кислоты (ω-6) к наиболее дефицитной α-линоленовой (ω-3) кислоте, которое составило 1: 4,2. Изучение основных гидролитических ферментов (протеаз, амилаз, липаз) показало, что их активность в отрубях выше, чем в муке. Присутствие семян чечевицы увеличивает активность нейтральных и кислых протеиназ в 2 и более раза. Кроме того, в чечевично-льняных отрубях выявлено высокое содержание кислых липаз (преимущественно липазы масличных культур). Уникальный состав композитных отрубей свидетельствует о возможности их использования как обогащающего компонента при создании новых сбалансированных продуктов, в первую очередь, на зерновой основе.

За последние 5 лет учеными ВНИИЗ проведены исследования и разработаны способы ферментативной модификации различных видов отрубей: пшеничных [63], ржаных [63], тритикалевых [67], пшенично-льняных [73,74], пшенично-чечевично-льняных [75], с использованием широкого спектра зарубежных и отечественных ферментных препаратов протеолитического действия: «Нейтраза MG1,5», «Алкалаза FG» (Novozymes, Дания); «Протеаза GC –106» (Döhler, Германия), «Дистицим Протацид Экстра» (Genencor, США); целлюлолитического действия: «Шеарзим 500 L», «Вискоферм L», Целлюкласт 1,5 L, «Сахзайм Йилд», «Вискозима L» (Novozymes, Дания), «Дистицим GL» (Erbslön, Германия), «Целловиридин Г20Х» (Бердский завод биопрепаратов, Россия), «Ксиланаза», «Целлюлаза кл. 14» «Палпфор 2» и комплексного препарата «Пенициллопепсинксиланаза», содержащего наряду с ксиланазной активностью и активную грибную протеиназу (Микробиопром, Россия).

Как отмечают авторы, использование МЭК на их основе позволяет увеличить количество растворимого белка на 37,5% (МЭК-1); в 2 раза (МЭК-2); на 26% (МЭК-3); на 43% (МЭК-4); на 26% (МЭК-5); на 22% (МЭК-6) и на 14% (МЭК-7) по сравнению с использованием отдельных ферментных препаратов. Это объясняется комплексным последовательным воздействием целлюлолитических и протеолитических ферментных препаратов и, очевидно связано с тем, что деградация гемицеллюлоз увеличивает доступность белков для действия протеолитических ферментов [73].

Установлено, что использование МЭК в состав которых входят исследуемые препараты отечественного производства способны активно воздействовать на природный субстрат — пшенично-льняные отруби при более высокой дозе — 1,0 ед. КсА/г отрубей против 0,3–0,4 КсА/г отрубей для импортных ферментных препаратов, а полученные данные по функционально-технологическим свойствам биомодифицированных отрубей свидетельствуют об их зависимости от состава МЭК, что дает возможность прогнозировать и регулировать их свойства для целенаправленного использования в различных пищевых технологиях [73].

Еще одним направлением изучения и использования гидролизатов, полученных при ферментативной модификации зерновых отрубей, являются технологии брожения, для обеспечения сбалансированного азотистого и фосфорного питания дрожжей рода *Saccharomyces*. Ферментативный гидролиз белков и фитина позволяет обеспечить их переход в растворимые формы (фосфат ионы, свободные аминокислоты, низкомолекулярные пептиды), что, в конечном счете, положительно сказывается на их усвоении дрожжами. Для этого наряду ферментными препаратами «Агроксил Премиум», «Пенициллопепсин (Агрофермент, Россия), Нейтраза 0,8L (Novozymes, Дания), был использован отечественный препарат фитазы «Агрофит» (Агрофермент, Россия), расщепляющей фитин (инозитолгексафосфорная кислота), который содержится в периферийной части зерновки и переходит в отруби при переработке зерна на мукомольных предприятиях.

Совместные с ВНИИ пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности исследования, проведенные на однокомпонентных (пшеничных, ржаных) [63] и поликомпонентных отрубях (пшенично-льняных, пшенично-чечевично-льняных) [63,64] с использованием двух вариантов МЭК: МЭК-1 («Агроксил Премиум» + «Агрофит» + «Пенициллопепсин + Оризин»; МЭК-2 («Агроксил Премиум» + «Агрофит» + «Нейтраза 0,8L»), показали, что количество редуцирующих веществ с использованием МЭК возросло в 2,3–3,5 раза; растворимого белка в 3–6,4 раза; фосфат ионов в 3 раза по отношению к соответствующему контролю. Методом гель-хроматографии установлено значительное (в 3…4 раза) повышение доли низкомолекулярных пептидов и аминокислот (М. м. <1000 Да). Концентрация наиболее ценных аминокислот, с точки зрения азотного питания дрожжей (по данным ВЭЖХ): аспарагиновой кислоты, аргинина в опытных гидролизатах одно- и трехкомпонентных отрубей повышалась, в среднем в 2,5–3,0 раза; валина в опытных образцах гидролизатов по сравнению с исходным возрастало в 4–5 раз; гистидина и изолейцина в 2,0–2,5 раза [63,64]. Это позволило авторам позиционировать полученные таким образом зерновые гидролизаты, как альтернативу импортным активаторам брожения на основе автолизатов осадочных дрожжей [64].

Ученые Сибирского филиала ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН совместно с Сибирским федеральным научным центром агробиотехнологий разработали физические и биохимические методы повышения биологической ценности ржаных и пшеничных отрубей с целью получения кормов и пищевых продуктов лечебно-профилактического назначения. Созданы углеводные и углеводно-белковые ингредиенты на основе продуктов переработки зерна, получена белково-витаминная мука сухим способом [76,77], изучены возможности получения продукта специализированного назначения с использованием биотехнологических методов переработки ржаных и пшеничных отрубей [78].

Изучение влияния скармливания экспериментальных добавок на сохранность поголовья цыплят (японские перепела), интенсивность их роста, мясную продуктивность, химический и аминокислотный состав мяса (фарша), гематологические показатели выявило положительную динамику. Введение в комбикорм перепелов белково-витаминной муки из пшеничных отрубей в чистом виде и с ферментным препаратом фитазы — Фидбест P5000 GT (Сиббиофарм, Россия) повысило сохранность птицы на 3,01%, среднесуточный прирост живой массы на 3,09 и 3,44%, увеличение концентрации кальция и фосфора в мясе перепелов при практически равных затратах кормов на единицу продукции [76].

Таким образом, использование микробных ферментных препаратов было и остается важным биотехнологическим приемом совершенствования пищевых технологий, а также современным инструментарием глубокой переработки вторичного сырья, в частности зерновых отрубей с целью получения продуктов заданного состава и функционально-технологических свойств, что позволяет предположить возможные области их применения в кормопроизводстве и различных отраслях пищевой индустрии с целью повышения пищевой и биологической ценности готовых изделий, придания им определенных свойств, в том числе и функциональных.

4. Выводы

Анализ публикаций ВНИИЗ, в том числе и при участии ученых смежных областей знаний, свидетельствует о том, что накоплен большой экспериментальный материал, получены новые знания о процессах, происходящих в зерне на разных физиологических стадиях (созревании, покое, прорастании), а также при переработке и хранении с учетом многочисленных факторов, влияющих на качество и безопасность зерна и продуктов его переработки.

Большое количество публикаций посвящено разработке инновационных технологий переработки зерна и композитных зерносмесей на основе зерновых, бобовых, масличных культур, разных видов орехов, включая глубокую переработку вторичных (побочных) продуктов с использованием ферментативного катализа, что позволит обеспечить получение научно обоснованных композитных продуктов мукомольного и крупяного производства сбалансированного состава, обогащенных эссенциальными компонентами. Также важно развитие оценки технологических, биохимических, реологических и органолептических показателей зерна и зернопродуктов, в первую очередь, муки, теста, хлеба, а также готовых мучных кондитерских и замороженных кулинарных изделий, разработка требований к зерну и муке для производства различных групп и видов кондитерских, кулинарных и хлебобулочных изделий. Требования целевого использования зерна и муки для хлебопекарной, кондитерской, макаронной, кулинарной отраслей, отраженные в научных публикациях актуальны и несомненно будут полезны как при планировании дальнейших исследований в этой области, так и для заинтересованных индустриальных партнеров.

Проводимые исследования по оценке микробиологической безопасности зерна — это залог безопасности для здоровья населения нашей страны, в рационе которого хлеб — один из главных продуктов на столе. В частности, в настоящее время актуальна разработка методов контроля фузариозных зерен.

Чрезвычайно важны работы по предотвращению заражения зерна вредителями хлебных запасов, научно обоснованные подходы к мероприятиям по защите хлебных запасов и разработка комплексных высокоэффективных фунгицидных препаратов, метода определения мочевой кислоты с использованием ВЭЖХ в зерне и зернопродуктах, загрязненных насекомыми (*Sitophilus oryzae* (L.)).

Интерес представляют публикации, связанные с научным обеспечением и разработкой методов для определения сроков и норм безопасного хранения зерна и широкого спектра зернопродуктов с использованием интегрального показателя — КЧЖ.

В то же время анализ публикаций выявил, что недостаточно внимания уделяется изучению таких важных актуальных вопросов, как получение, обобщение и анализ данных по качественным показателям зерна с применением системы новых целевых классификаций его потребительских свойств; разработка прогностической модели определения и прослеживаемости норм безопасного хранения и сроков годности от зерна до продуктов его переработки на основе параметров качества и безопасности зерна и зернопродуктов.

Несмотря на разработку ВНИИЗ новой классификации зерна пшеницы в соответствии с задачами, поставленными в «Долгосрочной стратегии развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г.»[3] в стране полностью отсутствует учет сильной и ценной пшеницы, и назрела задача установления тенденций и динамики изменения свойств зерна пшеницы, получения объективной и полной картины по качественному потенциалу зернового сырья страны с целью его прогнозирования и наиболее эффективного и рационального использования. В свою очередь, это вызывает необходимость разработки новых показателей, коррелирующих с зарубежными, для объективной и точной оценки качества зерна, получение и формирование массива статистических данных с применением системы новых целевых классификаций его потребительских свойств, учитывающих требования внешних рынков, а также рост потребностей населения не только в качественном хлебе, но и других мучных изделиях. Все это должно способствовать созданию технологий с применением современного оборудования по направленному управлению биопотенциалом зернового сырья, направленному ферментативному катализу для получения продуктов глубокой переработки целевого назначения.

[3] Долгосрочная стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 10 августа 2019 г. № 1796-р

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Кузьмин, С. В., Русаков, В. Н., Сетко, А. Г. (2024). Оценка состояния фактического питания населения Российской Федерации. *Гигиена и санитария*, 103(1), 58–66. [Kuzmin, S. V., Rusakov, V. N., Setko, A. G. (2024). Assessment of the state of actual nutrition in the population of the Russian Federation. *Hygiene and Sanitation*, 103(1), 58–66. (In Russian)] https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-1-58-66
2. Тарасенко, Н. А., Баранова, З. А. (2016). Современные исследования в нутрициологии и профилактике нерационального питания. *Известия Вузов. Пищевая технология,* 4(352), 6–9. [Tarasenko, N. A., Baranova, Z. A. (2016). Current research in nutritiology and prevention of nutritional improper. *Izvestiya Vuzov. Food Technology,* 4(352), 6–9.]
3. Митин, С. Г., Чеботарев, С. Н., Никитин, И. А., Аничкина, О. А., Иванова, Н. Г. и др. (2022). Современные тенденции в употреблении хлебопродуктов в РФ и подходы к разработке хлебобулочных изделий для здорового питания. *Хлебопродукты,* 3, 40–45. [Mitin, S. G., Cheboterev, S. N., Nikitin, I. A., Anichkina, O. A., Ivanova, N. G. et al. (2022). Current trends in the use of bread products in the Russian Federation and approaches to the development of bakery products for healthy nutrition. *Khleboproducty*, 3, 40–45. (In Russian)]
4. Невская, Е. В., Тюрина, И. А., Тюрина, О. Е., Шулбаева, М. Т., Потапова, М. Н., Головачева, Я. С. (2019). Разработка хлебопекарных композитных смесей для здорового питания. *Техника и технология пищевых производств*, 49(4), 531–544. [Nevskaya, E. V., Tyurina, I. A., Turina, O. E., Shulbaeva, M. T., Potapova, M. N., Golovacheva, Ya. S. (2019). Healthy bakery composite mixes. *Food Processing: Techniques and Technology*, 49(4), 531–544. (In Russian)]. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-531-544
5. Рензяева, Т. В., Тубольцева, А. С., Рензяев, А. О. (2022). Мука различных видов в технологии мучных кондитерских изделий. *Техника и технология пищевых производств*, 52(2), 407–416. [Renzyaeva, T. V., Tuboltseva, A. S., Renzyaev, A. O. (2022). Various flours in pastry production technology. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(2), 407–416. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2373
6. Козьмина, Н. П. (1976). Биохимия зерна и продуктов его переработки. — М.: КОЛОС, 1976. [Kozmina, N. P. (1976). Biochemistry of grain and its processed products. Moscow: KOLOS, 1976.]
7. Hoseney, R. C. (1986). Principles of Cereal Science and Technology. — St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc., 1986.
8. Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kechkin, I. A., Nagainikova, J. R. (2020). Technological schemes for the processes of preparation and milling binary grain mixtures and biochemical evaluation of produced products. *Food Systems*, 3(3), 14–19. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-3-3-14-19
9. Pankratov, G. N., Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Nagainikova, Yu. R., Kechkin, I. A. (February 26–29, 2020). *Development of technological schemes for the processes of preparation and milling of two-component grain mixtures.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials, Voronezh, Russian Federation, 2020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022049
10. Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kechkin, I. A., Nagainikova, Yu. R., Kolomiets, S. N. (2020). Wheat-linen flour: Conditions for producing and biochemical features. *Russian Agricultural Sciences,* 46(4), 404–409. http://doi.org/10.3103/S1068367420040138
11. Vitol, I. S., Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P. (February 26–29, 2020). *Biochemical characteristics of new varieties of flour from a binary mixture of wheat and flax*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials, Voronezh, Russian Federation, 2020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022050
12. Панкратов, Г. Н., Мелешкина, Е. П., Витол, И. С., Коломиец, С. Н., Кечкин, И. А. (2021). Пшенично-льняная мука: условия получения и возможность хранения. *Пищевая промышленность,* 2, 55–59. [Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kolomiets, S. N., Kechkin, I. A. (2021). Wheat-flaxseed flour: The conditions for obtaining and storage capability. *Food Industry*, 2, 55–59. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-2-0019
13. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., Панкратов, Г. Н., Кечкин, И. А. (2022). Новые подходы к трансформации зернового сырья для получения композитной муки. *Известия ВУЗов. Пищевая технология*, 5(389), 6–9. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Pankratov, G. N., Kechkin, I. A. (2022). New approaches to the transformation of grain raw materials for the production of composite flour. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5(389), 6–9. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2022.5.1
14. Панкратов, Г. Н., Кечкин, И. А., Витол, И. С., Коломиец, С. Н. (2022). Получение пшенично-льняной муки из продуктов переработки зерна. *Пищевая промышленность*, 6, 47–50. [Pankratov, G. N., Kechkin, I. A., Vitol, I. S., Kolomiets, S. N. (2022). Obtaining wheat-flax flour from grain processing products. *Food Industry*, 6, 47–50. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.6.6.011
15. Панкратов, Г. Н., Мелешкина, Е. П., Витол, И. С., Кечкин, И. А., Коломиец, С. Н. (2022). Технологические показатели новых сортов трехкомпонентной муки. *Пищевая промышленность*, 5, 16–19. [Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kechkin, I. A., Kolomiets, S. N. (2022). Technological indicators of various grades of three-component flour. *Food Industry*, 5, 16–19. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.004
16. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., Панкратов, Г. Н. (2022). Биохимические особенности новых сортов трехкомпонентной муки. *Пищевая промышленность*, 6, 8–11. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Pankratov, G. N. (2022). Biochemical features of new varieties of three-component flour. *Food Industry*, 6, 8–11. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.6.6.001
17. Самчук, Т. В., Осипчук, И. Р., Кечкин, И. А., Белявская, И. Г. (2022). Совершенствование технологии хлебобулочных изделий путем применения пшенично-ореховой муки на основе кедрового ореха. *Хлебопродукты*, 8, 32–35. [Samchuk, T. V., Osipchuk, I. R., Kechkin, I. A., Belyavskaya, I. G. (2022). Improving the technology of bakery products by using wheat-nut flour based on pine nuts. *Khleboproducty*, 8, 32–35. (In Russian)] https://doi.org/10.32462/0235-2508-2022-31-8-32-35
18. Коломиец, С. Н., Мелешкина, Е. П., Бундина, О. И., Герасина, А. Ю., Жильцова, Н. С., Кириллова, Е. В. (2023). Комплексная оценка качества двухкомпонентной муки, обогащенной ПНЖК. *Пищевая промышленность*, 10, 6–9. [Kolomiets, S. N., Meleshkina, E. P., Bundina, O. I., Gerasina, A. Yu., Zhiltsova, N. S., Kirillova, E. V. (2023). Comprehensive assessment of the quality of two-component flour enriched with PUFA. *Food Industry*, 10, 6–9. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.10.10.001
19. Панкратов, Г. Н., Мелешкина, Е. П., Витол, И. С., Кечкин, И. А., Коломиец, С. Н. (2022). Белково-жировой концентрат для обогащения пшеничной муки. *Пищевые системы,* 5(2), 107–113. [Pankratov, G. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Kechkin, I. A., Kolomiets, S. N. (2022). Protein-fat concentrate for enriching wheat flour. *Food Systems*, 5(2), 107–113. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-107-113
20. Зверев, С. В., Бондаренко, Ю. В., Глухова, Е. В. (2021). Использование смесей на базе зерна бобовых культур в хлебопекарной отрасли. *Хлебопродукты*, 10, 36–40. [Zverev, S. V., Bondarenko, Yu. V., Glukhova, E. V. (2021). The use of mixtures based on legume grains in the baking industry. *Khleboproducty*, 10, 36–40. (In Russian)] https://doi.org/10.32462/0235-2508-2021-30-10-36-40
21. Зверев, С. В., Зубцов, В. А., Лобанов, В. Г., Росляков, Ю. Ф., Глухова, Е. В. (2020). Льняной жмых в белковых пищевых добавках. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6(377–378), 93–97. [Zverev, S. V., Zubtsov, V. A., Lobanov, V. G., Roslyakov, Yu. F., Glukhova, E. V. (2020). Flaxseed cake in protein food additives. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6(377–378), 93–97. (In Russian)] http://doi.org/110.26297/0579-3009.2020.5-6.22
22. Зверев, С. В., Политуха, О. В. (2022). Сбалансированный состав многокомпонентных круп в условиях концепции адекватного питания. *Пищевые системы*, 5(3), 185–194. [Zverev, S. V., Politukha, O. V. (2022). Balanced composition of multicomponent groats in conditions of the adequate nutrition concept. *Food Systems*, 5(3), 185–194. (In Russian)] http://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-185-194
23. Коробейникова, М. М., Зверев, С. В., Политуха, О. В. (2023). Функциональные композитные крупы повышенной пищевой ценности. *Пищевая промышленность*, 3, 6–10. [Korobeynikova, M. M., Zverev, S. V., Politukha, O. V. (2023). Functional composite cereals of increased nutritional value. *Food Industry*, 3, 6–10. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.3.3.001
24. Zverev, S. V., Karpov, V. I., Nikitina, M. A. (2021). Оптимизация пищевых композиций по профилю идеального белка. *Пищевые системы*, 4(1), 4–11. [Zverev, S. V., Karpov, V. I., Nikitina, M. A. (2021). Optimization of food compositions according to the ideal protein profile. *Food Systems*, 4(1), 4–11. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-4-11
25. Zverev, S. V., Karpov, V. I., Klokonos, M. V., Sorokin, A. E., Masyagin, G. M. (17–18, June 2021). *Optimization of food compositions according to the ideal protein profile in a personalized nutrition system*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V International Workshop on Innovations in Agro and Food Technologies (WIAFT-V-2021), Volgograd, Russian Federation, 2020. http://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012021
26. Зверев, С. В., Политуха, О. В., Панкратьева, И. А., Бобков, С. В., Донская, М. В. (2020). Обогащение нутом крупы из злаковых культур. *Хлебопродукты,* 2, 42–45. [Zverev, S. V., Politukha, O. V., Pankratieva, I. A., Bobkov, S. V., Donskaya, M. V. (2020). Enrichment of cereals with chickpeas. *Khleboproducty*, 2, 42–45. (In Russian)]
27. Meleshkina, E. P., Bundina, O. I., Khuhrin A. S. (February 24–25, 2021). *Sustainable grain complex development of Russia: Formation of grain clusters*. E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations» (FARBA 2021), Orel, Russia, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125410012
28. Бундина, О. И., Коваль, А. И. (2022). Стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации: переработка и использование зерна. *Пищевая промышленность*, 5, 36–38. [Bundina, O. I., Koval, A. I. (2022). Development strategy of the grain complex of the Russian Federation: Processing and use of grain. *Food Industry*, 5, 36–38. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.011
29. Мелешкина, Е. П., Коломиец С. Н., Жильцова, Н. С., Бундина, О. И. (2021). Современная оценка хлебопекарных свойств российской пшеницы. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий,* 83(1), 155–162. [Meleshkina, E. P., Kolomiets S. N., Zhiltsova, N. S., Bundina, O. I. (2021). Modern assessment of baking properties of Russian wheat. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(1), 155–162. (In Russian)] http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-155-162
30. Мелешкина, Е. П., Коломиец С. Н., Бундина О. И., Жильцова, Н. С. (2023). Современные требования к качеству ценной пшеницы в России. *Пищевая промышленность*, 6, 6–8. [Meleshkina, E. P., Kolomiets S. N., Bundina O. I., Zhiltsova, N. S. (2023). Modern requirements for the quality of valuable wheat in Russia. *Food Industry*, 6, 6–8. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.001
31. Мелешкина, Е.П., Коломиец, С.Н., Ческидова, А.С. (2020). Использование альвеографа при разработке требований к качеству муки для производства вафельного листа. *Хлебопродукты*, 12, 52–58. [Meleshkina, E. P., Kolomiets, S. N., Cheskidova, A. S. (2020). Using an alveograph in developing requirements for the quality of flour for the production of wafer sheets. *Khleboproducty*, 12, 52–58. (In Russian)]. https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-12-52-58
32. Мелешкина, Е. П., Коломиец, С. Н., Коваль, А. И., Ческидова, А. С., Жильцова, Н. С. (2021). Взаимосвязь показателей реологических свойств теста с качеством крекера. *Пищевая промышленность*, 7, 59–63. [Meleshkina, E. P., Kolomiets, S. N., Koval, A. I., Cheskidova, A. S., Zhiltsova, N. S. (2021). Relationship of indicators of rheological properties of the dough with the quality of the cracker. *Food Industry*, 7, 59–63. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2021.7.7.018

33. Мелешкина, Е. П., Коломиец, С. Н., Жильцова, Н. С., Бундина, О. И. (2021). Разработка требований целевого использования муки на примере мучных кулинарных изделий пельменей. *Пищевая промышленность*, 3, 19–22. [Meleshkina, E. P., Kolomiets, S. N., Zhil'tsova, N. S., Bundina, O. I. (2021). Development of requirements for the targeted use of flour using the example of flour culinary products — dumplings. *Food Industry*, 3, 19–22. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0022
34. Meleshkina, E. P., Kolomiets, S. N., Bundina, O. I., Cheskidova, A. S. (2021). *Application of the alveograph device for the development of requirements for the quality of flour for the production of a wafer sheet*. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. International Conference on Agricultural Science and Engineering, 845, Article 012135. http://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012135
35. Герасина, А. Ю., Коломиец, С. Н. (2024). Влияние количества поврежденного крахмала на технологические свойства пшеничной муки. *Пищевая промышленность*, 5, 14–16. [Gerasina, A. Yu., Kolomiets, S. N. (2024). The influence of the amount of damaged starch on the technological properties of wheat flour. *Food Industry*, 5, 14–16. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2024.5.5.003
36. Мелешкина, Е. П., Коломиец, С. Н., Жильцова, Н. С. (2023). Количество повреждённого крахмала в муке лабораторного и производственного помолов. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 85(3), 67–73. [Meleshkina, E. P., Kolomiets, S. N., Zhiltsova, N. S. (2023). Amount of damaged starch in laboratory and production grinding flour. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 85(3), 67–73. (In Russian)] https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-3-67-73
37. Петров, Г. П., Бундина, О. И., Парфенова, Е. Г., Рутковская, Т. С. (2023). Разработка экспресс-метода спектроскопии в ближней инфракрасной области для определения влажности, белка и количества клейковины. *Хлебопродукты*, 5, 30–33. [Petrov, G. P., Bundina O. I., Parfenova, E. G., Rutkovskaya, T. S. (2023). Development of express method of near-infrared spectroscopy to determine moisture, protein, gluten amount. *Khleboproducty*, 5, 30–33. (In Russian)] https://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-5-30-33
38. Яицких, А. В., Степаненко, Д. С. (2022). Воздействия гамма-лучей и ускоренных электронов на поверхностную микробиоту зерна пшеницы. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5(389), 46–49. [Yaitskikh, A. V., Stepanenko, D. S. (2022). Exposure of a surface wheat grain microbiota to gamma rays and accelerated electrons. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5(389), 46–49. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009. 2022.5.10
39. Яицких, А. В., Степаненко, Д. С. (2022). Методы контроля фузариозных зерен. *Пищевая промышленность*, 12, 22–25. [Yaitskikh, A. V., Stepanenko, D. S. (2022). Methods for control of fusarium head blight grain. *Food Industry*, 12, 22–25. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.12.12.004
40. Мелешкина, Е. П., Жильцова, Н. С., Коломиец, С. Н., Бундина, О. И. (2019). Сравнение российской оценки хлебопекарных свойств пшеницы и определение качества зерна с использованием миксолаба. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(3), 70–80. [Meleshkina, E. P., Zhiltsova, N. S., Kolomiets, S. N., Bundina, O. I. (2019). Comparison of Russian assessment of bakery properties of wheat and determination of grain quality using mixolab. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(3), 70–80. (In Russian)] http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-3-70-80
41. Приезжева, Л. Г., Сорочинский, В. Ф., Вережникова, И.А., Коваль, А. И. (2021). Изменение биохимических и физико-химических показателей продовольственного зерна пшеницы в процессе длительного лабораторного хранения. *Хлебопродукты*, 1, 40–43. [Priezzheva, L. G., Sorochinsky, V. F., Verezhnikova, I. A., Koval, A. I. (2021). Changes in biochemical and physicochemical parameters of wheat food grain during long-term laboratory storage. *Khleboproducty*, 1, 40–43. (In Russian)] http://doi.org/10.32462/0235-2508-2021-30-1-40-43
42. Яицких, А. В., Ванина, Л. В., Приезжева, Л. Г. (2021). Влияние микроорганизмов на изменение кислотного числа жира при длительном хранении зерна. *Пищевая промышленность*, 5, 13–15. [Yaitskikh, A. V., Vanina, L. V., Priezzheva, L. G. (2021). The effect of microorganisms on the change of fat acidity value during long-term storage of wheat grain. *Food Industry*, 5, 13–15. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2021.5.5.002
43. Ванина, Л. В., Яицких, А. В., Волкова, О. В., Степаненко, Д. С. (2021). Нормы свежести и годности продовольственного зерна пшеницы. *Пищевая промышленность*, 12, 64–67. [Vanina, L. V., Yaitskikh, A. V., Volkova, O. V., Stepanenko, D. S. (2021). Standards of freshness and shelf life of food grain of wheat. *Food Industry*, 12, 64–67. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2021.12.12.0124
44. Приезжева, Л. Г., Сорочинский, В. Ф., Вережникова, И. А., Коваль, А. И., Яицких, А. В. (2019). Изменение биохимических, физико-химических и микробиологических свойств пшеничной хлебопекарной муки в процессе созревания. *Хлебопродукты*, 10, 56–59. [Priezzheva, L. G., Sorochinsky, V. F., Verezhnikova, I. A., Koval, A. I., Yaitskikh, A. V. (2019). Changes in the biochemical, physicochemical and microbiological properties of wheat baking flour during the ripening process. *Khleboproducty*, 10, 56–59. (In Russian)] http://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-28-10-56-59
45. Приезжева, Л. Г., Сорочинский, В. Ф., Вережникова, И. А., Коломиец, С. К. (2019). Методика установления срока созревания пшеничной муки по значению кислотного числа жира. *Хлебопродукты*, 7, 49–51. [Priezzheva, L. G., Sorochinsky, V. F., Verezhnikova, I. A., Kolomiets, S. K. (2019). A method for determining the ripening period of wheat flour based on the acid number of fat. *Khleboproducty*, 7, 49–51. (In Russian)] http://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-29-7-49-51
46. Gavrichenkov, Yu. D., Razvorotnev, A. S., Kechkin, I. A., Verezhnikova, I. A. (2019). Change of the acid number of wheat grain fat while stored in laboratory conditions. *Food Systems*, 2(2), 27–30. http://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-27-30
47. Яицких, А. В., Ванина, Л. В., Кириллова, Е. В. (2024). Изменения показателей качества пшеничной муки в процессе её созревания. *Пищевая промышленность*, 5, 60–62. [Yaitskikh, A. V., Vanina, L. V., Kirillova, E. V. (2024). Changes in quality indicators of wheat flour during its maturation. *Food Industry*, 5, 60–62. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2024.5.5.017
48. Волкова, О. В., Ванина, Л. В. (2022). Кислотное число жира как индикатор свежести и годности манной крупы. *Пищевая промышленность*, 5, 53–54. [Volkova, O. V., Vanina, L. V. (2022). Acid number of fat as an indicator of freshness and shelf life of semolina. *Food Industry*, 5, 53–54. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/ PPI.2022.5.5.019
49. Ванина, Л. В., Яицких, А. В. (2023). Взаимосвязь КЧЖ с органолептическими свойствами крупы манной и каши, приготовленной из неё. *Пищевая промышленность*, 6, 9–11. [Vanina, L. V., Yaitskikh, A. V. (2023). Relationship of FAV with organoleptic indicators of grain and porridge prepared from it. *Food Industry*, 6, 9–11. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.002
50. Ванина, Л. В., Яицких, А. В., Волкова, О. В., Вережникова, И. А. (2023). Установление норм свежести и годности крупы манной по КЧЖ. *Пищевая промышленность*, 4, 75–77. [Vanina, L. V., Yaitskikh, A. V., Volkova, O. V., Verezhnikova, I. A. (2023). Establishment of norms for freshness and suitability of semolina according to FAV. *Food Industry*, 4, 75–77. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.4.4.013
51. Степаненко, Д. С., Яицких, А. В. (2021). Эффективность метода определения мочевой кислоты в зерне с помощью ВЭЖХ. *Пищевые системы*. 4(3S), 286–291. [Stepanenko, D. S., Yaitskikh, A. V. (2021). Efficiency of the method for determination of uric acid in grain using HPLC. *Food Systems*, 4(3S), 286–291. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-4-3S-286-291
52. Яицких, А. В., Закладной, Г. А., Степаненко, Д. С. (2023). Определение мочевой кислоты в зернопродуктах с помощью ВЭЖХ. *Пищевая промышленность*, 6, 24–26. [Yaitskikh, A. V., Zakladnoy, G. A., Stepanenko, D. S. (2023). Determination of uric acid in grain products by HPLC. *Food Industry*, 6, 24–26. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.007
53. Zakladnoy, G. A., Yaitskikh, A. V. (2020). Dependence of uric acid content in stored grain on the population density of the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera, Dryophthoridae). *Entomological Review*, 100(2), 170–172. http://doi.org/10.1134/S0013873820020049
54. Закладной, Г. А., Яицких, А. В, Степаненко, Д. С. (2022). Формирование в зерне мочевой кислоты, продуцируемой зерновым точильщиком *Rhizopertha dominica* (f.) *Пищевые системы*, 5(2), 139–144. [Zakladnoy, G. A., Yaitskikh, A. V., Stepanenko, D. S. (2022). Formation of uric acid in grain produced by *Rhyzopertha dominica* (f.). *Food Systems*, 5(2), 139–144. (In Russian)] http://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-139-144
55. Яицких, А. В., Закладной, Г. А., Степаненко, Д. С. (2024). Особенности формирования малым мучным хрущаком Tribolium confusum Duv. (Tenebrionidae) мочевой кислоты в хранящемся зерне. *Пищевая промышленность*, 3, 26–28. [Yaitskikh, A. V., Zakladnoy, G. A., Stepanenko, D. S. (2024). Features of formation of uric acid by Tribolium confusum Duv. (Tenebrionidae) in stored grain. *Food Industry*, 3, 26–28. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2024.3.3.005
56. Степаненко, Д. С., Закладной, Г. А., Яицких, А. В. (2024). Накопление суринамским мукоедом Oryzaephilus surinamensis (L.) мочевой кислоты в хранящемся зерне. *Пищевая промышленность*, 5, 8–10. [Stepanenko, D. S., Zakladnoy, G. A., Yaitskikh, A. V. (2024). Accumulation of uric acid in stored grain by the Oryzaephilus surinamensis (L.). *Food Industry*, 5, 8–10. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2024.5.5.001
57. Закладной, Г. А., Яицких, А. В., Степаненко, Д. С. (2023). Распределение мочевой кислоты в продуктах помола зерна, поражённого рисовым долгоносиком. *Пищевая промышленность,* 3, 79–81. [Zakladnoy, G. A., Yaitskikh, A. V., Stepanenko, D. S. (2023). Distribution of uric acid in the grinding products of grain affected by rice weevil. *Food Industry*, 3, 79–81. (In Russian)] http://doi.org/10.52653/PPI.2023.3.3.016
58. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., Панкратов, Г. Н. (2022). Отруби из композитной зерносмеси как объект глубокой переработки. Часть 1. Белково-протеиназный комплекс. *Пищевые системы*, 5(4), 282–288. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Pankratov, G. N. (2022). [Bran from a composite grain mixture is an object of deep processing. Part 1. Protein-proteinase complex. *Food Systems*, 5(4), 282–288. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-282-288
59. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., Панкратов, Г. Н. (2023). Отруби из композитной зерносмеси как объект глубокой переработки. Часть 2. Углеводно-амилазный и липидный комплексы. *Пищевые системы*, 6(1), 22–28. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Pankratov, G. N. (2023). Bran from a composite grain mixture as an object of deep processing. Part 2. Carbohydrate-amylase and lipid complexes. *Food Systems*, 6(1), 22–28. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-22-28
60. Poutanen, K. S., Kårlund, A. O., Gómez-Gallego, C., Johansson, D. P., Scheers, N. M., Marklinder, I. M. et al. (2022). Grains — a major source of sustainable protein for health. *Nutrition Reviews*, 80(6), 1648–1663. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuab084
61. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П. (2023). Поликомпонентные отруби — ценный вторичный продукт. *Хлебопродукты*, 11, 58–63. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P. (2023). Polycomponent bran is a valuable secondary product. *Khleboproducty*, 11, 58–63. (In Russian)] http://doi.org/10.32462/0235-2508-2023-32-11-58-63
62. Никифорова, Т. А., Хон, И. А., Леонова, С. А., Вебер, А. Л., Краус, С. В. (2020). Рациональное использование побочных продуктов мукомольного и крупяного производства. *Хлебопродукты*, 11, 30–32. [Nikiforova, T. A., Khon, I. A., Leonova, S. A., Veber, A. L., Kraus, S.V. (2020). Rational use of by-products of flour and grain production. *Khleboproducty*, 11, 30–32. (In Russian)]
63. Krikunova, L. N., Meleshkina, E. P., Vitol, I. S., Dubinina, E. V., Obodeeva, O. N. (2023). Grain bran hydrolysates in the production of fruit distillates. *Foods and Raw Materials,* 11(1), 35–42. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-550
64. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П., Крикунова, Л. Н. (2023). Композиции ферментных препаратов для направленной модификации отрубей. *Пищевые системы*, 6(4), 457–462. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P., Krikunova, L. N. (2023). Compositions of enzyme preparations for targeted modification of bran. *Food Systems*, 6(4), 457–462. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-4-457-462
65. Bilal, M., Iqbal, H.M.N. (2020). State-of-the-art strategies and applied perspectives of enzyme biocatalysis in the food sector — current status and

future trends. *Critical Reviews Food Science and Nutrition*, 60(12), 2052–2066. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1627284
66. Болтовский, В. С. (2021). Ферментативный гидролиз растительного сырья: состояние и перспективы. *Известия Национальной академии наук Беларуси*. Серия химических наук, 57(4), 502–512. [Boltovsky, V. S. Enzymatic hydrolysis of plant raw materials: State and prospects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 57(4), 502–512 (In Russian)] https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-4-502-512
67. Vitol, I. S., Igoryanova, N. A., Meleshkina, E. P. (2019). Bioconversion of secondary products of processing of grain cereals crops. *Food Systems,* 2(4), 18–24. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-4-18-24
68. Толкачева, А. А., Черенков, Д. А., Корнеева, О. С., Пономарев, П. Г. (2017) Ферменты промышленного назначения — обзор рынка ферментных препаратов и перспективы его развития. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 79(4), 197–203. [Tolkacheva, A. A., Cherenkov, D. A., Korneeva, O. S., Ponomarev, P. G. (2017). Enzymes of industrial purpose — review of the market of enzyme preparations and prospects for its development. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 79(4), 197–203. (In Russian)]. https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-4-197-203
69. Серба, Е. М., Римарева, Л. В., Оверченко, М. Б., Игнатова, Н. И., Погоржельская, Н. С. (2022). Роль биокатализа в технологиях переработки зернового сырья. *Пищевая промышленность*, 5, 13–15. [Serba, E. M., Rimareva, L. V., Overchenko, M. V., Ignatova, N. I., Pogorzhel'skaya, N. S. (2022). The role of biocatalysis in grain processing technologies. *Food Industry*, 5, 13–15. (In Russian)]. https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.003
70. Костылева, Е.В., Середа, А.С., Великорецкая, И.А., Курбатова, Е.И., Цурикова, Н.В. (2023). Использование протеолитических ферментов для получения белковых гидролизатов пищевого назначения из вторичного сырья. *Вопросы питания*, 92(1), 116–132. [Kostyleva, E.V., Sereda, A.S., Velikoretskaya, I.A., Kurbatova, E.I., Tsurikova, N.V. (2023). Proteases for obtaining of food protein hydrolysates from proteinaceous by-products. *Problems of Nutrition*, 92(1), 116–32 (In Russian)] https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132
71. Зорин, С. Н. (2019). Ферментативные гидролизаты пищевых белков для специализированных пищевых продуктов диетического (лечебного и профилактического) питания. *Вопросы питания*, 88(3), 23–31. [Zorin, S. N. (2019). Enzymatic hydrolysates of foods for therapeutic and prophylactic nutrition. *Problems of Nutrition*, 88(3), 23–31. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10026
72. Соколов, Д. В., Болхонов, Б. А., Жамсаранова, С. Д., Лебедева, С. Н., Баженова, Б. А. (2023). Ферментативный гидролиз соевого белка. *Техника и технология пищевых производств,* 53(1), 86–96. [Sokolov, D. V., Bolkhonov, B. A., Zhamsaranova, S. D., Lebedeva, S. N., Bazhenova, B. A. (2023). Enzymatic hydrolysis of soy protein. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(1), 86–96. (In Russian)]. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2418
73. Витол, И. С., Мелешкина, Е. П. (2021). Ферментативная трансформация пшенично-льняных отрубей. *Пищевая промышленность*, 9, 20–22. [Vitol, I. S., Meleshkina, E. P. (2021). Enzymatic transformation of wheat-flax bran. *Food Industry*, 9, 20–22. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2021.9.9.004
74. Витол, И. С. (2022). Структурно-модифицированные отруби — инновационный продукт глубокой переработки зерна. *Пищевая промышленность*, 5, 27–29. [Vitol, I. S. (2022). Structurally modified bran is an innovative product of deep grain processing. *Food Industry*, 5, 27–29. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2022.5.5.008
75. Витол, И. С. (2023). Эффективность ферментных препаратов при получении гидролизатов из отрубей. *Пищевая промышленность*, 6, 48–50. [Vitol, I. S. (2023). Efficiency of enzyme preparations in obtaining hydrolysates from bran. *Food Industry*, 6, 48–50. (In Russian)] https://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.015
76. Рогачёв, В. А., Мерзлякова, О. Г., Лукьянчикова, Н. Л., Магер, С. Н. (2022). Белково-витаминная мука из пшеничных отрубей, обогащенная фитазой в рационе перепелов. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*, 52(2), 46–54. [Rogachev, V. A., Merzlyakova, O. G., Lukyanchikova, N. L., Mager, S. N. (2022). Protein-vitamin flour from wheat bran enriched with phytase in the diet of quails. *Siberian Bulletin of Agricultural Science*, 52(2), 46–54. (In Russian)]
77. Рогачёв, В. А., Мерзлякова, О. Г., Чегодаев, В. Г., Лукьянчикова, Н. Л. (2021). Фракционированная белково-витаминная мука из пшеничных отрубей в рационах несушек перепелов. *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство,* 11, 40–49. [Rogachev, V. A., Merzlyakova, O. G., Chegodaev, V. G., Lukyanchikova, N. L. (2021). Fractionated protein and vitamin meal from wheat bran in the diets of laying quails. *Feeding of Farm Animals and Feed Productio*n, 11, 40–49. (In Russian)] https://doi.org/:10.33920/sel-05-2111-05
78. Лукьянчикова, Н. Л., Скрябин, В. А., Табанюхов, К. А. (2020). Особенности состава отрубей пшеницы и ржи и их роль в профилактике хронических заболеваний человека (обзор). *Инновации и продовольственная безопасность*, 4, 41–58. [Lukyanchikova, N. L., Skryabin, V. A., Tabanyukhov, K. A. (2020). Peculiarities of the composition of wheat and rye bran and their role in the prevention of chronic diseases of human review. *Innovations and Food Security*, 4, 41–58. (In Russian)] https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-41-58

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Мелешкина Елена Павловна — доктор технических наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки 127434, Москва, Дмитровское шоссе, 11 Тел.: +7–499–976–23–23 E-mail: e.meleshkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1339-7150	**Elena P. Meleshkina**, Doctor of Technical Sciences, Director, All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing 11, Dmitrovskoye Shosse, Moscow, 127434, Russia Tel.: +7–499–976–23–23 E-mail: e.meleshkina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1339-7150
Ванина Людмила Витальевна — кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки 127434, Москва, Дмитровское шоссе, 11 Тел.: +7–916–498–59–27 E-mail: l.vanina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9498-4885	**Lyudmila V. Vanina** — Candidate of Chemical Sciences, Deputy Director for Research, All-Russian Research Institute of Grain and Its Processed Products 11, Dmitrovskoe highway, Moscow, 127434, Russia Tel.: +7–916–498–59–27 E-mail: l.vanina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9498-4885
Витол Ирина Сергеевна — кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки 127434, Москва, Дмитровское шоссе, 11 Тел.: +7–926–709–02–07 E-mail: i.vitol@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5362-8909 * автор для контактов	**Irina S. Vitol** — Candidate of Biological Sciences, Docent, Senior Researcher, All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing 11, Dmitrovskoye Shosse, Moscow, 127434, Russia Tel.: +7–926–709–02–07 E-mail: i.vitol@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5362-8909 * corresponding author
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-454-465

Поступила 25.03.2024
Поступила после рецензирования 20.09.2024
Принята в печать 27.09.2024
© Голуб О. В., Мотовилов О. К., Мотовилова Н. В., Давыденко Н. И., 2024

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЯГОД КРЫЖОВНИКА

Голуб О. В.[1]*, Мотовилов О. К.[1], Мотовилова Н. В.[1], Давыденко Н. И.[2]

[1] Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская обл., р. п. Краснообск, Россия

[2] Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *полуфабрикат, Ribes uva-crispa L., сорт, роторный аппарат, свежие плоды, быстрозамороженные плоды*

АННОТАЦИЯ

Качество пюреобразной продукции из плодов определяется множеством факторов. Цель исследования — определение оптимальных технологических условий изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника, предусматривающих использование оборудования с роторным аппаратом (МАГ-50), обеспечивающих требуемые характеристики качества. Объекты исследований — полуфабрикаты из ягод крыжовника. Технология изготовления — предусматривающая высокотемпературную обработку и предусматривающая использование МАГ-50. Методы исследований — стандартные. Установлено, что для получения продукции с требуемыми характеристиками качества наибольшее влияние оказывала продолжительность обработки в МАГ-50. Определены оптимальные технологические условия изготовления продукции в МАГ-50 — обработка в течение 14–20 мин при температуре 59–65 °С не менее 72% свежих ягод или 58–65 °С не менее 66% быстрозамороженных. Установлено, что технология, предусматривающая использование МАГ-50, по сравнению с предусматривающей высокотемпературную обработку, позволяла получить продукцию с меньшим содержанием мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, плесневых грибов (соответственно на 97,7 и 69,8%), лучшими характеристиками внешнего вида (на 1,7%), цвета, текстуры и запаха (на 2,3%), вкуса и послевкусия (на 3,6%). Состояние сырья оказывало наибольшее влияние на содержание в полуфабрикатах дрожжей — продукция, изготовленная из свежих ягод, содержала их в среднем на 48,7% больше, чем из быстрозамороженных. Ягоды крыжовника сорта Розовый 2, по сравнению с сортом Сенатор, позволяли получать продукцию с большим содержанием растворимых сухих веществ, сахаров, минеральных веществ и аскорбиновой кислоты (соответственно на 18,2, 58,9, 7,7 и 61,8%), меньшим — титруемых кислот и пищевых волокон (соответственно на 21,2 и 20,3%). Исследование демонстрирует потенциал получения полуфабрикатов из ягод крыжовника, вне зависимости от их сорта и состояния, за счет использования технологии, предусматривающей использование МАГ-50.

Received 25.03.2024
Accepted in revised 20.09.2024
Accepted for publication 27.09.2024
© Golub O. V., Motovilov O. K., Motovilova N. V., Davydenko N. I., 2024

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

DETERMINATION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL CONDITIONS FOR THE MANUFACTURE OF SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM GOOSEBERRY FRUIT

Olga V. Golub[1]*, Oleg K. Motovilov[1], Natalya V. Motovilova[1], Nataliia I. Davydenko[2]

[1] Siberian Federal Scientific Center of Agro-biotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Russia, Novosibirsk region, working village Krasnoobsk, Russia

[2] Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

KEY WORDS: *semi-finished product, Ribes uva-crispa L., variety, rotary machine, fresh berries, frozen berries*

ABSTRACT

The quality of pureed berries products is determined by many factors. The purpose of the study was to determine the optimal technological conditions for the manufacture of semi-finished products from gooseberries, providing for the use of equipment with a rotary machine (MAG-50) and ensuring the required quality characteristics. The objects of research were semi-finished products from gooseberries. The manufacturing technology involved high-temperature processing or the use of the rotary machine MAG-50. The research methods were standard. It has been found that in order to obtain products with the required quality characteristics, the duration of processing in MAG-50 had the greatest influence. The optimal technological conditions for the manufacture of products in MAG-50 have been determined: processing for 14–20 minutes at a temperature of 59–65 °C of at least 72% of fresh berries or 58–65 °C of at least 66% of quick-frozen ones. It has been established that the technology involving the use of rotary machine MAG-50, compared with the high-temperature one, made it possible to obtain products with a lower content of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms, molds (by 97.7 and 69.8%, respectively), better appearance characteristics (by 1.7%), color, texture and odor (by 2.3%), taste and aftertaste (by 3.6%). The state of the raw materials had the greatest impact on the content of yeast in semi-finished products — products made from fresh berries contained 48.7% more of them on average than products from quick-frozen ones. Compared with the Senator variety, gooseberry fruits of the Pink 2 variety-made it possible to obtain products with a high content of soluble solids, sugars, minerals and ascorbic acid (by 18.2, 58.9, 7.7 and 61.8%, respectively), less titrated acids and dietary fibers (by 21.2 and 20.3%, respectively). The study demonstrates the potential of obtaining semi-finished products from gooseberries, regardless of their variety and condition by using the technology involving the use of MAG-50.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Голуб, О. В., Мотовилов, О. К., Мотовилова, Н. В., Давыденко, Н. И.** (2024). Определение оптимальных технологических условий изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника. *Пищевые системы*, 7(3), 454–465. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-454-465

FOR CITATION: **Golub, O. V., Motovilov, O. K., Motovilova, N. V., Davydenko, N. I.** (2024). Determination of optimal technological conditions for the manufacture of semi-finished products from gooseberry fruit. *Food Systems*, 7(3), 454–465. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-454-465

1. Введение

Полуфабрикаты из ягодного сырья в последние годы приобретают все большую востребованность из-за того, что могут использоваться не только непосредственно в питании, но и при изготовлении других пищевых продуктов, например, молочных, кондитерских, мясных). Пюреобразная продукция из плодов или с их использованием представляет собой продукт, полученный из сырья, подготовленного в соответствии с установленной технологией, включающей измельчение, протирание без отделения сока и мякоти (пюре, повидло, соус и других [1]. Для осуществления основных технологических операций изготовления пюреобразной продукции используется различное оборудование — дробилки, резательные машины, гомогенизаторы и дезинтеграторы (для тонкого измельчения), протирочные машины, финишеры, диспергаторы, вакуум-аппараты, варочные котлы и прочие [2]. Многими специалистами осуществляются исследования в области создания оборудования для получения высококачественной пюреобразной продукции из плодов или с их использованием.

В последние годы все большую популярность при изготовлении пюреобразной продукции приобретают роторные аппараты, реализующие разные воздействия на частицы пищевой среды: механические (ударные, срезывающие, истирающие) и гидродинамические (большие сдвиговые напряжения, развитая турбулентность, пульсации давления и скорости потока жидкости) — например, гидродинамические роторного типа, роторно-пульсационные гомогенизаторы, насосы-гомогенизаторы; механические, гидродинамические и гидроакустические (крупно- и мелкомасштабные пульсации давления, интенсивная кавитация, ударные волны и нелинейные акустические эффекты) — роторные импульсные, роторные с модуляцией потока, роторно-пульсационные акустические [3]. Применение роторных аппаратов в технологиях пюреобразной продукции из плодов позволяет сократить количество используемого оборудования, поскольку они способны осуществлять одновременно ряд технологических операций: механических — диспергирование, эмульгирование, гомогенизацию и другие; массообменных — растворение, экстрагирование, абсорбцию; тепловых — нагревание. Обработка пищевой системы в роторном аппарате приводит к ряду ее изменений: физическим [4–6] — уменьшению размера частиц (приводит к улучшению процесса гомогенизации, снижению скорости их осаждения и отделения осадка, повышению кажущейся вязкости), общего количества растворимых сухих веществ, вязкости, плотности, кислотности; химическим [4–6] — лучшей, по сравнению с традиционными высокотермическими способами обработки, сохранности нутриентного состава, в том числе термочувствительных веществ (например, витамина С); увеличению содержания многих термостабильных соединений за счет их высвобождений из матрицы (например, общего содержания фенолов, проантоцианидинов клюквы); инактивации термостабильных ферментов (например, пектинметилэстеразы, пероксидазы, полифенолоксидазу) с увеличением срока хранения; усилению цвета (например, за счет ускоренной изомеризации каратиноидов апельсиновый сок становится более желтым, ярким и прозрачным, чем свежеотжатый); биологическим [4–6] — микробной инактивации за счет воздействий физических (например, из-за разрыва мембраны и цитоплазмы), термических (например, из-за денатурации мембран, разрывов цепей ДНК) и химических (например, активные формы кислорода окисляют сульфгидрильные группы и двойные связи в белках, липидах).

За счет использования нового оборудования специалисты осуществляют модернизацию, совершенствование и модификацию пюреообразной продукции из плодов или с их использованием. Например: Иванец Г. Е. с соавторами использовали роторные аппараты для изготовления ряда продуктов (пюре из ранета на основе молочной сыворотки, из сушеных ягод черной смородины; взбитого кисломолочного десерта; мороженого «Рыжик» с облепиховой порошкообразной биодобавкой «Полис»; майонеза «Провансаль»), обладающих наименьшим размером частиц, равномерно распределенным по всему объему, что повышает седиментационную устойчивость продукции и органолептические свойства [7]; Mykhailov [8] с соавторами разработали пюре и пасты из яблок, калины, черноплодной рябины, тыквы, свеклы, отличающиеся высоким содержанием физиологически функциональных ингредиентов за счет использования способа, предусматривающего применение многофункционального аппарата для осуществления предварительной термической обработки сырья и ротационного пленочного испарителя для концентрирования, где основные технологические операции осуществлялись в диапазоне температур 45–70 °С [8]; специалистами Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук использован роторный аппарат при изготовлении ряда пищевой продукции, обладающей оригинальными органолептическими характеристиками, высоким содержанием биологически активных веществ и длительным сроком хранения — полуфабриката из плодов шиповника, ядер семян *Pinus sibirica* [9,10]; специалистами Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова роторные аппараты использовались при изготовлении молочных продуктов, обладающих оригинальными органолептическими свойствами, в том числе пышной нерасслаивающейся структурой, биологически активными нутриентами — из плодов облепихи, черной смородины, яблок, абрикосов, вишен, персиков, слив, черники [11].

Крыжовник произрастает на территории нашей страны и культивируется предприятиями различных форм собственности. Ягоды крыжовника представляют собой настоящую неклимактерическую ягоду разной формы (эллиптической, грушевидной, округлой и т. д.), цвета (красного, зеленого, желтого и т. д.), вкуса (кислого, сладкокислого, кисло-сладкого и т. д.) и другими качественными характеристиками. [12,13]. Пищевая ценность и фармакологические свойства ягод крыжовника обусловлены, в основном, его химическим составом, изменчивость которого зависит от множества факторов (сорта, места произрастания, условий сбора и т. д.) [14], а именно содержащимися сахарами [14–16], пищевыми волокнами [14,15], минеральными веществами [14,15], органическими кислотами [15,16], фенольными соединениями [15,16,17,18], витаминами [14,15,17,18] и пр. [14,17,19]. Ягоды крыжовника употребляются как в свежем, так и переработанном виде, например при изготовлении молокосодержащих продуктов [20], хлеба [21], печенья и варенья [22].

На основании вышесказанного, поиск инновационных путей совершенствования способов получения полуфабрикатов из ягод крыжовника, в том числе за счет использования современного оборудования, является актуальным.

Цель исследования — определение оптимальных технологических условий изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника, предусматривающих использование оборудования с роторным аппаратом, обеспечивающих требуемые характеристики качества.

2. Объекты и методы

Объекты исследований — полуфабрикаты из ягод крыжовника. При определении оптимальных технологических условий изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника предусматривали использование свежих и быстрозамороженных ягод крыжовника сортов Сенатор и Розовый 2, оборудование с роторным аппаратом МАГ-50 (ООО «Сибирская катализаторная компания», Россия). Ягоды крыжовника собирались на биополигоне Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, замораживались, после мойки, сортировки и обсушивания, при температуре минус 32 °С до достижения внутри продукции температуры минус 18 °С. Приготовление полуфабриката из ягод крыжовника по технологии: предусматривающей высокотемпературную обработку — мойка, сортировка, бланширование в воде (температурой 90–100 °С) в течение 3–8 мин, смешивание с водой (температурой 16–20 °С), протирание (диаметр отверстий сита 0,5–0,8 мм), финиширование (диаметр отверстий сита 0,4 мм), уваривание в течение 45–50 мин (до содержания сухих веществ не менее 11,0% по рефрактометру); предусматривающей использование роторного аппарата — мойка, сортировка, смешивание с водой (температурой 16–20 °С), обработка в МАГ-50 (частота вращения диспергатора 2900 об/мин, мешалки 10 об/мин). Испытания проводили сразу после производства полуфабрикатов.

На основании имеющегося опыта использования роторного аппарата МАГ-50 установили регламентируемые пределы размера частиц пюреобразной продукции: количество частиц мякоти размером более 0,8 мм не должно превышать 7,0% от общего количества [23]. Размер частиц полуфабрикатов определяли методом, основанным на пропускании анализируемой пробы продукции сквозь набор сит с постепенно уменьшающимися размерами отверстий (проволочная ткань с размером ячеек 0,70, 0,80, 1,00 и 1,25 мм) и статистической оценке размеров частиц образовавшихся фракций. Массовую долю каждой фракции продукции определенного размера (f,%) вычисляли по формуле:

$$f = \frac{100 \cdot m_1}{m} \quad (1)$$

где 100 — коэффициент пересчета в проценты; m_1 — масса фракции продукции, г; m — масса анализируемой пробы продукции, г.

Оптимизация массовой доли частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника, общей органолептической оценки не менее 3,0 баллов продукции и технологических условий их получения проводилась по стандартному трехфакторному плану. Статистический анализ проводили с использованием программы Statistica 10. Все экспериментальные определения проводили в трех повторностях, результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Трехфакторный дисперсионный анализ применялся для оценки текстуры полуфабрикатов из ягод крыжовника (независимые переменные — количество ягод, продолжительность и температура обработки в МАГ-50), метод Снедекора — для определения силы влияния независимых переменных ($p < 0,05$), тест Тьюки — для сравнения средних значений ($p < 0,05$); множественная регрессия проводилась для определения сопряженности между независимыми и зависимой переменными; используя методологию анализа поверхности отклика проводили исследования по поиску оптимальных технологических условий получения полуфабрикатов из ягод крыжовника.

Определение значений физико-химических (растворимых сухих веществ, сахаров, титруемых кислот, золы, пищевых волокон и витамина С), микробиологических (мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, плесневых грибов и дрожжей, бактерий группы кишечной палочки и рода) и органолептических (внешнего вида, цвета, текстуры, запаха и вкуса) показателей полуфабрикатов из ягод крыжовника проводили, используя стандартные методы — согласно ГОСТ ISO 2173-2013[1], ГОСТ 8756.13–87[2], ГОСТ ISO 750-2013[3], ГОСТ 25555.4-91[4], ГОСТ 34844-2022[5], ГОСТ 24556-89[6], ГОСТ 10444.15-94[7], ГОСТ 10444.12-2013[8], ГОСТ 31747-2012[9], ГОСТ 31659-2012 (ISO 6579:2002)[10], ГОСТ 8756.1-2017[11]. Все экспериментальные определения проводили в трех-пяти повторностях, результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Трехфакторный дисперсионный анализ применялся для оценки характеристик качества полуфабрикатов из ягод крыжовника (независимые переменные — сорт и состояние ягод, технология изготовления), тест Тьюки — для сравнения средних значений ($p < 0,05$), метод Снедекора — для определения силы влияния независимых переменных. При выполнении исследований использовано следующее оборудование: баня водяная WB-4MS (Биосан, Латвия), весы лабораторные Pioneer PA2102C (Ohaus Instruments (Changzhon) Co., Ltd., Китай), весы лабораторные Pioneer PA214 (Ohaus Instruments (Changzhon) Co., Ltd., Китай), гомогенизатор HG-15F-Set (DAIHAN Scientific Co., Ltd., Республика Корея), pH-метр Starter 2100 (Ohaus Instruments (Changzhon) Co., Ltd., Китай), микроскоп Микромед 2 (Ningbo Sheng Heng Optics&electronics Co., Ltd., Китай), печь муфельная Snol 7,2/900 (Umega Group, AB, Литва), плита программируемая ПЛП-03 (НПП «Томьаналит», Россия), рефрактометр ИРФ-454Б2М (КОМЗ, Россия), стерилизатор паровой ВК-75-01 (ОАО «Тюменский завод медицинского оборудования и инструментов», Россия), инкубатор MIR-262 (SANYO Electric Co., Ltd., Япония), шкаф сушильный ШС-80-01 МК СПУ (ОАО «Смоленское специальное конструкторско-технологическое бюро систем программного управления», Россия).

[1] ГОСТ ISO 2173-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

[2] ГОСТ 8756.13-87 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров. М.: Стандартинформ, 2010. — 10 с.

[3] ГОСТ ISO 750-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности. М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

[4] ГОСТ 25555.4-91 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения золы и щелочности общей и водорастворимой золы. М.: Стандартинформ, 2011. — 6 с.

[5] ГОСТ 34844-2022 Продукция пищевая. Определение массовой доли пищевых волокон. М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 16 с.

[6] ГОСТ 24556-89 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 11 с.

[7] ГОСТ 10444.15-94 Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. М.: Стандартинформ, 2010. — 7 с.

[8] ГОСТ 10444.12-2013 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов. М.: Стандартинформ, 2010. — 13 с.

[9] ГОСТ 31747-2012 Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

[10] ГОСТ 31659-2012 (ISO 6579:2002) Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода Salmonella. М.: Стандартинформ, 2014. — 25 с.

[11] ГОСТ 8756.1-2017 Продукты переработки фруктов, овощей и грибов. Методы определения органолептических показателей, массовой доли составных частей, массы нетто или объема М.: Стандартинформ, 2019. — 17 с.

3. Результаты и обсуждение

В Таблице 1 представлены результаты исследований по влиянию исследуемых факторов (количества ягод в смеси с водой питьевой, продолжительности и температуры обработки смеси) на характеристики качества полуфабрикатов из ягод крыжовника (содержание части определенных размеров и общую органолептическую оценку).

Полуфабрикаты из ягод крыжовника представляли собою смеси частиц кожицы, мякоти и семян ягод и воды питьевой. Полуфабрикаты содержали различное количество частиц размерами, превышающими 0,8 мм. В результате дисперсионного анализа на образование частиц размерами более 0,8 мм в полуфабрикатах выявлено более существенное влияние продолжительности обработки, чем температуры (сила влияния соответственно в среднем 63,0 и 27,0%, $p < 0,01$). Количество ягод оказывало минимальное влияние на образование исследуемых частиц (сила влияния в среднем 8,0%, $p < 0,01$). Взаимосвязь исследуемых факторов оказывала незначительное влияние на образование в полуфабрикатах частиц размерами более 0,8 мм — сила влияния «количества ягод × продолжительности обработки», «количества ягод × температуры обработки», «продолжительности обработки × температуры обработки» и «количества ягод × продолжительности обработки × температуры обработки» соответственно в среднем 0,4, 0,2, 1,3 и 0,1% ($p < 0,01$). Процесс образования частиц в продукции обусловлен, вероятно, структурными изменениями полисахаридов ягод, активизацией ферментов и другими биохимическими изменениями из-за воздействий (пульсационных, ударных и пр.) оборудования с роторным аппаратом.

На органолептическую оценку полуфабрикатов из свежих ягод крыжовника продолжительность и температура обработки оказывали существенное влияние (сила влияния соответственно 48,1 и 37,6%, $p < 0,01$), меньшее — количество ягод (сила влияния 9,1%, $p < 0,01$). На органолептическую оценку полуфабрикатов из быстрозамороженных ягод продолжительность обработки оказывала существенное влияние (сила влияния в среднем 70,4%, $p < 0,01$), меньшее — количество ягод и температура обработки (сила влияния соответственно 11,5 и 12,3%, $p < 0,01$). Взаимосвязи исследуемых факторов («количества ягод × продолжительности обработки», «количества ягод × температуры обработки», «продолжительности обработки × температуры обработки» и «количества ягод × продолжительности обработки × температуры обработки») оказывали минимальное влияние на исследуемый показатель полуфабрикатов — сила влияния соответственно в среднем 2,3, 2,1, 0,8 и 0,5% ($p < 0,01$).

В результате расчета коэффициентов парной корреляции установили, что между содержанием в полуфабрикатах частиц размером более 0,8 мм, вне зависимости от состояния ягод крыжовника, и продолжительностью их обработки существует отрицательная высокая корреляционная связь ($r = -0,75$; $p < 0,01$), температурой обработки — отрицательная умеренная ($r = -0,47$; $p < 0,01$), количеством ягод — положительная слабая ($r = 0,27$; $p < 0,01$). Частные коэффициенты корреляции свидетельствуют о незначительном увеличении отрицательной связи между содержанием в полуфабрикатах частиц с размером более 0,8 мм и продолжительностью обработки (до $r = -0,90$; $p < 0,01$), усилении до высокой тесноты отрицательной связи с температурой обработки (до $r = -0,79$; $p < 0,01$), до заметной положительной — с количеством ягод (до $r = 0,59$, $p < 0,01$).

Установили, что между общей органолептической оценкой полуфабрикатов из ягод крыжовника и исследуемыми факторами существуют корреляционные связи ($p < 0,05$): с количеством ягод — отрицательная слабая для свежих и быстрозамороженных ягод соответственно $r = -0,26$ и $r = -0,30$; продолжительностью обработки — положительная умеренная для свежих ягод $r = 0,63$, высокая для быстрозамороженных $r = 0,76$; температурой обработки — положительная заметная для свежих ягод $r = 0,52$, слабая для быстрозамороженных ягод $r = 0,29$. Частные коэффициенты корреляции свидетельствуют об увеличении до высокой положительной связи между общей органолептической оценкой полуфабрикатов из свежих ягод и продолжительностью (до $r = 0,78$; $p < 0,05$) и температурой обработки (до $r = 0,72$; $p < 0,05$), отрицательной умеренной — количеством ягод (до $r = -0,46$; $p < 0,05$). Частные коэффициенты корреляции свидетельствуют об увеличении до заметной отрицательной связи между общей органолептической оценкой полуфабрикатов из быстрозамороженных ягод и их количеством (до $r = -0,51$, $p < 0,05$), положительной — температурой обработки (до $r = 0,51$; $p < 0,05$), незначительном усилении продолжительности обработки (до $r = 0,84$; $p < 0,05$).

Таблица 1. **Результаты исследований**
Table 1. **Results of the study**

Количество ягод, % (x_1)	Продолжительность обработки, мин (x_2)	Температура обработки, °С (x_3)	Массовая доля частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикате из ягод, %		Общая органолептическая оценка, балл	
			свежих (y_1)	быстрозамороженных (y_2)	свежих (y_3)	быстрозамороженных (y_4)
65	5	50	$11,1 \pm 0,2^{2,5,20,21,36}$	$10,7 \pm 0,2^{2,5,20,21,36}$	$1,05 \pm 0,05^{17,33,49}$	$1,01 \pm 0,02^{17,33,49}$
65	5	55	$10,8 \pm 0,2^{1,5,20,57}$	$10,4 \pm 0,2^{1,5,20,36,57}$	$1,26 \pm 0,03^{18,34,50}$	$1,28 \pm 0,03^{4,5,18,34,50}$
65	5	60	$9,4 \pm 0,4^{9,25,41,54,61}$	$9,0 \pm 0,4^{9,25,41,54,61}$	$2,47 \pm 0,02^{4,9,19,20,25,35,36,40,41,52,57}$	$1,95 \pm 0,04^{3,5,19–21,35–37,51–53}$
65	5	65	$8,7 \pm 0,1^{13,25,29,41,45,54,55,61}$	$8,4 \pm 0,1^{13,25,29,41,45,54,55,61}$	$2,57 \pm 0,03^{3,9,20,25,35,36,41,42,52,57–60}$	$2,04 \pm 0,05^{3,4,19–21,36–38,51–54}$
65	10	50	$10,7 \pm 0,02^{1,2,20,57}$	$10,3 \pm 0,2^{1,2,20,57}$	$2,06 \pm 0,04^{6,21,37,38,51,53,54}$	$2,03 \pm 0,05^{3,4,19–21,36–39,51–53}$
65	10	55	$5,8 \pm 0,1^{10,22–24,26,27,40,60}$	$5,6 \pm 0,1^{10,22–24,26,27,40,42,60}$	$2,17 \pm 0,03^{5,22,38,54,56}$	$2,18 \pm 0,02^{22,38,54–56}$
65	10	60	$4,5 \pm 0,1^{11,28,44,62–64}$	$4,3 \pm 0,1^{11,28,44,62–64}$	$3,30 \pm 0,04^{23,24,39,47}$	$2,49 \pm 0,04^{8,9,23–25,41,57,59,60}$
65	10	65	$3,7 \pm 0,1^{11,12,28,30,44,46}$	$3,6 \pm 0,1^{11,12,28,30,44,46}$	$3,43 \pm 0,04^{24,47}$	$2,49 \pm 0,04^{7,9,23–25,41,57,59,60}$
65	15	50	$9,6 \pm 0,3^{3,25,41,54}$	$9,2 \pm 0,3^{3,25,41,54}$	$2,48 \pm 0,04^{3,4,19,20,25,35,36,40,41,52,57}$	$2,47 \pm 0,04^{7,8,23–25,41,57}$
65	15	55	$5,2 \pm 0,1^{6,24,27,62,63}$	$5,0 \pm 0,1^{6,24,27,62,63}$	$2,88 \pm 0,05^{14,29,30,43–46,56,61,62}$	$4,57 \pm 0,08^{11,12,14–16,}$
65	15	60	$4,2 \pm 0,2^{7,8,28,30,44,46,64}$	$4,0 \pm 0,2^{7,8,28,30,44,46,64}$	$4,40 \pm 0,05^{12,14,15,27,28,31,32}$	$4,57 \pm 0,08^{10,12,14–16,}$
65	15	65	$3,4 \pm 0,2^{8,30,46}$	$3,3 \pm 0,2^{8,30,46}$	$4,48 \pm 0,04^{11,15,16,27,28,31,32}$	$4,57 \pm 0,08^{10,11,14–16,}$
65	20	50	$8,7 \pm 0,2^{4,25,29,41,45,54,55,61}$	$8,4 \pm 0,2^{4,25,29,41,45,54,56,61,}$	$2,76 \pm 0,04^{26,29,43–45,59–61,64}$	$2,73 \pm 0,05^{29,42–45,58,61,64}$
65	20	55	$1,9 \pm 0,2^{15,16,31,32,47,48}$	$1,8 \pm 0,2^{15,16,31,32,47,48}$	$2,94 \pm 0,05^{10,30,43,44,46,48,55,62}$	$4,57 \pm 0,08^{10–12,15,16}$
65	20	60	$1,6 \pm 0,1^{14,16,31,32,48}$	$1,5 \pm 0,1^{14,16,31,32,48}$	$4,41 \pm 0,03^{11,12,16,27,28,31,32}$	$4,57 \pm 0,08^{10–12,14,16}$
65	20	65	$1,7 \pm 0,1^{14,15,31,32,47,48}$	$1,6 \pm 0,1^{14,15,31,32,47,48}$	$4,42 \pm 0,04^{11,12,15,27,28,31,32}$	$4,57 \pm 0,08^{10–12,14,15}$
70	5	50	$14,0 \pm 0,2^{33,50,53}$	$13,4 \pm 0,2^{18,33,50,53}$	$1,09 \pm 0,04^{1,33,49}$	$1,06 \pm 0,02^{1,33,49}$
70	5	55	$13,3 \pm 0,2^{33,34,51,53}$	$12,8 \pm 0,2^{17,33,341}$	$1,30 \pm 0,02^{2,34,50}$	$1,32 \pm 0,03^{2,34,50}$
70	5	60	$12,5 \pm 0,1^{35,37,51,52}$	$12,0 \pm 0,1^{35,37,51,52}$	$2,45 \pm 0,02^{3,9,20,25,35,36,40,41,52,57}$	$1,92 \pm 0,03^{3–5,20,21,35–37,51–53}$
70	5	65	$11,3 \pm 0,2^{1,2,5,21,36}$	$10,8 \pm 0,2^{1,2,5,21,36}$	$2,50 \pm 0,05^{3,4,9,19,25,35,36,41,52,57}$	$2,02 \pm 0,05^{3–5,19,21,35–37,51–53}$
70	10	50	$11,6 \pm 0,2^{1,20,36,52}$	$11,1 \pm 0,2^{1,20,36,52}$	$2,05 \pm 0,03^{5,37,38,51,53,54}$	$2,01 \pm 0,05^{3–5,19,20,35–37,51–53}$
70	10	55	$6,2 \pm 0,1^{6,23,26,27,40,42,43,60}$	$6,0 \pm 0,1^{6,23,26,27,40,42,43,60}$	$2,19 \pm 0,01^{6,38,54,56}$	$2,22 \pm 0,04^{6,38–40,54–56}$
70	10	60	$6,2 \pm 0,1^{6,22,26,27,40,42,43,60}$	$6,0 \pm 0,1^{6,22,26,27,40,42,43,60}$	$3,24 \pm 0,05^{7,24,39}$	$2,39 \pm 0,06^{7–9,24,25,39–41,57}$
70	10	65	$5,5 \pm 0,1^{6,10,26,27,60,62,63}$	$5,3 \pm 0,1^{6,10,26,27,60,62,63}$	$3,36 \pm 0,05^{7,8,23,47}$	$2,39 \pm 0,06^{7–9,23,25,39–41,57}$
70	15	50	$9,1 \pm 0,3^{3,4,9,13,41,45,54,55,61}$	$8,7 \pm 0,3^{3,4,9,13,41,45,54,55,61}$	$2,53 \pm 0,05^{3,4,9,21,22,35,36,41,42,52,57,58}$	$2,50 \pm 0,06^{7–9,23,24,41,57–60}$
70	15	55	$6,0 \pm 0,1^{6,22–24,27,40,42,43,60}$	$5,8 \pm 0,1^{6,22–24,27,40,42,43,60}$	$2,74 \pm 0,04^{13,29,42–45,58–61,64}$	$3,31 \pm 0,05^{28,30,31}$
70	15	60	$5,8 \pm 0,1^{6,10,22–24,26,40,60}$	$5,6 \pm 0,1^{6,10,22–24,26,40,42,60}$	$4,50 \pm 0,09^{11,12,15,16,28,31,32,}$	$3,44 \pm 0,05^{28,30–32}$
70	15	65	$4,2 \pm 0,1^{7,8,11,30,44,46,64}$	$4,0 \pm 0,1^{7,8,11,30,44,46}$	$4,51 \pm 0,10^{11,12,15,16,27,31,32,}$	$3,40 \pm 0,03^{26,27,30–32}$
70	20	50	$8,2 \pm 0,3^{4,13,45,55}$	$7,9 \pm 0,3^{4,13,45,55}$	$2,78 \pm 0,03^{10,13,26,43–45,61,64}$	$2,75 \pm 0,07^{13,42–45,48,61,64}$
70	20	55	$3,8 \pm 0,1^{8,11,12,28,44,46}$	$3,6 \pm 0,1^{8,11,12,28,44,46}$	$2,97 \pm 0,03^{10,14,46,48,55,62}$	$3,38 \pm 0,05^{26–28,31,32}$
70	20	60	$2,2 \pm 0,1^{14–16,32,47,48}$	$2,1 \pm 0,2^{14–16,32,47,48,}$	$4,51 \pm 0,10^{11,12,15,16,27,28,32}$	$3,39 \pm 0,02^{26–28,30,32}$
70	20	65	$2,2 \pm 0,2^{14–16,31,47,48}$	$2,1 \pm 0,2^{14–16,31,47,48,}$	$4,51 \pm 0,10^{11,12,15,16,27,28,31}$	$3,44 \pm 0,03^{27,28,30,31}$
75	5	50	$13,9 \pm 0,1^{17,18,50,53}$	$13,3 \pm 0,1^{17,18,34,50,53}$	$1,09 \pm 0,05^{1,17,49}$	$1,06 \pm 0,01^{1,17,49}$
75	5	55	$13,2 \pm 0,2^{18,51,53}$	$12,7 \pm 0,2^{18,33,51,53}$	$1,33 \pm 0,02^{2,18,50}$	$1,35 \pm 0,02^{2,18,50}$
75	5	60	$12,5 \pm 0,2^{19,37,51,52}$	$12,0 \pm 0,1^{19,37,51,52}$	$2,49 \pm 0,04^{3,4,9,19,20,25,36,40,41,52,57}$	$1,90 \pm 0,04^{3,19–21,36,37,51–53}$
75	5	65	$11,5 \pm 0,1^{1,20,21,52}$	$11,0 \pm 0,1^{1,2,20,21,52}$	$2,54 \pm 0,04^{3,4,9,19,20,25,35,41,42,52,57–60}$	$1,97 \pm 0,05^{3–5,19–21,35,37,51–53}$
75	10	50	$12,5 \pm 0,2^{19,35,51,52}$	$12,0 \pm 0,2^{19,35,51,52}$	$2,01 \pm 0,05^{5,21,51,53}$	$1,96 \pm 0,05^{3–5,19–21,35,36,51–53}$
75	10	55	$7,5 \pm 0,1^{39,56,58,59}$	$7,2 \pm 0,1^{39,56,58,59}$	$2,15 \pm 0,04^{5,6,21,22,51,53,54,56}$	$2,15 \pm 0,04^{4–6,22,54–56}$
75	10	60	$7,2 \pm 0,1^{38,43,56,58,59}$	$6,9 \pm 0,1^{38,43,56,58,59}$	$3,24 \pm 0,06^{7,23}$	$2,34 \pm 0,04^{22–24,40,55,56}$
75	10	65	$6,3 \pm 0,2^{6,22,23,26,27,42,43,60}$	$6,1 \pm 0,1^{6,22,23,26,27,42,43,60}$	$2,37 \pm 0,03^{3,9,19,35,52}$	$2,34 \pm 0,04^{22–24,39,55,56}$
75	15	50	$9,0 \pm 0,2^{3,4,9,13,25,45,54,55,61}$	$8,6 \pm 0,2^{3,4,9,13,22,45,54,55,61}$	$2,50 \pm 0,03^{3,4,9,19,20,25,35,36,52,57}$	$2,47 \pm 0,06^{7–9,23–25,57}$
75	15	55	$6,5 \pm 0,1^{22,23,26,40,43,60}$	$6,2 \pm 0,1^{6,22,23,26,27,40,43,60}$	$2,63 \pm 0,03^{4,25,26,36,57–60,64}$	$2,74 \pm 0,03^{13,29,43–45,48,61,64}$
75	15	60	$6,6 \pm 0,2^{22,23,26,39,40,42,56,60}$	$6,3 \pm 0,2^{22,23,26,39,40,42,60}$	$2,83 \pm 0,05^{10,13,14,26,29,44,45,55,61,62,64}$	$2,78 \pm 0,05^{13,29,42,44,45,48,61,64}$
75	15	65	$4,1 \pm 0,2^{7,8,11,28,30,46,64}$	$3,9 \pm 0,2^{7,8,11,28,30,46,64}$	$2,84 \pm 0,04^{10,13,14,26,29,43,45,46,55,61,62}$	$2,78 \pm 0,05^{13,29,42,43,45,48,61,64}$
75	20	50	$8,5 \pm 0,1^{4,13,25,29,41,54,55,61}$	$8,2 \pm 0,1^{4,13,29,41,54,55,61}$	$2,77 \pm 0,05^{10,13,26,29,43,44,60,61,64}$	$2,76 \pm 0,05^{13,29,42–45,48,61,64}$
75	20	55	$3,8 \pm 0,2^{8,11,12,28,30,44}$	$3,6 \pm 0,2^{8,11,12,28,30,44}$	$2,96 \pm 0,05^{10,14,30,44,48,55,62}$	$3,02 \pm 0,02^{47,62,63}$
75	20	60	$2,3 \pm 0,1^{14,16,31,32,48}$	$2,2 \pm 0,1^{14,16,31,32,48}$	$3,36 \pm 0,04^{7,8,24}$	$3,13 \pm 0,04^{46,63}$
75	20	65	$2,1 \pm 0,2^{14–16,31,32,47}$	$2,0 \pm 0,2^{14–16,31,32,47}$	$3,02 \pm 0,04^{14,30,46,55,62,63}$	$2,86 \pm 0,03^{29,42–45,61,62}$
80	5	50	$15,1 \pm 0,1$	$14,5 \pm 0,1$	$1,10 \pm 0,02^{1,17,33,}$	$1,08 \pm 0,02^{1,17,33,}$
80	5	55	$14,4 \pm 0,4^{17,33}$	$13,8 \pm 0,4^{17,33}$	$1,30 \pm 0,04^{2,18,34}$	$1,32 \pm 0,05^{2,18,34}$
80	5	60	$13,1 \pm 0,4^{18,19,34,35,37,53}$	$12,6 \pm 0,4^{18,19,34,35,37,53}$	$2,03 \pm 0,04^{5,21,37,38,53}$	$1,92 \pm 0,03^{3–5,19–21,35–37,52,53}$

Окончание Таблицы 1. / End of the table Table 1

Количество ягод, % (x_1)	Продолжительность обработки, мин (x_2)	Температура обработки, °С (x_3)	Массовая доля частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикате из ягод, %		Общая органолептическая оценка, балл	
			свежих (y_1)	быстрозамороженных (y_2)	свежих (y_3)	быстрозамороженных (y_4)
80	5	65	$12,1 \pm 0,5^{19,21,35-37}$	$11,6 \pm 0,5^{19,21,35-37,}$	$2,48 \pm 0,04^{3,4,9,19,20,25,35,36,40,41,57}$	$1,99 \pm 0,06^{3-5,19-21,35-37,51,53}$
80	10	50	$13,4 \pm 0,4^{17,18,33,34,51}$	$12,9 \pm 0,3^{17,18,33,34,51}$	$2,04 \pm 0,03^{5,21,37,38,51,54}$	$1,98 \pm 0,07^{3-5,19-21,35-37,51,52}$
80	10	55	$9,1 \pm 0,2^{3,4,9,13,25,41,45,55,61}$	$8,7 \pm 0,2^{3,4,9,13,25,41,45,55,61}$	$2,16 \pm 0,04^{5,6,21,22,38,53,56}$	$2,16 \pm 0,04^{6,22,38,55,56}$
80	10	60	$8,5 \pm 0,2^{4,13,25,29,41,45,54,61}$	$8,2 \pm 0,2^{4,13,25,29,41,45,54,61}$	$2,95 \pm 0,03^{10,14,30,43,44,46,48,62}$	$2,22 \pm 0,04^{6,22,38-40,54,56}$
80	10	65	$7,2 \pm 0,1^{38,39,43,58,59}$	$6,9 \pm 0,1^{38,39,43,58,59}$	$2,24 \pm 0,04^{6,22,38,54}$	$2,22 \pm 0,04^{6,22,38-40,54,55}$
80	15	50	$10,3 \pm 0,2^{2,5}$	$9,9 \pm 0,2^{2,5}$	$2,52 \pm 0,03^{3,4,9,19,20,25,35,36,41,42,52,58}$	$2,48 \pm 0,07^{7-9,23-25,41}$
80	15	55	$7,3 \pm 0,2^{38,39,56,59}$	$7,0 \pm 0,2^{38,39,56,59}$	$2,64 \pm 0,04^{4,25,26,36,42,57,59,60,64}$	$2,61 \pm 0,05^{13,25,59,60,64}$
80	15	60	$7,3 \pm 0,1^{38,39,56,58}$	$7,0 \pm 0,1^{38,39,56,58}$	$2,65 \pm 0,02^{4,13,26,36,42,58,60,64}$	$2,60 \pm 0,01^{7,8,25,58,60,64}$
80	15	65	$6,1 \pm 0,1^{6,22-24,26,27,40,42,43}$	$5,9 \pm 0,1^{6,22-24,26,27,40,42,43}$	$2,66 \pm 0,02^{4,13,26,36,42,58,59,64}$	$2,60 \pm 0,01^{7,8,25,58,60,64}$
80	20	50	$8,9 \pm 0,2^{3,4,13,25,45,54,55}$	$8,5 \pm 0,2^{3,4,13,25,41,45,54,55}$	$2,78 \pm 0,04^{10,13,26,29,43-45,64}$	$2,78 \pm 0,04^{13,29,42-45,48,64}$
80	20	55	$5,1 \pm 0,1^{7,10,24,63,64}$	$4,9 \pm 0,1^{7,10,24,63,64}$	$2,92 \pm 0,04^{10,14,3043,44,46,48,55}$	$2,98 \pm 0,03^{46,48,63}$
80	20	60	$4,9 \pm 0,1^{7,10,24,62,64}$	$4,7 \pm 0,1^{7,10,24,62,64}$	$3,09 \pm 0,04^{48}$	$3,06 \pm 0,04^{45,47,62}$
80	20	65	$4,5 \pm 0,1^{7,11,28,44,62,63}$	$4,3 \pm 0,1^{7,11,28,44,62,63}$	$2,72 \pm 0,05^{13,26,29,42,43,45,58-61}$	$2,69 \pm 0,04^{13,29,42-45,58-61}$

Примечания: различия средних значений в столбце с разными надстрочными цифрами не существенны ($p < 0,05$).

Получены уравнения множественной регрессии, описывающие зависимость от исследуемых факторов содержания частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника:

- свежих:

$$y_1 = 18,97 + 0,18x_1 - 0,50x_2 - 0,31x_3, \quad (2)$$

- замороженных:

$$y_2 = 18,26 + 0,17x_1 - 0,48x_2 - 0,30x_3, \quad (3)$$

Анализ значимости факторов уравнений регрессии с помощью критерия Стьюдента (продолжительности и температуры обработки, количества ягод — соответственно $t_{ст} = -27,8$, $t_{ст} = -17,4$ и $t_{ст} = 10,0$) и коэффициентов регрессии (для свежего и быстрозамороженного сырья соответственно β = 18,97 и β = 18,26) методом наименьших квадратов показал их достоверность ($p < 0,01$). Проверка качества регрессионных моделей показала их адекватность: критерий Фишера для свежих и быстрозамороженных ягод соответственно $F_{3,188} = 391,42$ и $F_{3,188} = 391,44$, коэффициент корреляции $r = 0,928$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,862$, уровень значимости $p < 0,01$.

Получены уравнения множественной регрессии, описывающие зависимость от исследуемых факторов общей органолептической оценки полуфабрикатов из ягод крыжовника:

- свежих:

$$y_3 = -0,04x_1 + 0,10x_2 + 0,08x_3, \quad (4)$$

- замороженных:

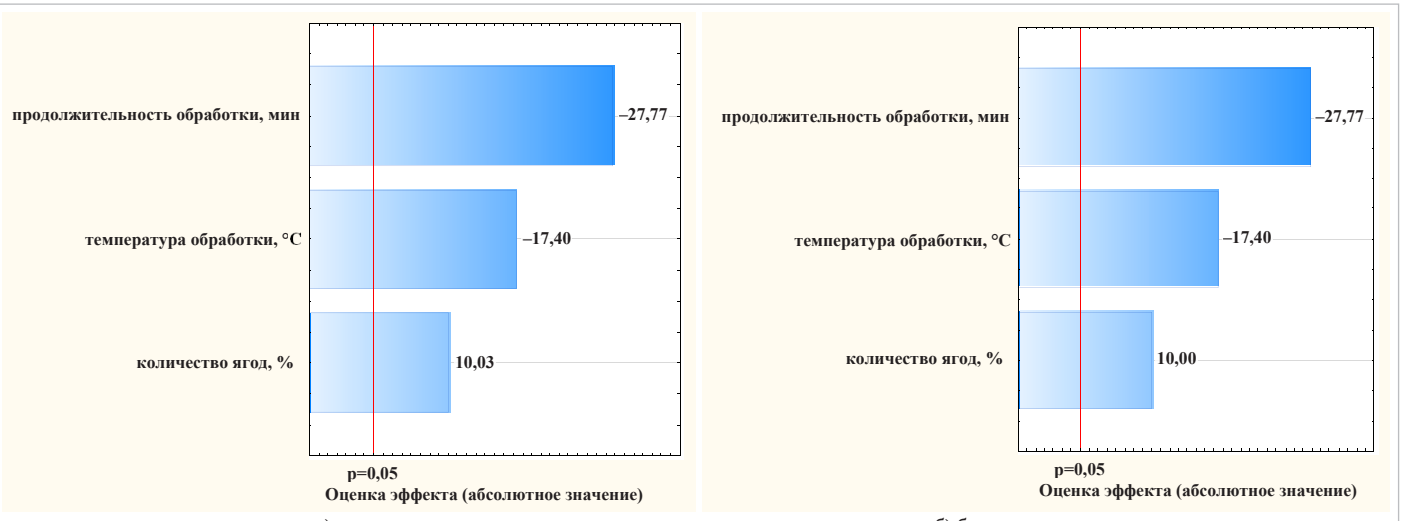
$$y_4 = 1,78 - 0,05x_1 + 0,12x_2 + 0,05x_3, \quad (5)$$

Анализ значимости факторов уравнений регрессии с помощью критерия Стьюдента (продолжительности и температуры обработки, количеством ягод — соответственно для свежего сырья $t_{ст} = 22,18$, $t_{ст} = 18,33$ и $t_{ст} = -9,24$, для быстрозамороженного сырья $t_{ст} = 27,44$, $t_{ст} = 10,52$ и $t_{ст} = -10,67$) и коэффициентов регрессии (для быстрозамороженного сырья β = 1,78) методом наименьших квадратов показал их достоверность ($p < 0,01$). Проверка качества регрессионных моделей показала их адекватность: критерий Фишера для свежих и быстрозамороженных ягод соответственно $F_{3,316} = 304,42$ и $F_{3,316} = 325,82$, коэффициент корреляции для свежих и быстрозамороженных ягод соответственно $r = 0,862$ и $r = 0,869$, коэффициент детерминации свежих и быстрозамороженных ягод соответственно $R^2 = 0,743$ и $R^2 = 0,756$, уровень значимости $p < 0,01$.

Из карт Парето (Рисунки 1 и 2) видно, что колонки количества ягод, продолжительности и температуры обработки, вне зависимости от состояния (свежие, быстрозамороженные) пересекают вертикальную линию, которая представляет 95%-ную доверительную вероятность, т. е. на количество частиц размером более 0,8 мм и общую органолептическую оценку в полуфабрикатах оказывают воздействие все три варьируемых фактора.

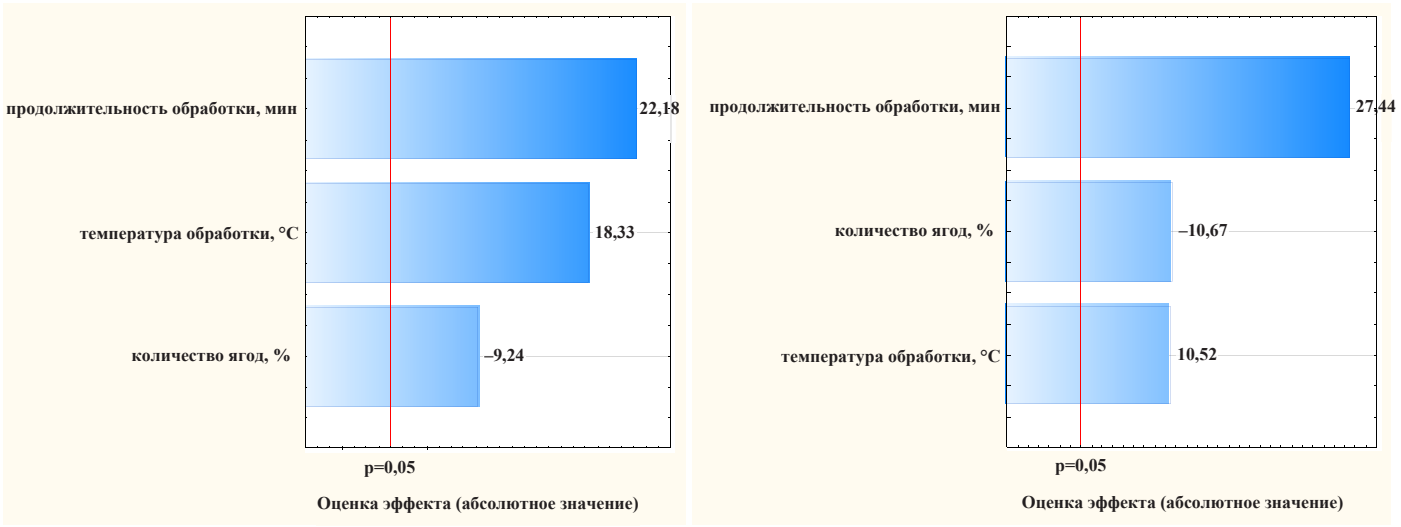
Анализ графических зависимостей (Рисунки 3–5) показал, что в полуфабрикатах из ягод крыжовника массовая доля частиц размером более 0,8 мм не превышала 7%: из свежих — при температуре обработки от 59 до 65 °С, продолжительности обработки от 13 до 20 мин, количестве ягод не более 72%; из быстрозамороженных — при температуре обработки от 55 до 65 °С, продолжительности обработки от 13 до 20 мин, количестве ягод не более 66%.

Анализ графических зависимостей показал (Рисунки 6–8), что в полуфабрикатах из ягод крыжовника общая органолептическая



а) свежих б) быстрозамороженных

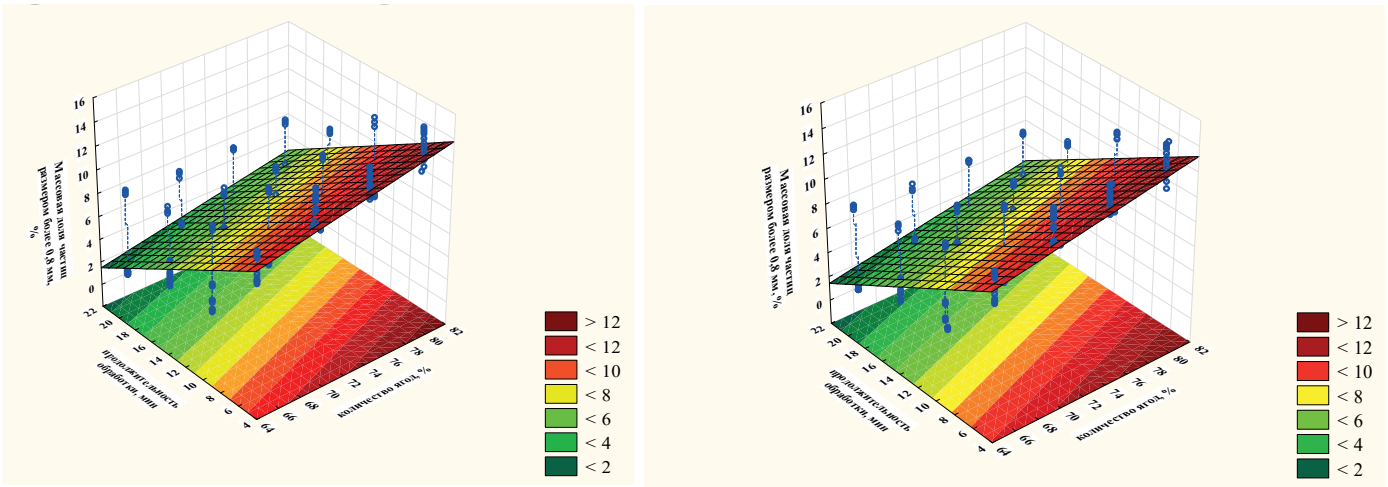
Рисунок 1. **Карта Парето массовой доли частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника**
Figure 1. **Pareto chart of the mass fraction of particles with a size of more than 0.8 mm in the semi-finished products from gooseberry fruits**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 2. **Карта Парето общей органолептической оценки полуфабрикатов из ягод крыжовника**

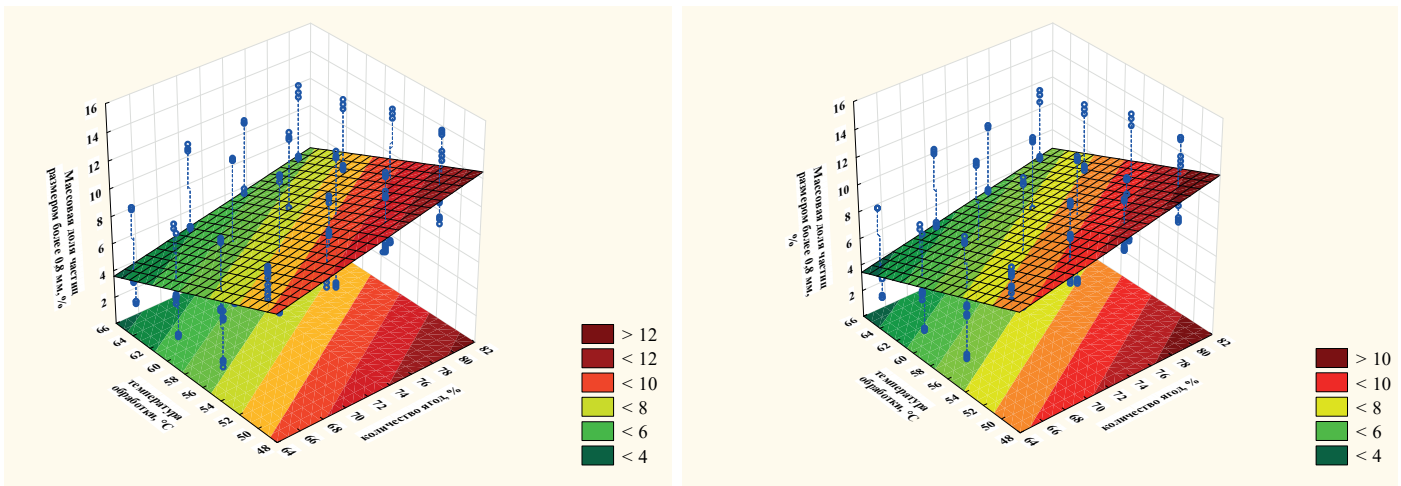
Figure 2. **Pareto chart of the general organoleptic assessment of the semi-finished products from gooseberry fruits**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 3. **Зависимость доли частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника от количества ягод и продолжительности обработки**

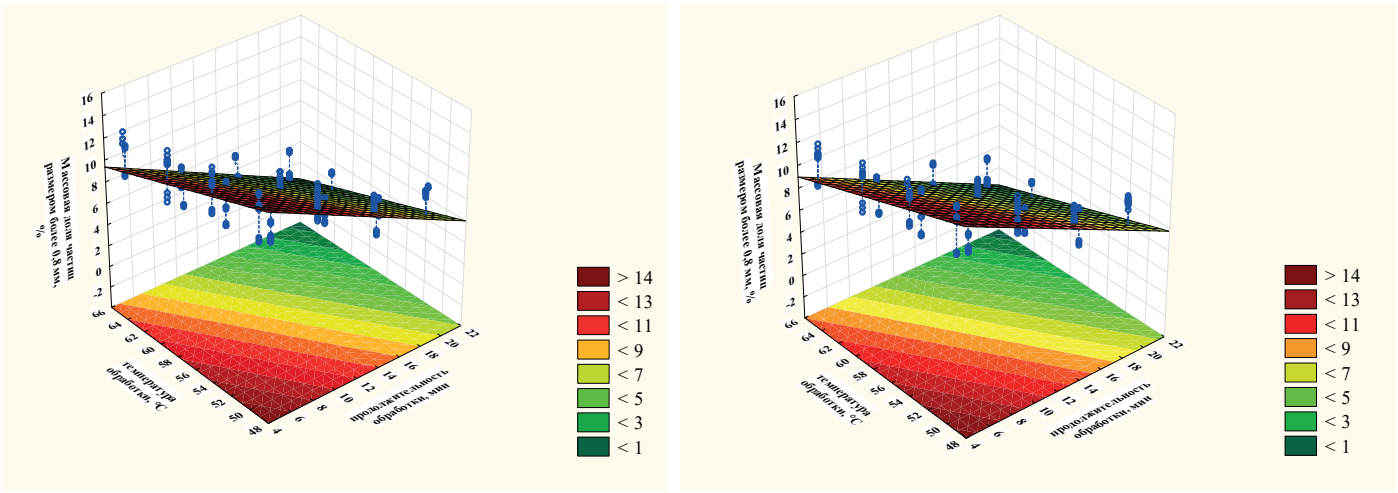
Figure 3. **Dependence of the proportion of particles with a size of more than 0.8 mm in the semi-finished products from gooseberry fruits on the quantity of berries and duration of processing**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 4. **Зависимость доли частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника от количества ягод и температуры обработки**

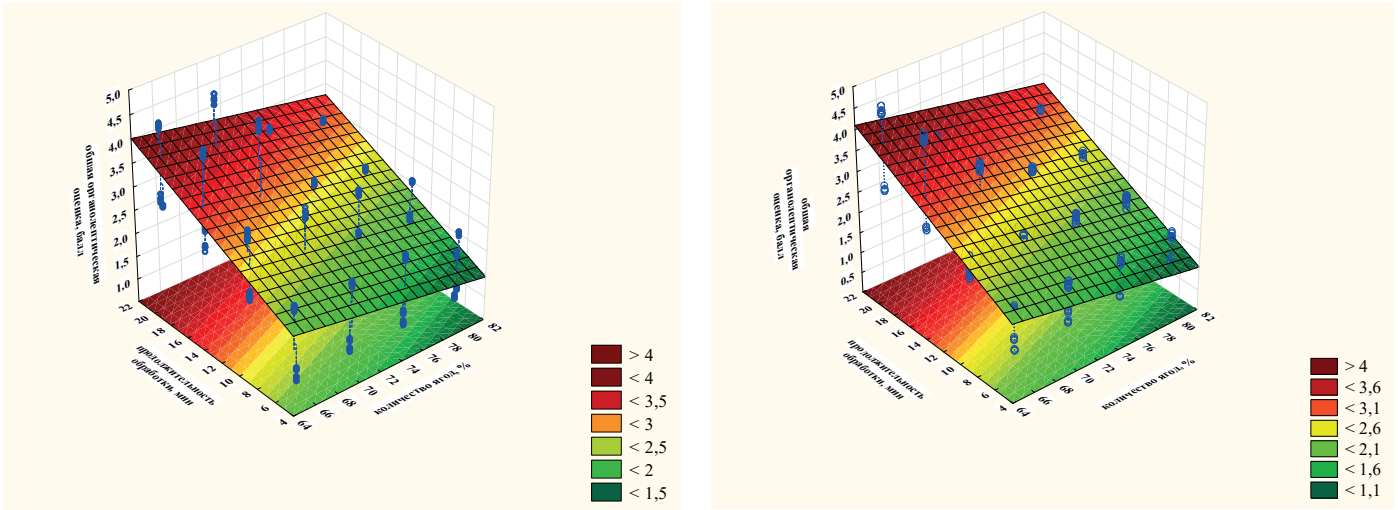
Figure 4. **Dependence of the proportion of particles with a size of more than 0.8 mm in the semi-finished products from gooseberry fruits on the quantity of berries and temperature of processing**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 5. **Зависимость доли частиц размером более 0,8 мм в полуфабрикатах из ягод крыжовника от температуры и продолжительности обработки**

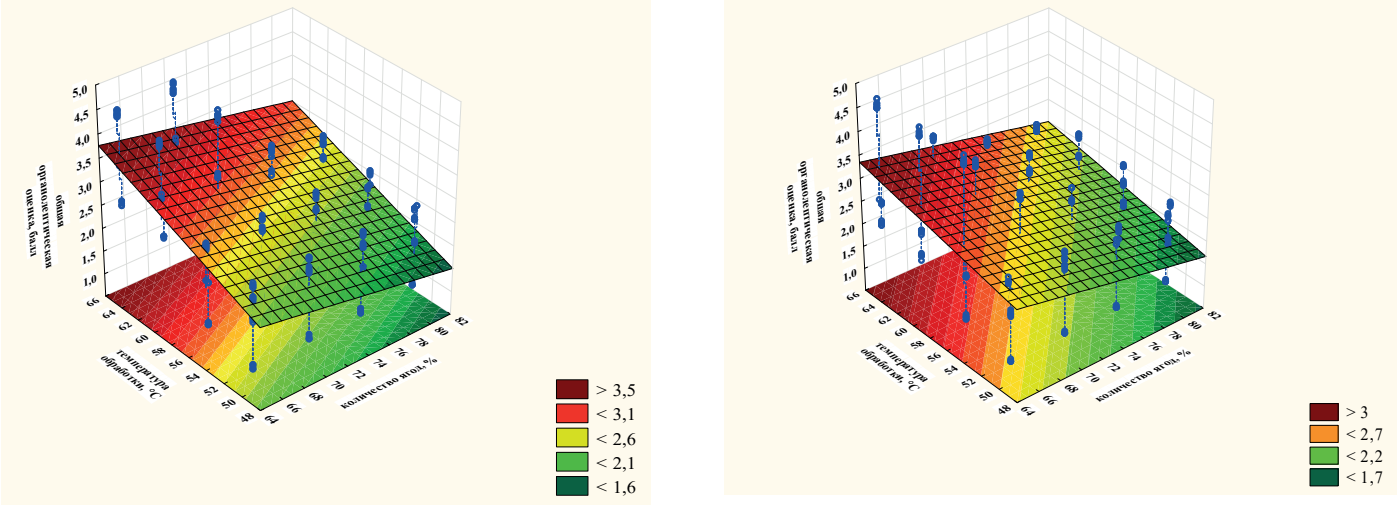
Figure 5. **Dependence of the proportion of particles with a size of more than 0.8 mm in the semi-finished products from gooseberry fruits on temperature and duration of processing**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 6. **Зависимость общей органолептической оценки полуфабрикатов от количества ягод крыжовника и продолжительности обработки**

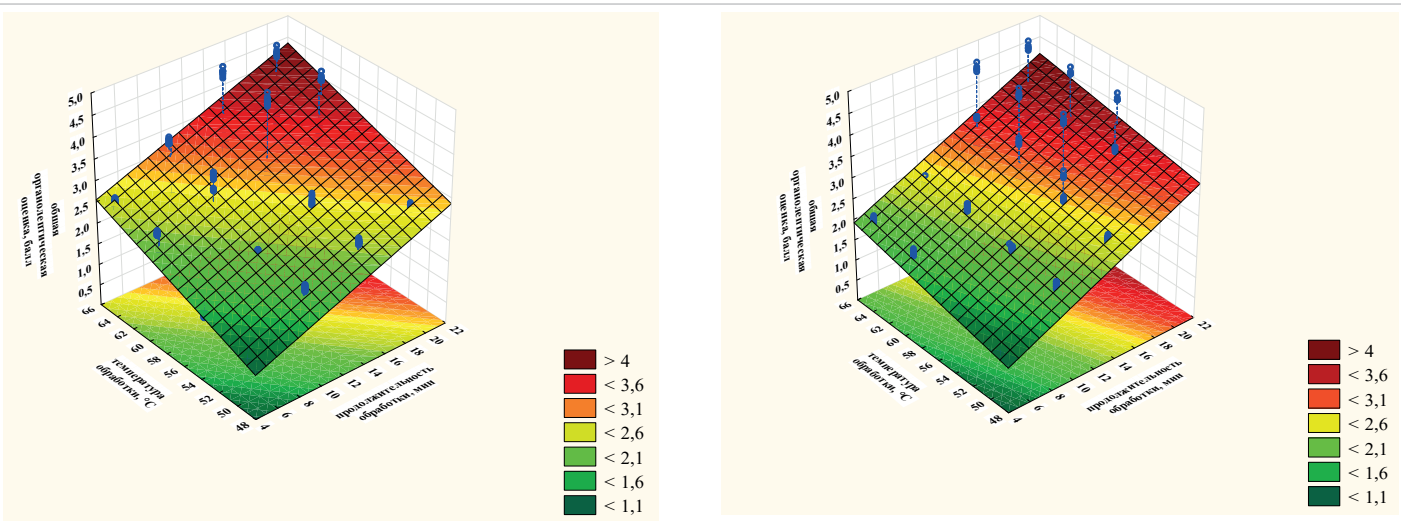
Figure 6. **Dependence of the general organoleptic assessment of the semi-finished products on the quantity of gooseberry fruits and duration of processing**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 7. **Зависимость общей органолептической оценки полуфабрикатов от количества ягод крыжовника и температуры обработки**

Figure 7. **Dependence of the general organoleptic assessment of the semi-finished products on the quantity of gooseberry fruits and temperature of processing**



а) свежих б) быстрозамороженных

Рисунок 8. **Зависимость общей органолептической оценки полуфабрикатов из ягод крыжовника от температуры и продолжительности обработки**

Figure 8. **Dependence of the general organoleptic assessment of semi-finished products from gooseberry fruits on temperature and duration of processing**

оценка не ниже 3,0 баллов: из свежих — при температуре обработки от 59 до 65 °С, продолжительности обработки от 14 до 20 мин, количестве ягод не более 71%; из быстрозамороженных — при температуре обработки от 58 до 65 °С, продолжительности обработки от 14 до 20 мин, количестве ягод не более 67%.

Далее проведены исследования по изучению влияния сорта и состояния ягод крыжовника, а также технологии изготовления на физико-химические показатели и органолептические характеристики, содержание биологически активных соединений и микроорганизмов полуфабрикатов. Технология изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника: высокотемпературная обработка; с использованием роторного аппарата — обработка смеси ягод (свежих 70%, быстрозамороженных 65%) и воды питьевой с целью получения массы, обладающей регламентируемыми текстурными характеристиками готовой продукции, в течение 15–20 мин при температуре 60–65 °С.

В Таблице 2 представлены результаты исследований физико-химических показателей полуфабрикатов из ягод крыжовника.

В результате проведенных исследований установили, что на содержание всех исследуемых веществ полуфабрикатов из ягод крыжовника основное влияние оказывал сорт — сила влияния для растворимых сухих и минеральных веществ, сахаров и титруемых кислот соответственно 98,0, 60,1, 99,5 и 98,7% ($p < 0,01$). Из данных Таблицы 2 видно, что полуфабрикаты из ягод крыжовника сорта Розовый 2 характеризовались большим содержанием, по сравнению с продукцией из сорта Сенатор, растворимых сухих и минеральных веществ, сахаров соответственно в среднем в 1,2, 1,1 и 1,6 раз, но уступали — по количеству титруемых кислот в среднем в 1,3 раза.

На содержание титруемых кислот оказывали незначительное влияние технология изготовления и взаимодействие «состояние ягод×технология изготовления» — сила влияния по 0,1% ($p < 0,05$). Количество растворимых сухих веществ в полуфабрикатах зависело не только от сорта, но и технологии изготовления и состояния сырья — сила влияния соответственно 1,4% ($p < 0,01$) и 0,5% ($p < 0,05$). Полуфабрикаты из ягод крыжовника изготовленные по технологии, предусматривающей высокотемпературную обработку, содержали большее количество растворимых сухих веществ и титруемых кислот, соответственно в среднем 1,02 и 1,01 раз, чем продукция, полученная по технологии, предусматривающей использование оборудования с роторным аппаратом.

На содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника растворимых сухих и минеральных веществ, сахаров взаимодействия исследуемых факторов оказывали случайное воздействие, также как и на содержание сахаров и минеральных веществ — воздействие технологии, тируемых кислот — взаимодействия «сорт ягод×технология изготовления», «сорт ягод×состояния ягод×технология изготовления» ($p > 0,05$).

На содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника минеральных веществ состояние ягод оказывало достаточно сильное влияние (сила влияния 36,7%, $p < 0,01$), сахаров и титруемых кислот — незначительное (сила влияния соответственно 0,5 и 1,2%, $p < 0,01$). Продукция, изготовленная из свежих ягод крыжовника, превосходила по содержанию растворимых сухих и минеральных веществ, сахаров и титруемых кислот продукцию из быстрозамороженного сырья соответственно в среднем в 1,01, 1,06, 1,03 и 1,03 раз.

В Таблице 3 представлены результаты исследований биологически активных соединений полуфабрикатов из ягод крыжовника.

Выявлено, что на содержание в полуфабрикатах пищевых волокон и аскорбиновой кислоты основное влияние оказывал сорт ягод крыжовника (сила влияния соответственно в среднем 89,6 и 89,8%, $p < 0,01$) — в продукции из ягод сорта Розовый 2 в сравнении с сортом Сенатор пищевых волокон меньше в среднем в 1,25 раз, аскорбиновой кислоты больше в 1,62 раз.

Факторы, также оказывающие влияние на содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника пищевых волокон, ранжировались следующим образом ($p < 0,01$): состояние сырья (сила влияния 6,3%) > технология изготовления (2,7%) > взаимодействие «состояние ягод×технология изготовления» (1,2%). Факторы, оказывающие основное влияние на содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника аскорбиновой кислоты ранжировались следующим образом: технология изготовления (сила влияния 6,0%, $p < 0,01$) > состояние

Таблица 2. **Физико-химические показатели полуфабрикатов из ягод крыжовника**

Table 2. **Physico-chemical indicators of semi-prepared products from gooseberry fruits**

Полуфабрикат из ягод			Массовая доля, %			
Сорта	состояния	технологии изготовления	растворимых сухих веществ	сахаров	титруемых кислот	золы
Сенатор	свежие	высокотемпературная обработка	$11,7 \pm 0,2^{e-h}$	$5,6 \pm 0,1^{e-h}$	$2,28 \pm 0,02^{d-h}$	$0,61 \pm 0,03$
	быстрозамороженные		$11,6 \pm 0,2^{e-h}$	$5,3 \pm 0,2^{e-h}$	$2,25 \pm 0,01^{e-h}$	$0,58 \pm 0,01^{eg}$
	свежие	с использованием роторного аппарата	$11,5 \pm 0,1^{e-h}$	$5,6 \pm 0,1^{e-h}$	$2,27 \pm 0,02^{d-h}$	$0,61 \pm 0,02$
	быстрозамороженные		$11,3 \pm 0,1^{e-h}$	$5,4 \pm 0,2^{e-h}$	$2,22 \pm 0,01^{ace-h}$	$0,58 \pm 0,01^{eg}$
Розовый 2	свежие	высокотемпературная обработка	$13,8 \pm 0,2^{a-d}$	$8,8 \pm 0,1^{a-d}$	$1,81 \pm 0,02^{a-dfh}$	$0,66 \pm 0,04^{bd}$
	быстрозамороженные		$13,7 \pm 0,1^{a-d}$	$8,6 \pm 0,1^{a-d}$	$1,76 \pm 0,01^{a-g}$	$0,62 \pm 0,02$
	свежие	с использованием роторного аппарата	$13,6 \pm 0,1^{a-d}$	$8,8 \pm 0,1^{a-d}$	$1,81 \pm 0,01^{a-dfh}$	$0,66 \pm 0,01^{bd}$
	быстрозамороженные		$13,4 \pm 0,1^{a-d}$	$8,6 \pm 0,2^{a-d}$	$1,74 \pm 0,02^{a-g}$	$0,62 \pm 0,03$

Примечания: разные строчные буквы в столбце обозначают существенные различия средних значений между полуфабрикатами ($p < 0,05$).

Таблица 3. **Биологически активные соединения полуфабрикатов из ягод крыжовника**
Table 3. **Biologically active compounds of the semi-finished products from gooseberry fruits**

Полуфабрикат из ягод			Массовая доля, %	
Сорта	состояния	технологии изготовления	пищевых волокон	аскорбиновой кислоты
Сенатор	свежие	высокотемпературная обработка	2,56 ± 0,02^{be-h}	13,751 ± 0,498^{be-h}
	быстрозамороженные		2,35 ± 0,02^{ac-h}	11,736 ± 0,451^{abd-h}
	свежие	с использованием роторного аппарата	2,61 ± 0,02^{be-h}	14,411 ± 0,540^{be-h}
	быстрозамороженные		2,53 ± 0,03^{be-h}	13,935 ± 0,503^{a-dg-h}
Розовый 2	свежие	высокотемпературная обработка	2,06 ± 0,03^{a-df}	21,504 ± 0,592^{a-dgf}
	быстрозамороженные		1,88 ± 0,02^{a-gh}	19,182 ± 0,252^{a-gh}
	свежие	с использованием роторного аппарата	2,07 ± 0,02^{a-df}	23,710 ± 0,479^{a-ef}
	быстрозамороженные		2,00 ± 0,01^{a-df}	22,697 ± 0,470^{a-df}

Примечания: разные строчные буквы в столбце обозначают существенные различия средних значений между полуфабрикатами ($p < 0,01$).

сырья (2,8%, $p < 0,01$) > взаимодействие «состояние ягод × технология изготовления» и «сорт ягод × состояние ягод × технология изготовления» (по 0,7%, $p < 0,01$). Установили, что в полуфабрикатах из ягод крыжовника, изготовленных из свежего сырья, содержится большее количество пищевых волокон и аскорбиновой кислоты, чем из быстрозамороженного — соответственно в среднем в 1,06 и 1,09 раза. В продукции, изготовленной по технологии, предусматривающей использование роторного аппарата, по сравнению с высокотемпературной обработкой, содержание пищевых волокон и аскорбиновой кислоты выше соответственно в среднем в 1,04 и 1,13 раза.

На содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника пищевых волокон взаимодействия «сорт ягод × технология изготовления», «сорт ягод × состояние ягод × технология изготовления» оказывали случайное воздействие, аскорбиновой кислоты — взаимодействие «сорт ягод × состояние ягод» ($p > 0,05$).

Полуфабрикаты из ягод крыжовника представляли собой по внешнему виду однородную темно-бордовую массу без частиц волокон, кожицы, плодоножек, семян и листьев, с пюреобразной, текучей консистенцией, хорошо выраженными, характерными ягодам крыжовника запахом и вкусом (сладко-кислым для ягод сорта Сенатор и кисло-сладким для ягод сорта Розовый 2), с легкими тонами и привкусами сырья, прошедшего тепловую обработку. Установили, что на формирование органолептических характеристик полуфабрикатов из ягод крыжовника оказывала влияние технология изготовления — сила ее влияния на внешний вид, цвет, текстуру, запах, вкус и послевкусие соответственно 59,3, 73,4, 79,0, 57,9 и 73,0% ($p < 0,01$). Состояние ягод оказывало влияние только на цвет полуфабрикатов, а сорт ягод на запах — сила влияния соответственно 20,1% ($p < 0,05$) и 28,4% ($p < 0,01$). Взаимодействий исследуемых факторов на органолептические характеристики продукции носили случайный характер.

Из данных Таблицы 4 видно, что оценки за органолептические показатели полуфабрикатов из свежих ягод крыжовника выше, чем из быстрозамороженных. Оценки за внешний вид, цвет, текстуру, запах, вкус и послевкусие полуфабрикатов из ягод крыжовника, изготовленных по технологии, предусматривающей использование роторного аппарата, превосходили оценки за продукцию, полученную путем высокотемпературной обработки. Оценки за запах и вкус у продукции, изготовленной из ягод сорта Розовый 2 выше, чем из сорта Сенатор, но за внешний вид, цвет и текстуру находились в пределах стандартной ошибки. Отсутствовали значимые различия между общими органолептическими оценками за полуфабрикаты ($p > 0,05$) — из свежих и быстрозамороженных ягод сорта Сенатор соответственно 4,62 и 4,57 баллов, сорта Розовый 2 соответственно 4,64 и 4,62 баллов. Наблюдаемые различия между средними значениями общих органолептических оценок исследуемых полуфабрикатов и полученными внутри выбранных интервалов варьирования факторов (Табл. 1) случайны ($p > 0,05$).

Результаты наших исследований биохимического состава и сенсорной оценки полуфабрикатов из ягод крыжовника согласуются с данными других авторов о том, что они зависят от сорта сырья, количества и параметров операций технологической обработки [24–27]. Продукция, изготовленная из замороженного сырья, содержит большее количество растворимых сухих веществ и сахаров, но меньшее титруемых кислот, минеральных веществ, пищевых волокон и аскорбиновой кислоты, обладает более лучшими органолептическими характеристиками, чем из свежего, что обусловлено физическими, биохимическими и микробиологическими изменениями сырья в процессе замораживания [28–31].

В Таблице 5 представлены результаты исследований микробиологической безопасности полуфабрикатов из ягод крыжовника.

В результате проведенных исследований установили, что основное влияние на содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и плесневых грибов оказывала технология изготовления — сила влияния соответственно 64,4 и 71,8% ($p < 0,01$). Значительное влияние на содержание исследуемых микроорганизмов оказывало состояние ягод — сила влияния для мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и плесневых грибов соответственно 22,9 и 21,4% ($p < 0,01$). На содержание в продукции мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов оказывало влияние также взаимодействия «состояние ягод × технология изготовления» и «сорт ягод × технология изготовления» (сила влияния соответственно 12,2% ($p < 0,01$) и 0,3% ($p < 0,05$), плесневых грибов — сорт и взаимодействие «состояние ягод × технология изготовления» (соответственно 2,4%, $p < 0,01$ и 3,7%, $p < 0,05$). Факторы, оказывающие основное влияние на содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника дрожжей ранжировались следующим образом: состояние сырья (сила влияния 53,9%, $p < 0,01$) > технология изготовления и сорт ягод (по 16,6%, $p < 0,01$) > взаимодействие «сорт ягод × состояние ягод» (10,7%, $p < 0,05$). Случайное воздействие оказывали на содержание в полуфабрикатах из ягод крыжовника мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов сорт сырья, взаимодействие факторов «сорт ягод × состояние ягод», «сорт ягод × состояния ягод × технология изготовления», плесневых грибов — взаимодействия «сорт ягод × технология изготовления», «сорт ягод × состояния ягод», «сорт ягод × состояния ягод × технология изготовления», дрожжей — взаимодействия «сорт ягод × технология изготовления»,

Таблица 4. **Оценка органолептических показателей полуфабрикатов из ягод крыжовника, балл**
Table 4. **Assessment of organoleptic indicators of the semi-finished products from gooseberry fruits, points**

Полуфабрикат из ягод			Внешний вид	Цвет	Текстура	Запах	Вкус
Сорта	состояния	технологии изготовления					
Сенатор	свежие	высоко-температурная обработка	4,62 ± 0,08	4,58 ± 0,08	4,52 ± 0,08	4,52 ± 0,08^{f}	4,32 ± 0,18
	быстрозамороженные		4,58 ± 0,08	4,54 ± 0,05	4,48 ± 0,08	4,48 ± 0,08^{fh}	4,26 ± 0,15^{f}
	свежие	с использованием роторного аппарата	4,68 ± 0,08	4,68 ± 0,08	4,64 ± 0,11	4,62 ± 0,08	4,46 ± 0,13
	быстрозамороженные		4,64 ± 0,11	4,62 ± 0,08	4,58 ± 0,08	4,58 ± 0,08	4,44 ± 0,11
Розовый 2	свежие	высоко-температурная обработка	4,62 ± 0,08	4,58 ± 0,08	4,52 ± 0,08	4,58 ± 0,08	4,38 ± 0,13
	быстрозамороженные		4,58 ± 0,08	4,52 ± 0,08^{f}	4,48 ± 0,08	4,56 ± 0,05	4,36 ± 0,11
	свежие	с использованием роторного аппарата	4,66 ± 0,05	4,70 ± 0,07^{g}	4,62 ± 0,08	4,70 ± 0,07^{ac}	4,54 ± 0,11^{c}
	быстрозамороженные		4,74 ± 0,11	4,64 ± 0,09	4,58 ± 0,08	4,64 ± 0,05^{c}	4,50 ± 0,10

Примечания: разные строчные буквы в столбце обозначают существенные различия средних значений между полуфабрикатами ($p < 0,05$).

Таблица 5. **Микробиологические показатели полуфабрикатов из ягод крыжовника**
Table 5. **Microbiological indicators of the semi-finished products from gooseberry fruits**

Полуфабрикат из ягод			Среднее количество колоний, КОЕ/г		
Сорта	состояния	технологии изготовления	мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов	плесневых грибов	дрожжей
Сенатор	свежие	высокотемпературная обработка	$(31,36 \pm 2,34) \times 10^{2b\text{-}dg\text{-}h}$	$(8,64 \pm 1,22) \times 10^{b\text{-}dg\text{-}h}$	$(5,91 \pm 1,02) \times 10^{bdgh}$
	быстрозамороженные		$(12,27 \pm 1,46) \times 10^{abd\text{-}gh}$	$(4,55 \pm 0,89) \times 10^{abeh}$	$(2,73 \pm 0,69) \times 10^{a}$
	свежие	с использованием роторного аппарата	$(4,09 \pm 0,85) \times 10^{abef}$	$(2,73 \pm 0,69) \times 10^{aef}$	$(4,55 \pm 0,89) \times 10^{dh}$
	быстрозамороженные		$(1,82 \pm 0,56) \times 10^{abe\text{-}f}$	$(0,91 \pm 0,40) \times 10^{abef}$	$(1,82 \pm 0,56) \times 10^{ab}$
Розовый 2	свежие	высокотемпературная обработка	$(28,18 \pm 2,21) \times 10^{2b\text{-}dg\text{-}h}$	$(9,55 \pm 1,29) \times 10^{b\text{-}dg\text{-}h}$	$(3,63 \pm 0,80) \times 10$
	быстрозамороженные		$(10,91 \pm 1,38) \times 10^{acd\text{-}gh}$	$(5,91 \pm 1,02) \times 10^{acd\text{-}gh}$	$(2,73 \pm 0,69) \times 10^{a}$
	свежие	с использованием роторного аппарата	$(5,46 \pm 0,98) \times 10^{abdef}$	$(3,18 \pm 0,75) \times 10^{aef}$	$(2,73 \pm 0,69) \times 10^{a}$
	быстрозамороженные		$(2,27 \pm 0,63) \times 10^{abef}$	$(1,82 \pm 0,56) \times 10^{abef}$	$(1,36 \pm 0,49) \times 10^{ab}$

Примечания: разные строчные буквы в столбце обозначают существенные различия средних значений между полуфабрикатами ($p < 0,05$).

«состояния ягод × технология изготовления», «сорт ягод × состояния ягод × технология изготовления» ($p > 0,05$).

Установили, что в полуфабрикатах, изготовленных из ягод сорта Сенатор, содержалось большее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, дрожжей, чем из сорта Розовый 2 (соответственно в 1,03 и 1,44 раза), и меньшее — плесневых грибов (в 1,22 раза). В продукции, изготовленной по технологии, предусматривающей использование оборудования с роторным аппаратом, содержалось меньшее количество исследуемых микроорганизмов, чем при высокотемпературной обработке — мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, плесневых грибов и дрожжей соответственно в 5,96, 3,32 и 1,44 раза. Количество колоний мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, плесневых грибов и дрожжей в 2,48, 1,83 и 1,95 раз меньше в продукции, изготовленной из быстрозамороженного сырья, а не свежего.

В полуфабрикатах из ягод крыжовника, вне зависимости от сорта и состояния сырья, технологии изготовления, отсутствовали неспорообразующие микроорганизмы (бактерии группы кишечных палочек, рода *Salmonella*) из-за своей невысокой термоустойчивости.

Следовательно, полуфабрикаты из ягод крыжовника, вне зависимости от сорта и состояния сырья, технологии изготовления, являлись микробиологически безопасными, поскольку в них присутствовали санитарно-показательные (мезофильно-аэробные и факультативно-анаэробные микроорганизмы, бактерии группы кишечной палочки), патогенные (бактерии р. *Salmonella),* а также микроорганизмы «порчи» (плесневые грибы и дрожжи) в количестве, не превышающем допустимые уровни (Табл. 1.5 Приложения 2 ТР ТС 021/2011[12]).

Результаты наших исследований согласуются с данными других авторов в том, что микробиологическая стабильность продуктов переработки плодов зависит от используемых сорта сырья и процессов его последующей обработки [27,32–34].

4. Заключение

Актуальным способом переработки плодового сырья, в том числе ягод крыжовника, является изготовление полуфабрикатов, которые представляют ценный компонент при производстве разнообразных продуктов питания.

Установили, что наибольшее влияние в полуфабрикатах из ягод крыжовника на формирование частиц размером более 0,8 мм оказывала продолжительность обработки, на общую органолептическую оценку из свежего сырья — продолжительность и температура обработки, а из быстрозамороженного сырья — только продолжительность обработки. Определили оптимальные технологические условия изготовления полуфабрикатов из ягод крыжовника, при условии использования оборудования с роторным аппаратом, для достижения требуемых характеристик качества, продолжительность обработки, мин / температура обработки, °С / количество ягод, %: из свежего сырья — 14–20 / 59–65 / не более 72; из быстрозамороженного — 14–20 / 58–65 / не более 66.

Сорт ягод крыжовника оказывал наибольшее влияние на формирование физико-химических показателей полуфабрикатов из ягод крыжовника, технология изготовления — на содержание мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов и плесневых грибов, формирование органолептических показателей, состояние сырья — на содержание дрожжей. Большим содержанием растворимых сухих и минеральных веществ, сахаров и аскорбиновой кислоты характеризовалась продукция, изготовленная из ягод крыжовника сорта Розовый 2, титруемых кислот и пищевых волокон — Сенатор. Продукция, изготовленная по технологии, предусматривающей использование оборудования с роторным аппаратом, характеризовалась наилучшими органолептическими характеристиками (внешним видом, цветом, текстурой, запахом, вкусом и послевкусием) и микробиологической безопасностью (по содержанию мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, плесневых грибов, дрожжей) по сравнению с высокотемпературной обработкой. Полуфабрикаты, изготовленные из свежего сырья, характеризовались большим содержанием дрожжей, чем из быстрозамороженного.

Таким образом, ягоды крыжовника сортов Сенатор и Розовый 2 в свежем или быстрозамороженном состоянии перспективно использовать при изготовлении полуфабрикатов по технологии, предусматривающей использование оборудования с роторным аппаратом. Продолжение исследований целесообразно в направлении разработки продукции из полученных полуфабрикатов, в том числе продуктов функционального и специализированного назначения.

[12]Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011) (с изменениями на 25 ноября 2022 года). Утвержден решением комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 880.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Филимонова, Е.Ю., Зайцева Я. Н. (2013). Технологические особенности производства соков с мякотью, пюреобразных и пастообразных продуктов из облепихи. *Ползуновский вестник*, 4–4, 117–120. [Filimonova, E. Yu., Zaytseva Ya. N. (2013). Technological features of production of juice whith pulp, pureelike and pasty production. *Polzunovskiy Vestnik*, 4–4, 117–120. (In Russian)]
2. Сенкевич, В.И. (2021). Научные основы режимов финишной стерилизации жидких консервируемых пищевых систем. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*, 2, 53–67. [Senkevich, V.I. (2021). Scientific basis for terminal sterilization of liquid canned food systems. *Processes and Food Production Equipment*, 2, 53–67. (In Russian)] https://doi.org/10.17586/2310-1164-2021-14-2-53-67
3. Промтов, М.А., Степанов, А.Ю., Алешин, А.В. (2015). Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2015. [Promtov, M.A., Stepanov, A. Yu., Aleshin, A.V. (2015). Methods for calculating the characteristics of a rotary pulse apparatus. Tambov: Tambov State Technical University. 2015. (In Russian)]
4. Arya, S.S., More, P.R., Ladole, M.R., Pegu, K., Pandit, A.B. (2023). Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, Article 106504. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106504
5. Chen, Y., Martynenko, A. (2016). Effect of hydrothermodynamic (HTD) processing on physical and chemical qualities of American cranberry puree using response surface methodology (RSM). *LWT*, 70, 322–332. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.054
6. Nachal, N., Pegu, K., Arya, S.S. (2023). Enhancement of physicochemical stability and reduction in enzyme and microbial activity of apple juice by hydrodynamic cavitation processing. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100797. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100797
7. Иванец, Г.Е., Светкина, Е.А., Потапов, А.Н. (2012). Использование растительного сырья при производстве аэрированных продуктов на молочной основе. *Техника и технология пищевых производств*, 2(25), 42А-49. [Ivanets, G.E., Svetkina, E.A., Potapov, A.N. (2012). Use of plant raw materials in the production of aerated milk-based products. *Food Processing: Techniques and Technology,* 2(25), 42A-49. (In Russian)]

8. Mykhailov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Liashenko, B., Dudnyk, S. (2021). Method for producing fruit paste using innovative equipment. *Acta Innovations*, 39, 15–21. https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.39.2
9. Голуб, О.В., Чекрыга, Г.П., Мотовилов, О.К., Щербинин, В.В. (2022). Сравнительная оценка качества пюре из плодов шиповника, выработанного разными технологическими способами. *Техника и технология пищевых производств*, 52(2), 310–320. [Golub, O.V., Chekryga, G.P., Motovilov, O.K., Shcherbinin, V.V. (2022). Comparative quality assessment of rose hip puree produced by different technological methods. *Food Processing: Techniques and Technology,* 52(2), 310–320. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2365
10. Мазалевский, В.Б., Голуб, О.В., Чекрыга, Г.П., Бородай, Е.В., Мотовилов, О.К. (2022). Изучение качества полуфабриката из ядер семян *Pinus sibirica*. *Техника и технология пищевых производств*, 52(4), 665–674. [Mazalevsky, V.B., Golub, O.V., Chekryga, G.P., Borodai, E.V., Motovilov, O.K. (2022). Quality analysis of semi-finished product from Pinus Sibirica kernels. *Food Processing: Techniques and Technology,* 52(4), 665–674. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2396
11. Кольтюгина, О.В. (2016). Получение молочных продуктов с использованием продуктов переработки плодов облепихи. *Ползуновский вестник*, 1, 24–28. [Koltyugina, O.V. (2016). Production of dairy products using processed sea buckthorn fruit products. *Polzunovskiy Vestnik*,, 1, 24–28. (In Russian)]
12. Попова, Е.И., Хромов, Н.В., Родюков, Е.Ю., Лисова, Е.Н. (2023). Хозяйственно-биологическая оценка плодов крыжовника ЦЧР. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*, 2(73), 38–41. [Popova, E.I., Khromov, N.V., Rodyukov, E. Yu., Lisova, E.N. (2023). Economic and biological assessment of gooseberry fruits in the CCHR. *The Bulletin of Michurinsky State Agrarian University,* 2(73), 38–41. (In Russian)]
13. Титова, Ю.Г., Курашев, О.В. (2022). Качественный анализ российских сортов крыжовника, включенных в Госреестр селекционных достижений. *Современное садоводство*, 3, 24–37. [Titova, Yu.G., Kurashev, O.V. (2022). Qualitative analysis of Russian gooseberry cultivars included in the State Register of Breeding Achievements. *Contemporary Horticulture*, 3, 24–37. (In Russian)] https://doi.org/10.52415/23126701_2022_0303
14. Pluta, S. (2018). Gooseberry — *Ribes uva-crispa*, sin. *R. grossularia* L. — exotic fruits. Academic Press, 2018. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00027-7
15. Акимов, М.Ю., Бессонов, В.В., Коденцова, В.М., Эллер, К.И., Вржесинская, О.А., Бекетова, Н.А. и др. (2020). Биологическая ценность плодов и ягод Российского производства. *Вопросы питания*, 89(4), 220–232. [Akimov, M. Yu., Bessonov, V.V., Kodentsova, V.M., Eller, K.I., Vrzhesinskaya, O.A., Beketova, N.A. et al (2020). Biological value of fruits and berries of Russian production. *Problems of Nutrition*, 89(4), 220–232. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10055
16. Тиунов, В.М., Вяткин, А.В. (2022). Исследование антиоксидантных показателей плодово-ягодного сырья, произрастающих в Свердловской области. *Современная наука и инновации*, 2(38), 124–129. [Tiunov, V.M., Vyatkin, A.V. (2022). Study of antioxidant indicators of fruit and berry raw materials growing in the Sverdlovsk region. *Modern Science and Innovation*, 2(38), 124–129. (In Russian)] https://doi.org/10.37493/2307-910X.2022.2.13
17. Жбанова, Е.В., Жидехина, Т.В., Акимов, М.Ю., Родюкова, О.С., Хромов, Н.В., Гурьева, И.В. (2021). Плоды сортов ягодных и нетрадиционных садовых культур, выращенных в Черноземье, — ценные источники незаменимых микронутриентов. *Пищевая промышленность*, 3, 8–11. [Zhbanova, E.V., Zhidekhina, T.V., Akimov, M. Yu., Rodyukova, O.S., Khromov, N.V., Guryeva, I.V. (2021). The fruits varieties of berry-like and nontraditional horticultural crops grown in Black Soil Zone are the valuable sources of indispensable micronutrients. *Food Industry,* 3, 8–11. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0020
18. Erbil, N., Murathan, Z.T., Arslan, M., İlçim, A. (2021). Comparison of some biochemical content and biological activities of gooseberry (Ribes uva-crispa L.) and alpine currant (*Ribes alpinum* L.). *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(2), 197–203. https://doi.org/10.25308/aduziraat.907968 (In Turkish)
19. Georgescu, C., Frum, A., Virchea, L.-I., Sumacheva, A., Shamtsyan, M., Gligor, F.-G. et al. (2022). Geographic variability of berry phytochemicals with antioxidant and antimicrobial properties. *Molecules,* 27(15), Article 4986. https://doi.org/10.3390/molecules27154986
20. Долматова, О.И. (2021). Изучение реологических свойств структурированного молокосодержащего продукта. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 83(3–89), 168–173. [Dolmatova, O.I. (2021). Study of the rheological properties of a structured milk-containing product. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(3–89), 168–173. (In Russian)]
21. Маслов, А.В., Мингалеева, З.Ш., Ямашев, Т.А., Старовойтова, О.В. (2023). Влияние комплексной добавки на цветовые характеристики пшеничного и ржано-пшеничного хлеба. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 4(393), 45–51. [Maslov, A.V., Mingaleeva, Z. Sh., Yamashev, T.A., Starovoitova, O.V. (2023). Effect of the complex additive on the color of wheat and rye-wheat bread. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 4(393), 45–51. (In Russian)] https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.4.8
22. Gruiescu, R.D., Moigradean, D., Dumbrava, D., Moldovan, C., Rivi, A., Poiana, M.-A. (2022). Insights on the use of gooseberries to develop food products with high bioactive properties. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies,* 28(4), 299–304.
23. Мазалевский, В.Б., Мотовилов, О.К. (2020). Исследование микроструктуры полуфабриката из семян амаранта. *Пищевая промышленность*, 3, 47–50. [Mazalevsky, V.B., Motovilov, O.K. (2020). The study of the microstructure of the half-prepared product from amaranth seeds. *Food Industry*, 3, 47–50. (In Russian)]
24. Ağçam, E., Akyıldız, A. (2014). A study on the quality criteria of some mandarin varieties and their suitability for juice processing. *Journal of Food Processing*, 2014(1), Article 982721. https://doi.org/10.1155/2014/982721
25. Ferreira, R.M., Amaral, R.A., Silva, A.M.S., Cardoso, S.M., Saraiva, J.A. (2022). Effect of high-pressure and thermal pasteurization on microbial and physicochemical properties of *Opuntia ficus-indica* juices. *Beverages,* 8(4), Article 84. https://doi.org/10.3390/beverages8040084
26. Mateescu, A.M., Mureşan, A.E., Puşcaş, A., Mureşan, V., Sestras, R.E., Muste, S. (2022). Baby food purees obtained from ten different apple cultivars and vegetable mixtures: Product development and quality control. *Applied Sciences*, 12(23), Article 12462. https://doi.org/10.3390/app122312462
27. Niu, H., Yuan, L., Zhou, H., Yun, Y., Li, J., Tian, J. et al. (2022). Comparison of the effects of high pressure processing, pasteurization and high temperature short time on the physicochemical attributes, nutritional quality, aroma profile and sensory characteristics of passion fruit purée. *Foods,* 11(5), Article 632. https://doi.org/10.3390/foods11050632
28. Гишева, С.А., Арутюнова, Г.Ю., Сиюхова, Б.Б., Удычак, М.М., Схаляхов, А.А. (2024). Особенности биохимического состава соков, изготовленных из замороженного плодового сырья. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 1, 79–84. [Gisheva, S.A., Arutyunova, G.Y., Siyukhova, B.B., Udychak, M.M., Shalyakhov, A.A. (2024). Features of the biochemical composition of juices made from frozen fruit raw materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex — Healthy Food Products*, 1, 79–84. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2311-6447-2024-1-79-84
29. Егорова, О.С., Акбулатова, Д.Р., Каухчешвили, Н.Э., Грызунов, А.А. (2021). Особенности биохимического состава соков и вин, произведенных из замороженного сырья. *Пиво и напитки*, 1, 36–41. [Egorova, O.S., Akbulatova, D.R., Kaukhcheschvili, N.E., Gryzunov, A.A. (2021). Juices and wines biochemical composition features made from frozen fruit raw materials. *Beer and Beverages*, 1, 36–41. (In Russian)] https://doi.org/10.24412/2072-9650-2021-1-0007
30. Nadulski, R., Grochowicz, J., Sobczak, P., Kobus, Z., Panasiewicz, M., Zawiślak, K. et al. (2015). Application of freezing and thawing to carrot (*Daucus carota* L.) juice extraction. *Food and Bioprocess Technology,* 8, 218–227. https://doi.org/10.1007/s11947-014-1395-6
31. Nthabiseng, L.K., Adeyanju, A.A., Bamidele, O.P. (2023). Effects of frozen of marula fruits (*Sclerocarya birrea*) on chemical, antioxidant activities, and sensory properties of marula fruit juice. *Heliyon*, 9(10), Article e20452. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20452
32. Гусейнова, Б.М., Асабутаев, И.Х., Даудова, Т.И. (2021). Влияние режимов замораживания, сроков хранения и способов дефростации на микробиологические показатели качества абрикосов. *Техника и технология пищевых производств*, 51(1), 29–38. [Guseynova, B.M., Asabutaev, I.H., Daudova, T.I. (2021). Effect of freezing modes, storage time, and defrosting methods on microbiological quality parameters of apricots. *Food Processing: Techniques and Technology,* 51(1), 29–38. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-29-38
33. Keller, S.E., Chirtel, S.J., Merker, R.I., Taylor, K.T., Tan, H.L., Miller, A.J. (2004). Influence of fruit variety, harvest technique, quality sorting, and storage on the native microflora of unpasteurized apple cider. *Journal of Food Protection*, 67(10), 2240–2247. https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.10.2240
34. Orqueda, M.E., Torres, S., Verón, H., Pérez, J., Rodriguez, F., Zampini, C. et al. (2021). Physicochemical, microbiological, functional and sensory properties of frozen pulp of orange and orange-red chilto (*Solanum betaceum Cav.*) fruits. *Scientia Horticulturae,* 276, Article 109736. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109736

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Голуб Ольга Валентиновна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р. п. Краснообск Тел.: +7–909–529–30–11 E-mail: golubov@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2561-9953 * автор для контактов	**Olga V. Golub**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Department of Food Systems and Biotechnologies, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russia Tel.: +7–909–529–30–11 E-mail: golubov@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2561-9953 * corresponding author
Мотовилов Олег Константинович — доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р. п. Краснообск Тел.: +7–913–474–32–29 E-mail: motovilovok@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2298-3549	**Oleg K. Motovilov**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Chief Researcher, Department of Food Systems and Biotechnologies, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russia Tel.: +7–913–474–32–29 E-mail: motovilovok@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2298-3549
Мотовилова Наталья Владимировна — аспирант, младший научный сотрудник, отдел пищевых систем и биотехнологий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук 630501, Новосибирская обл., р. п. Краснообск Тел.: +7–913–474–55–26 E-mail: motovilovanv@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2249-7666	**Natalya V. Motovilova**, Graduate Student, Junior Researcher, Department of Food Systems and Biotechnologies, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences Krasnoobsk, Novosibirsk region, 630501, Russia Tel.: +7–913–474–55–26 E-mail: motovilovanv@sfsca.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2249-7666
Давыденко Наталия Ивановна — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и организации общественного питания, Кемеровский государственный университет 650000, Кемерово, ул. Красная, 6 Тел.: +7–905–965–81–22 E-mail: nat1861@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2479-8750	**Nataliia I. Davydenko**, Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of Technology and Organization of Public Catering Department, Kemerovo State University 6, Krasnaya str., Kemerovo, 650000, Russia Tel.: +7–905–965–81–22 E-mail: nat1861@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2479-8750
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472

Поступила 05.04.2024
Поступила после рецензирования 18.09.2024
Принята в печать 27.09.2024
© Семенова Е. С., Симоненко Е. С., Симоненко С. В., Зорин С. Н., Мазо В. К., 2024

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

ГИДРОЛИЗАТЫ БЕЛКОВ КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА. ИММУНОХИМИЧЕСКАЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Е. С. Семенова[1]*, Е. С. Симоненко[1], С. В. Симоненко[1], С. Н. Зорин[2], В. К. Мазо[2]

[1] Научно-исследовательский институт детского питания — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Истра, Московская область, Россия

[2] Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
молочный белок, кобылье молоко, ферментный препарат, гидролиз, антигенность, молекулярно-массовое распределение

АННОТАЦИЯ

В последние годы внимание специалистов привлекает значительный рост аллергических заболеваний, особенно среди детей. Наиболее действенной мерой снижения аллергенности белков молока считается ферментативный гидролиз при участии пептидаз. Изучение особенностей протеолиза белков различными ферментами, направленное на установление оптимальных параметров процесса, является предметом исследований при получении гидролизатов с заданными свойствами: определенным пептидным и аминокислотным профилем, сниженными антигенными свойствами. При этом, для корректной доклинической оценки безопасности и потенциальной эффективности специализированных пищевых продуктов недостаточно только определение молекулярно-массового распределения пептидных фракций в составе. Необходимым дополнительным и информативным показателем снижения потенциальной аллергенности гидролизата является степень сохранности антигенных свойств исходного белка (остаточная антигенность), определяемая иммунохимическими методами. Получение и последующая комплексная оценка ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока представляет значительный интерес, поскольку, по результатам клинических исследований, было высказано мнение о том, что кобылье молоко при аллергии к белкам коровьего молока можно считать гипоаллергенным. Целью данной работы было получение ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока с использованием отечественных ферментов и их дальнейшая физико-химическая и иммунохимическая характеристика. Объектом исследования в качестве белкового субстрата служил белок кобыльего молока, полученный из сухого обезжиренного кобыльего молока. В работе были использованы два образца ферментов различных производителей Российской Федерации. Результаты проведенных исследований показали, что пептидные профили гидролизатов сильно различаются в зависимости от использовавшегося фермента, однако, кратность снижения антигенности практически не зависит от природы фермента, и не зависит от увеличения фермент/субстратного соотношения. На пептидный профиль и кратность снижения антигенности гидролизатов белков кобыльего молока оказывает влияние ультрафильтрационная обработка полученных гидролизатов, которая позволяет на несколько порядков снизить содержание антигенных структур в конечной продукте.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена на базе НИИ детского питания — филиале ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» в рамках обеспечения условий выполнения работ гранта в форме субсидии на: обеспечение проведения российскими научными организациями и (или) Образовательными организациями высшего образования совместно с иностранными организациями научных исследований в рамках обеспечения реализации программы двух- и многостороннего научно-технологического взаимодействия, по соглашению между ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» и Минобрнауки России от 02 октября 2022 года № 075-15-2022-1211 по теме: «Разработка технологии получения специализированных молочных продуктов с пониженной аллергенностью для детского питания на основе гидролизатов молочных белков».

Received 05.04.2024
Accepted in revised 18.09.2024
Accepted for publication 27.09.2024
© Semenova E. S., Simonenko E. S., Simonenko S. V., Zorin S. N., Mazo V. K., 2024

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

HYDROLYSATES OF MARE'S MILK PROTEINS. IMMUNOCHEMICAL AND PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS

Elena S. Semenova[1]*, Elena S. Simonenko[1], Sergei V. Simonenko[1], Sergei N. Zorin[2], Vladimir K. Mazo[2]

[1] Scientific Research Institute of Baby Food — a branch Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Istra, Moscow region, Russia

[2] Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

KEY WORDS:
milk protein, mare's milk, enzyme preparation, hydrolysis, antigenicity, molecular weight distribution

ABSTRACT

In recent years, the attention of specialists has been attracted by a significant increase in allergic diseases, especially among children. Enzymatic hydrolysis with the participation of peptidases is considered the most effective measure to reduce the allergenicity of milk proteins. The study of the features of protein proteolysis by various enzymes, aimed at establishing optimal process parameters, is the subject of research in the production of hydrolysates with specified properties: a certain peptide and amino acid profile, reduced antigenic properties. At the same time, for a correct preclinical assessment of the safety and potential effectiveness of specialized food products, it is not enough only to determine the molecular weight distribution of peptide fractions in the composition. A necessary additional and informative indicator of reducing the potential allergenicity of the hydrolysate is the degree of preservation of the antigenic properties of the initial protein (residual antigenicity), determined by immunochemical methods. The preparation and subsequent comprehensive assessment of enzymatic hydrolysates of mare's milk proteins is of considerable interest, since, according to the results of clinical studies, it was suggested that upon allergy to cow's milk proteins mare's milk can be considered hypoallergenic. The purpose of this work was to obtain enzymatic hydrolysates of mare's milk proteins using domestic enzymes and their further physico-chemical and

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Семенова, Е. С., Симоненко, Е. С., Симоненко, С. В., Зорин, С. Н., Мазо, В. К.** (2024). Гидролизаты белков кобыльего молока. Иммунохимическая и физико-химическая характеристика. *Пищевые системы*, 7(3), 466–472. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472

FOR CITATION: **Semenova, E. S., Simonenko, E. S., Simonenko, S. V., Zorin, S. N., Mazo, V. K.** (2024). Hydrolysates of mare's milk proteins. Immunochemical and physico-chemical characteristics. *Food Systems*, 7(3), 466–472. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472

immunochemical characteristics. The object of the study was mare's milk protein obtained from skimmed mare's milk powder as a protein substrate. Two samples of enzymes from various manufacturers of the Russian Federation were used in the work. The results of the conducted studies show that the peptide profiles of hydrolysates vary greatly depending on the enzyme used, however, the multiplicity of antigenicity reduction practically does not depend on the nature of the enzyme, and does not depend on an increase in the enzyme/substrate ratio. The peptide profile and the multiplicity of reducing the antigenicity of hydrolysates of mare's milk proteins are influenced by ultrafiltration treatment of the obtained hydrolysates, which allows reducing the content of antigenic structures in the final product by several orders of magnitude.

FUNDING: The research was performed on the basis of the Research Institute of Baby Nutrition — a branch of the FGBUN "Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology" in the framework of ensuring the conditions for performing the work of a grant in the form of a subsidy for: ensuring that Russian scientific organizations and (or) educational organizations of higher education conduct scientific research together with foreign organizations as part of providing implementation of the program of bilateral and multilateral scientific and technological cooperation, according to the contract between the Federal State Budgetary Institution "Federal Research Center for Nutrition and Biotechnology" and the Ministry of Education and Science of Russia dated October 02, 2022 No. 075-15-2022-1211 on the topic: "Development of a technology for obtaining specialized dairy products with reduced allergenicity for baby food based on milk protein hydrolysates".

1. Введение

В настоящее время у детей (особенно первого года жизни) широко распространены пищевая аллергия и непереносимость белков пищи [1]. Исследования показывают, что наиболее распространенными функциональными желудочно-кишечными расстройствами у детей раннего возраста в течении первого года жизни были срыгивание и колики, а наиболее распространенными функциональными желудочно-кишечными расстройствами у детей в возрасте 2–3 лет являются запор и диарея [2,3]. Кроме того, на фоне продолжающегося за последние годы роста распространенности аллергических заболеваний у детей, отмечается отягощающее влияние аллергических реакций на течение других патологических процессов, в частности на атопические заболевания [4,5]. Вместе с тем возросло и число взрослых с различными нарушениями функции пищеварения, для которых в той или иной форме характерна непереносимость пищевого белка [1]. Помимо этого, важны вопросы получения продуктов для энтерального зондового питания (для людей в состоянии шока, посттравматического стресса, послеоперационных состояниях после хирургических вмешательств на органах брюшной полости и т.д.).

В этой связи большую остроту и актуальность приобретает проблема создания специализированных пищевых продуктов, содержащих источник полноценного белка, не вызывающего пищевой непереносимости (в частном случае пищевой аллергии), при этом легкоусвояемого и обладающего удовлетворительными органолептическими свойствами. Наиболее приемлемы для этих целей ферментативные гидролизаты пищевых белков (ФГПБ) с различной степенью гидролиза, полученные с использованием современных ферментных препаратов и технологических подходов, позволяющих решить поставленные задачи. Среди таких подходов наиболее широко распространены мембранные технологии (ультра- и нанофильтрация), которые позволяют в мягких условиях менять аминокислотный и пептидный профиль гидролизатов и улучшать их иммунохимические и органолептические свойства [6].

В подавляющем большинстве в составе специализированных пищевых продуктов диетического питания (лечебных и профилактических) используются ферментативные гидролизаты белков коровьего молока (как казеиновой, так и сывороточной фракции). При этом для гидролизатов молочных белков, включаемых в состав лечебных гипоаллергенных продуктов, требуется высокая кратность снижения антигенности (КСА) (не менее $1{,}0 \times 10^5$). Отметим, что аллергия к белкам коровьего молока составляет большую долю всех видов пищевой аллергии, особенно в детском возрасте [7,8] и распространена максимально широко.

Кроме того, в настоящее время в РФ отсутствуют ферменты, позволяющие добиваться кратности снижения антигенности исходного субстрата необходимой для гипоаллергенных лечебных продуктов (например, Alcalase из штамма Bacillus licheniformis, Neutrase из штамма Bacillus amyloliquefaciens, грибная комплексная протеаза Flavourzyme и др.производства Novozymes, Дания). В то же время аллергия на белки кобыльего молока встречается гораздо реже [9].

Кобылье молоко, обладает высокой усвояемостью, пищевой и биологической ценностью [10]. В кобыльем молоке белковый компонент на 60% представлен лактоальбуминами и лактоглобулинами, свободными аминокислотами и пептидами [11].

Авторы клинического исследования [12], посвященного иммунокоррекции у пациентов с аллергией к белкам коровьего молока, высказывают мнение о том, что кобылье молоко при аллергии к белкам коровьего молока можно считать гипоаллергенным у пациентов с аллергией к казеину, альфа-лактоальбумину, бета-лактоглобулину и сывороточному альбумину коровьего молока. Это может быть связано также с тем, что белки кобыльего молока быстро гидролизуются желудочно-кишечными ферментами человека по сравнению с белками коровьего молока [13].

В работе [14] *iv vivo* и *in vitro* было показано, что у детей у детей с доказанной аллергией на коровье молоко не наблюдалось в 96% случаев непереносомости на кобылье молоко.

В работе [15] на 25 детях с IgE-опосредованной аллергией на коровье молоко были проведены кожные тесты с использованием коровьего молока и кобыльего молока. Полученный данные свидетельствуют о том, что кобылье молоко можно рассматривать как замену коровьего молока у большинства детей с таким заболеванием.

В работе [16] сравнивали аллергенность коровьего и кобыльего молока на мышиной модели Balb/c. Количество мышей с тяжелыми респираторными симптомами было значительно ниже в группе с сенсибилизацией к кобыльему молоку по сравнению с группой, сенсибилизированной коровьим молоком. Уровни специфического иммуноглобулина (Ig) E, IgG1 в сыворотке крови и гистамина в плазме также были выше у мышей, сенсибилизированных коровьим молоком, по сравнению с животными, сенисибилизированными кобыльим молоком. Кроме того, более высокие уровни интерлейкина (IL) 4 и IL-17A и более низкие уровни интерферона-γ (IFN-γ) и IL-10 наблюдались у мышей с сенсибилизацией к коровьму молоку по сравнению с кобыльим молоком.

В работе [17] исследовали иммуномодулирующее действие кобыльего молока при его введении сенсибилизированным белками коровьего молока. Было показано, что введение кобыльего молока снижало уровни сывороточного IgE у сенсибилизированных мышей, а также увеличение популяции регуляторных Т-клеток (CD4+Foxp3+). Введение кобыльего молока также снижало уровни мРНК IL-4 и приводило к более высоким транскриптам TLR-4 (Toll-подобного рецептора 4). Кроме этого, введение кобыльего молока вызывало увеличение числа кишечных Bifidobacterium spp. Делается вывод о иммуномодулирующем действии кобыльего молока, но дальнейшие исследования в клинике должны быть посвящены ферментативным гидролизатам белков кобыльего молока.

Работ по получению ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока, немного. В основном они посвящены кумысу, содержащему в своем составе биологически активные пептиды, обладающие ингибирующей активностью ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) [18,19]. Было показано, что фракция, обладающая ингибирующей АПФ активностью, лежит в диапазоне молекулярных масса менее 3,0 кД. В работе [20] вели гидролиз белка кобыльего молока Сумбава с помощью протеазы *Bacillus thuringenesis*. Были получены гидролизаты, способные проявлять антибактериальную и антиоксидантную активность, а пептидная фракция с молекулярным размером <3 кДа, полученная в результате 30-минутного гидролиза, обладает максимальной антибактериальной активностью и наиболее эффективна против грамотрицательных бактерий.

В работе [21] изучали ингибирующеее АПФ и антиоксидантное действия гидролизатов казеина кобыльего молока, полученных с трипсином, пепсином и комбинацией этих ферментов, *in vitro* и *in sijico*. Было показано, что гидролизаты, полученные из комбинированных ферментов пепсина и трипсина, проявляли более высокую ингибирующую АПФ активность. Также гидролизаты казеина коровьего молока показали достоверное ($p < 0{,}05$) ингибирование перекисного окисления липидов и гидроксильного радикала

по сравнению со стандартным антиоксидантом (BHA, бета-гидроксидная кислота). Полученные результаты свидетельствуют о том, что гидролизаты казеина кобыльего молока содержат биоактивные пептиды, ответственные за ингибирование АПФ и антиоксидантные эффекты, и, таким образом, могут быть использованы для лечения и контроля гипертонии.

В этой связи получение и последующая комплексная оценка ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока представляет значительный интерес. Вполне можно допустить, что гидролизаты белков кобыльего молока даже со средней степенью гидролиза, могут быть использованы в составе лечебных гипоаллергенных продуктов. Они могут быть получены с использованием коммерчески доступных ферментов отечественного производства и отечественного мембранного оборудования.

Цель работы: получение ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока с использованием отечественных ферментов, их физико-химическая и иммунохимическая характеристика.

2. Объекты и методы

2.1. Получение белка кобыльего молока

Белок кобыльего молока (БКМ) получали из сухого обезжиренного кобыльего молока (ООО «Снайп», РФ) с содержанием белка 22,1% по следующей схеме. 400 г сухого обезжиренного кобыльего молока растворяли в 8000 мл дистиллированной воды в течение 30 минут при комнатной температуре с верхнеприводной мешалкой. Полученную смесь центрифугировали в течение 30 минут при 3000 об/мин на центрифуге «BECKMAN J-6B» (Beckman Coulter, США) и отбирали супернатант.

Супернатант подвергали ультрафильтрации в тангенциальном потоке через мембрану на основе полиэфирсульфона с размерами пор 10кДа (установка мембранной фильтрации на основе фильтродержателя АСФ-018 (ВЛАДИСАРТ, Россия), со сбором высокомолекулярной фракции и с последующим диализом на этой же мембране и сбором ретентата. Полнота обессоливания продукта оценивалась измерением% сухих веществ в пермеате с использованием ручного рефрактометра «WSH HAND REFRACTOMETR» (W.S.R. TOKYO, Япония). Ретентат лиофилизировали на лиофильной сушилке ЛС-500, (ПРОИНТЕХ, Россия).

Массовую долю белка в ретентате оценивали методом Кьельдаля. Метод основан на минерализации органического вещества анализируемой пробы продукта концентрированной серной кислотой в присутствии катализатора с образованием сернокислого аммония, переведении его в аммиак, отгонке последнего в раствор борной кислоты, количественном учете аммиака титриметрическим методом и расчете массовой доли белка в анализируемой пробе.

2.2. Получение гидролизатов белков кобыльего молока

Гидролизаты БКМ получали ферментолизом с использованием двух ферментов: трипсин (ООО «Биопрогресс», Россия) и протозим (ТД «БИОПЕПАРАТ», Россия).

2.3. Гидролиз трипсином

12,0 г БКМ растворяли на водяной бане «BW-5» (BEING, KHP) в 1000 мл дистиллированной воды с верхнеприводной мешалкой при температуре 50 ± 1 °C в течение 2 часов. Доводили pH раствора БКМ до 7,9 0,5% смесью KOH/NaOH (в соотношении 2/1) и вносили трипсин в количестве 2,0% или 5,0% от массы субстрата. Вели реакцию в течение 3 часов при 50 ± 1 °C и поддержании pH 7,4–7,6 той же смесью KOH/NaOH. Ферментолиз БКМ останавливали инактивацией фермента нагреванием раствора в течение 15 минут при 75 °C. Полученный продукт (гидролизат БКМ) охлаждали до комнатной температуры и подвергали ультрафильтрации через мембрану с размерами пор 10 кДа со сбором пермеата, который лиофильно высушивали на лиофильной сушилке ЛС-500, (ПРОИНТЕХ, Россия).

2.4. Гидролиз протозимом

12,0 г БКМ растворяли на водяной бане «BW-5» (BEING, KHP) в 1000 мл дистиллированной воды с при температуре +60 ± 1 °C в течение 2 часов. Доводили pH до 8,6 0,5% смесью KOH/NaOH (в соотношении 2/1) и вносили протозим в количестве 2,0% и 5,0% от массы субстрата. Вели реакцию в течение 3 часов при 50 ± 1 °C и поддержании pH 8,4–8,6 той же смесью KOH/NaOH. По окончании проводили инактивацию фермента нагреванием в течение 15 минут при 75 °C. Полученный продукт охлаждали до комнатной температуры и подвергали ультрафильтрации через мембрану с размерами пор 10 кДа со сбором пермеата, который лиофильно высушивали на лиофильной сушилке ЛС-500, (ПРОИНТЕХ, Россия).

2.5. Оценка молекулярно-массового распределения пептидных фракций гидролизатов БКМ

Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций в составе полученных гидролизатов оценивали методом эксклюзионной жидкостной хроматографии высокого давления («СТАЙЕР», ЗАО «АКВИЛОН», РФ) на колонке «Супероза 12» (1 × 30 см, Pharmacia, Швеция, предварительно откалиброванной по стандартным глобулярным водорастворимым белка («SERVA», Германия и «Pharmacia», Швеция) [22].

Скорость элюирования составляла 0,4 мл/мин, в качестве элюента использовали 0,2M NaCl с добавлением азида натрия, оптическую плотность измеряли на проточном ультрафиолетовом детекторе УФ-132 (ООО «Химавтоматика», Россия). Хроматограммы интегрировали весовым методом в диапазоне молекулярных масс от свободного до полного объема колонки. Перед нанесением образца на колонку его подвергали микрофильтрации через шприцевой фильтр 0,2 мкм.

2.6. Иммуноферментный метод оценки антигенности белка кобыльего молока и его гидролизатов

Определение содержания антигенных детерминант в составе БКМ и гидролизатов БКМ проводили непрямым иммуноферментным анализом (ИФА) согласно [23] с определенной модификацией, используя в качестве стандарта выделенный нами БКМ, гипериммунную кроличью антисыворотку против БКМ и антивидовый конъюгат с пероксидазой против IgG (L+H) кролика (Филиал «Медгамал» НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи, Россия).

В предварительных экспериментах для построения калибровочной кривой было подобрано оптимальное разведение моноспецифической поликлональной кроличьей антисыворотки против БКМ. Оно составило 1/32000 и соответствовало раствору (не содержащему БКМ) с оптической плотностью 1,4–1,6 оптических единиц (нулевая концентрация).

На Рисунке 1 приведена калибровочная кривая, по которой рассчитывалось содержание интактного (антигенов БКМ) БКМ в исследовавшихся образцах.

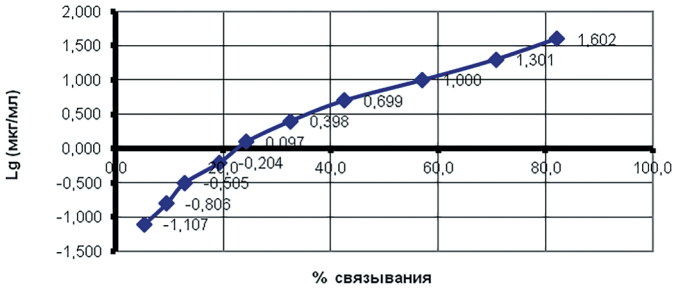


Рисунок 1. **Калибровочная кривая для определения кратности снижения антигенности в гидролизатах БКМ**

Figure 1. **Calibration curve for detecting the multiplicity of reducing the antigenicity of hydrolysates of mare's milk proteins**

Примечание: по оси абсцисс —% связывания, рассчитывается по формуле:

$$J(n)\ (\%) = 100 \times [B_0(n) - Bn] / B_0(n) \qquad (1)$$

Где:

$B_0(n)$ — среднее значение (из двух параллельных измерений) оптической плотности для нулевого связывания;

Bn — среднее значение (из двух параллельных измерений) оптической плотности для каждого разведения стандартного раствора БКМ; по оси ординат — значение десятичного логарифма концентрации, которое затем переводятся в значения концентрации в мкг/мл.

По данной калибровочной кривой рассчитывали кратность снижения антигенности (*KCA*) ферментативных гидролизатов БКМ относительно исходного белка по формуле:

$$KCA = C_{П\ 50\%} / C_{БКМ\ 50\%}, \qquad (2)$$

где:

$C_{П\ 50\%}$ — концентрация раствора исследуемого образца, соответствующая 50% связыванию конъюгата, мкг/мл;

$C_{БКМ\ 50\%}$ — концентрация стандартного раствора БКМ, соответствующая 50% связыванию конъюгата, мкг/мл.

2.7. Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета IBM SPSS Statistics 20 (IBM, США). Для всех показателей, представленных в таблице, вычисляли среднее значение (M) и стандартную ошибку среднего (m). Статистические различия

оценивали с использованием критерия Стьюдента. Критический уровень значимости нулевой статистической гипотезы (p) принимали равным 0,05.

3. Результаты и обсуждение

Из 400 г сухого обезжиренного кобыльего молока было получено 60,8 г сухого продукта (соответствует 15,9% от исходной массы), в котором содержание белка (по Къельдалю) составило 79,2%.

В Таблице 1 приведены количественные оценки выхода конечных продуктов (сухих гидролизатов) из сходного БКМ.

Различия между группами показывают, что увеличение фермент/субстратного соотношения от 2% до 5% фермента не влияет на выход конечного продукта, что указывает на нецелесообразность повышения количества вносимого фермента более 2%.

Полученные гидролизаты были практически белого цвета и хорошо растворялись в воде.

На Рисунке 2 приведены хроматограммы гидролизатиов БКМ, полученные с использованием трипсина (2% и 5%) после ультрафильтрации.

На Рисунке 3 приведены хроматограммы гидролизатиов БКМ, полученные с использованием протозима (2% и 5%) после ультрафильтрации.

По оси абсцисс Vсв. соответствует свободному объему хроматографической колонки. Он соответствует времени удерживания (или объему выхода), белков с молекулярными массами, превышающими максимальную, на калибровочной кривой колонки, а Vпол. — полный объем колонки, соответствующий выходу самых легких структур (с наименьшей молекулярной массой, которые в процессе хроматографии заходят во все поры гранул хроматографического материала).

Таблица 1. **Массы конечных сухих гидролизатов**
Table 1. **Masses of the final dry hydrolysates**

Фермент	% выхода
2,0% Трипсин	44,9±0,4
5,0% Трипсин	46,5±0,3
2,0% Протозим	48,1±0,3
5,0% Протозим	48,8±0,5

Примечание: различия не достоверны (>0.05).

В Таблице 2 приведены результаты интегрирования этих хроматограмм, количественно характеризующие молекулярно — массовое распределение пептидных фракций в их составе.

Из приведенных результатов видно, что пептидные профили гидролизатов сильно различаются в зависимости от использовавшегося фермента, что обусловлено различной специфичностью их действия, связанной с из природой (трипсин выделен из поджелудочной железы свиней, а протозим является бактериальной щелочной протеазой из *Bacillus licheniformis*. Однако, кратность снижения антигенности (относительно антигенности исходного субстрата) и практически не зависит от природы фермента (Таблица 3). Так же, из приведенных результатов видно, что увеличение

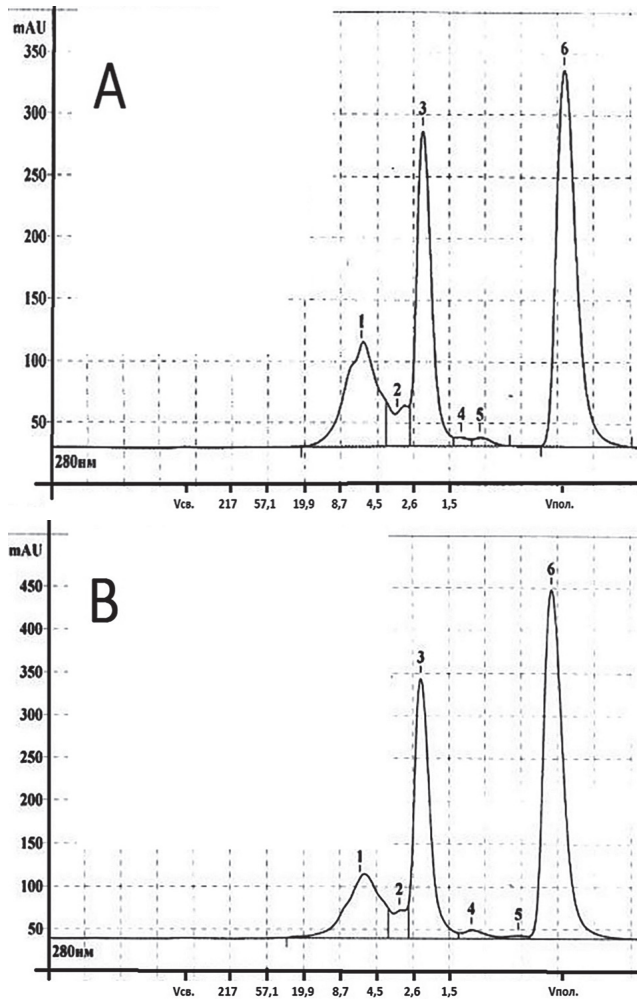


Рисунок 2. **Хроматограммы гидролизатов БКМ, полученные с использованием трипсина (2% — А и 5% — В) после ультрафильтрации 10 кДа.**
По оси абсцисс — молекулярная масса (кДа);
По оси ординат — оптическая плотность при 280 нм (mAu — относительные единицы, пропорциональные оптической плотности).

Figure 2. **Chromatograms of hydrolysates of mare's milk proteins obtained using trypsin (2% -A and 5% — B) after ultrafiltration 10 kDa.**
On the x-axis — molecular weight (kDa);
On the y-axis — optical density at 280 nm (mAu — arbitrary units proportional to the optical density).

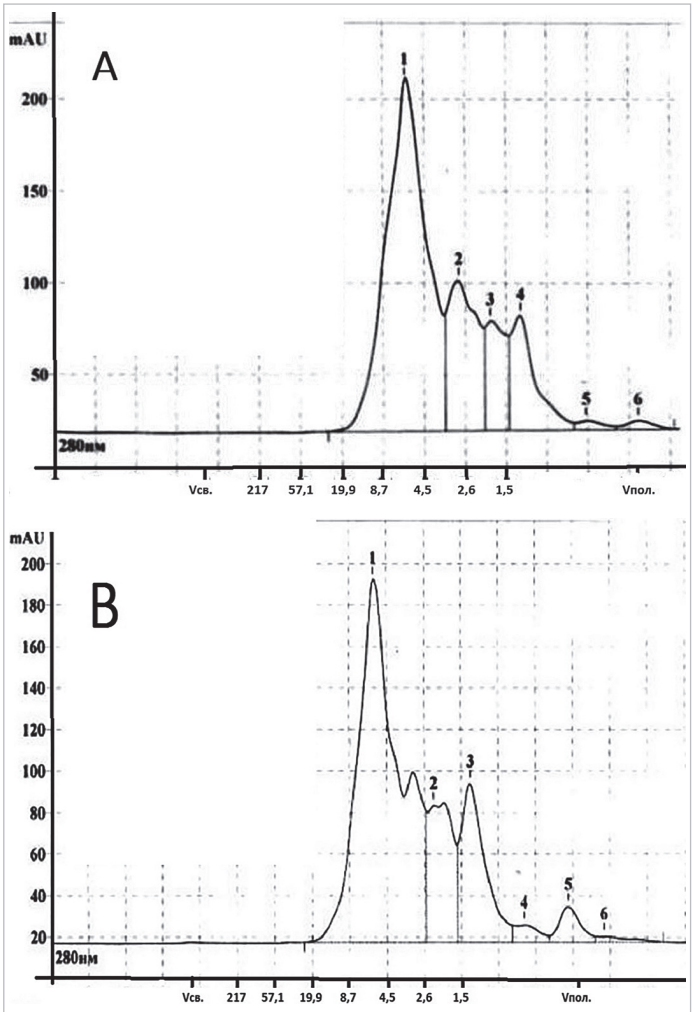


Рисунок 3. **Хроматограммы гидролизатов БКМ, полученные с использованием протозима (2% — А и 5% — В) после ультрафильтрации 10 кДа**
По оси абсцисс — молекулярная масса (кДа);
По оси ординат — оптическая плотность при 280 нм (mAu — относительные единицы, пропорциональные оптической плотности).

Figure 3. **Chromatograms of hydrolysates of mare's milk proteins obtained using protozyme (2% — A and 5% — B) after ultrafiltration 10 kDa.**
On the x-axis — molecular weight (kDa);
On the y-axis — optical density at 280 nm (mAu — arbitrary units proportional to the optical density).

Таблица 2. **Молекулярно-массовое распределение пептидных фракций в гидролизатах**
Table 2. **Molecular weight distribution of peptide fractions in hydrolysates**

№	Образец	% содержание фракции в различных диапазонах молекулярных масс, кДа			
		более 10,0 кДа	10,0–5,0 кДа	5,0–1,0 кДа	менее 1,0 кДа
1	Гидролизат БКМ 2% трипсин	2,9 ± 0,2*	17,5 ± 0,9***	34,4 ± 1,7***	45,3 ± 2,3***
2	Гидролизат БКМ 5% трипсин	0,9 ± 0,1*	11 ± 0,6***	39,4 ± 2,0***	48,7 ± 2,4***
3	Гидролизат БКМ 2% протозим	0,5 ± 0,2***	29,5 ± 1,5***	62,7 ± 3,1***	7,3 ± 0,3***
4	Гидролизат БКМ 5% протозим	0,8 ± 0,3	29,8 ± 1,5	60,8 ± 3,1***	8,5 ± 0,4***

* для гидролизатов с трипсином различия достоверны ($p < 0.05$) для фракций более 10,0 кДа;
** для гидролизатов с протозимом различия не достоверны (> 0.05);
*** различия достоверны при сравнении гидролизатов с трипсином и протозимом ($p < 0.05$) для фракций менее 10,0 кДа с одинаковым соотношением фермент/субстрат (№ 1 и 3; 2 и 4) в диапазонах молекулярных масс менее 10 кДа.

Таблица 3. **Кратность снижения антигенности гидролизатов БКМ, полученных с трипсином и протозимом**
Table 3. **Multiplicity of a decrease in antigenicity of hydrolysates of mare's milk proteins obtained with trypsin and protozyme**

№	Гидролизат	Кратность снижения антигенности	БКМ, вес.%
1	Трипсин 2%	1400 ± 100*	0,0709 ± 0,0050*
2	Трипсин 5%	1600 ± 100	0,0610 ± 0,0030
3	Протозим 2%	1900 ± 40*	0,0527 ± 0,0012*
4	Протозим 5%	2000 ± 100	0,0502 ± 0,0031

* Различия достоверны между группами 1 и 3 ($p < 0,05$).

фермент/субстратного соотношения от 2% до 5% практически не влияет на пептидный профиль и кратность снижения антигенности (или содержание антигенных структур исходного белка) в гидролизатах БКМ, полученных с использованием протозима. Это связано с ультрафильтрационной обработкой полученных гидролизатов, которая позволяет на несколько порядков снизить содержание антигенных структур в конечной продукте [24,25].

Отметим, что такие значения кратности снижения антигенности (1400–2000) применительно к белкам сыворотки коровьего молока недостаточны для их использования в составе лечебных гипоаллергенных продуктов, где эти значения должны составлять 100000 и более [26]. Кроме этого, такие гидролизаты горькие и характеризуются высокой осмоляльностью, а применение нанофильтрации [6] для снижения горечи и осмоляльности приводит к значительному удорожанию процесса. Поэтому можно предположить, что т. к. белки кобыльего молока изначально обладают значительно меньшей аллергенностью по сравнению с белками молочной сыворотки [12], то кобылье молоко можно считать хорошей заменой коровьего молока для большинства детей с тяжелой аллергией на коровье молоко [14, 15], что подтверждено положительным клиническим и иммунологическим эффектом [16,17] в результате исследований. И, таким образом, гидролизаты белков кобыльего молока с относительно невысокой кратностью снижения антигенности могут быть использованы в составе профилактических и лечебных продуктов.

Так, в работе [27] показано, что введение в рацион крыс ферментативного гидролизата белков кобыльего молока приводило к снижению в 1,9 раза уровня антител IgG к OBA ($p < 0,001$) наряду со значимым увеличением концентрации ИЛ-12(p70) ($p < 0,05$, по, сравнению с животными, получавшими в составе рациона гидролизат белков сыворотки коровьего молока на модели внутрибрюшинной сенсибмилизации животных куриным овальбумином. Это может быть связано со специфическим составом гликопептидов, образующихся при ферментолизе молочного белка 2 видов дойных животных.

Такое снижение антигенности в полученных гидролизатах позволяет их использовать в составе специализированных гипоаллергенных профилактических продуктов, а также продуктах, предназначенных для лиц с нарушениями желудочно-кишечного тракта, не связанными с аллергическими реакциями. Кроме этого, для получения гидролизатов с значением КСА 1×10^5 и выше, необходимо использование других коммерческих ферментов (например «Alcalase», «Flavourzyme» производства (Novozymes, Дания), аналоги которых в РФ к настоящему времени в промышленных масштабах не производятся.

Направлением дальнейших исследований ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока, которые могут использоваться в составе специализированных пищевых продуктов лечебного и профилактического назначения, должна быть доклиническая экспериментальная оценка их потенциальной аллергенности *in vitro* [28,29,30] и иммуномодулирующих свойств в эксперименте [31].

Кроме этого, технологические подходы к получению гидролизатов белков кобыльего молока требуют дальнейшей проработки как с целью увеличения конечного выхода продукта, так и улучшения их органолептических свойств.

4. Выводы

Проведены исследования процесса гидролиза белков кобыльего молока, с целью получения пептидных фракций в составе полученных гидролизатов, последующего определения их пептидного профиля, а также определения содержания антигенных детерминант в составе БКМ и гидролизатов БКМ. В результате проведенного исследования экспериментально обоснована эффективность ферментных препаратов отечественного производства Трипсин и Протозим. Из приведенных результатов видно, что пептидные профили гидролизатов сильно различаются в зависимости от использовавшегося фермента, однако, кратность снижения антигенности практически не зависит от природы фермента, и не зависит от увеличения фермент/субстратного соотношения от 2% до 5%. На пептидный профиль и кратность снижения антигенности гидролизатов БКМ оказывает значительное влияние ультрафильтрационная обработка полученных гидролизатов, которая позволяет на несколько порядков снизить содержание антигенных структур в конечной продукте.

Анализ полученных данных, свидетельствует, что для рекомендаций по включению таких гидролизатов в состав конкретных специализированных продуктов необходимо проведение комплексной их доклинической оценки. Полученные результаты могут быть учтены для масштабирования процесса получения ферментативных гидролизатов белков кобыльего молока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Ногаллер, А. М., Гущин, И. С., Мазо, В. К., Гмошинский, И. В. (2008). Пищевая аллергия и непереносимость пищевых продуктов. Москва: Медицина, 2008. [Nogaller, A. M., Gushchin, I. S., Mazo, V. K., Gmoshinsky, I. V. (2008). Food allergy and food intolerance. Moscow: Medicine, 2008. (In Russian)]
2. Vandenplas, Y., Abkari, A., Bellaiche, M., Benninga, M., Chouraqui, J. P., Çokura, F. et al. (2015). Prevalence and health outcomes of functional gastrointestinal symptoms in infants from birth to 12 months of age. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 61(5), 531–537. https://doi.org/10.1097/MPG.0000000000000949
3. van Tilburg, M. A. L., Hyman, P. E., Walker, L., Rouster, A., Palsson, O. S., Kim, S. M. et al. (2015). Prevalence of functional gastrointestinal disorders in infants and toddlers. *The Journal of Pediatrics*, 166(3), 684–689. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2014.11.039
4. Балаболкин, И. И. (2003). Современная концепция патогенеза и принципы терапии аллергических заболеваний у детей. *Педиатрия. Журнал им. Г. Н. Сперанского*, 82(4), 52–57. [Balabolkin, I. I. (2003). Pediatric allergis diseases — contemporary view on pathogenesis and main principles of treatment. *Pediatriya. Zhurnal im G. N. Speranskogo*, 82(4), 52–57. (In Russian)]
5. Wahn, U. (1998). Environmental factors facilitating allergic sensitization and atopic manifestation in early childhood. *Nutrition Research*, 18(8), 1363–1371. https://doi.org/10.1016/S0271-5317(98)00115-8
6. Гмошинский, И. В., Зилова, И. С., Зорин, С. Н., Демкина, Е. Ю. (2012). Мембранные технологии — инновационный метод повышения биологической ценности белка для питания детей раннего возраста. *Вопросы современной педиатрии*, 11(3), 57–64. [Gmoshinsky, I. V., Zilova, I. S., Zorin, S. N., Demkina, E. J. (2012). Membrane technologies — an innovative method of protein biological value increasing in young children feeding. *Current Pediatrics,* 11(3), 57–64. (In Russian)]
7. Bahna, S.L. (1987). Milk allergy in infancy. *Annals of Allergy*, 59(5), 131–136.
8. Businco, L., Bruno, G., Giampietro, P. G. (1999). Prevention and management of food allergy. *Acta Paediatrica*, 88(s430), 104–109. https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.1999.tb01309.x

9. Lajnaf, R., Feki, S., Ben Ameur, S., Attia, H., Kammoun, T., Ayadi, M. A. et al. (2023). Recent advances in selective allergies to mammalian milk proteins not associated with Cow's Milk Proteins Allergy. *Food and Chemical Toxicology*, 178, Article 113929. https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113929
10. Курченко, В. П., Симоненко, Е. С., Сушинская, Н. В., Головач, Т. Н., Петров, А. Н., Симоненко, С. В. (2021). Идентификация кобыльего молока и его смеси с коровьим молоком методом ВЭЖХ-анализа. *Техника и технология пищевых производств*, 51(2), 402–412. [Kurchenko, V. P., Simonenko, E. S., Sushinskaya, N. V., Golovach, T. N., Petrov, A. N., Simonenko, S. V. (2021). HPLC identification of mare's milk and its mix with cow's milk. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(2), 402–412. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-402-412
11. Jastrzębska, E., Wadas, E., Daszkiewicz, T., Pietrzak-Fiećko, R. (2017). Nutritional value and health-promoting properties of mare's milk-a review. *Czech Journal of Animal Science*, 62(12), 511–518. https://doi.org/10.17221/61/2016-CJAS
12. Жарин, В. А. (2017). Иммунокоррекция у пациентов с аллергией к белкам коровьего молока. *Военная медицина*, 2(43), 44–49. [Zharin, V. A. (2017). Immunocorrection in patients with food allergy to cow's milk protein. *Military Medicine*, 2(43), 44–49. (In Russian)]
13. Uniacke-Lowe, T., Huppertz, T., Fox, P. F. (2010). Equine milk proteins: Chemistry, structure and nutritional significance. *International Dairy Journal*, 20(9), 609–629. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.02.007
14. Barreto, Í. M. L. G., Rangel, A. H. D. N., Urbano, S. A., Bezerra, J. D. S., Oliveira, C. A. D. A. (2019). Equine milk and its potential use in the human diet. *Food Science and Technology*, 39(Suppl 1), 1–7. https://doi.org/10.1590/fst.11218
15. Businco, L., Giampietro, P. G., Lucenti, P., Lucaroni, F., Pini, C., Di Felice, G. et al. (2000). Allergenicity of mare's milk in children with cow's milk allergy. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 105(5), 1031–1034. http://doi.org/10.1067/mai.2000.106377
16. Duan, C., Ma, L., Cai, L., Li, X., Ma, F., Chen, J. et al. (2021). Comparison of allergenicity among cow, goat, and horse milks using a murine model of atopy. *Food and Function*, 12, 5417–5428. https://doi.org/10.1039/D1FO00492A
17. Fotschki, J., Szyc, A. M., Laparra, J. M., Markiewicz, L. H., Wróblewska, B. (2016). Immune-modulating properties of horse milk administered to mice sensitized to cow milk. *Journal of Dairy Science*, 99(12), 9395–9404. http://doi.org/10.3168/jds.2016-11499
18. Chen, Y., Wang, Z., Chen, X., Liu, Y., Zhang, H., Sun, T. (2010). Identification of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides from koumiss, a traditional fermented mare's milk. *Journal of Dairy Science*, 93(3), 884–892. https://doi.org/10.3168/jds.2009-2672
19. Ricci, I., Artacho, R., Olalla, M. (2010). Milk protein peptides with angiotensin I-converting enzyme inhibitory (ACEI) activity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 390–402. https://doi.org/10.1080/10408390802304198
20. Kusumaningtyas, E., Widiastuti, R., Kusumaningrum, H. D., Suhartono, M. T. (2018). Bioactivities and analysis of peptides from Sumbawa horse milk generated by bacillus thuringiensis protease. *Jurnal Ilmu Ternak dan Veteriner*, 21(4), 244–254. https://doi.org/10.14334/jitv.v21i4.1627
21. Ugwu, C. P., Abarshi, M. M., Mada, S. B., Sanusi, B., Nzelibe, H. C. (2019). Camel and horse milk casein hydrolysates exhibit angiotensin converting enzyme inhibitory and antioxidative effects in vitro and in silico. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 25, 1595–1604. https://doi.org/10.1007/s10989-018-09802-2
22. Семенова, Е. С., Симоненко, Е. С., Симоненко, С. В., Зорин, С. Н., Петров, Н. А., Мазо, В. К. (2023). Исследование параметров 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. (In Russian)] https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-224-232
23. Зверева, Е. А., Смирнова, Н. И., Жердев, А. В., Дзантиев, Б. Б., Юрова, Е. А., Денисович, Е. Ю. и др. (2013). Разработка методики определения бета-лактоглобулина в молоке и молочных продуктах с применением метода иммуноферментного анализа. *Современные проблемы науки и образования*, 5, Статья 477. [Zvereva, E.A., Smirnova, N.I., Zherdev, A.V., Dzantiev, B.B., Yurova, E.A., Denisovich, E. Yu. et al (2013). Development of method for determination of beta-lactoglobulin in milk and milk products by enzyme-linked immunosorbent assay. *Modern Problems of Science and Education,* 5, Article 477. (In Russian)]
24. Головач, Т.Н., Курченко, В.П., Сурвило, Л.И. (2011). Антигенные свойства нативных и термообработанных сывороточных белков и их ферментативных частичных гидролизатов. *Труды Белорусского государственного университета*, 6(1), 209–223. [Golovach, T.N., Kurchenko, V.P., Survilo, L.I. (2011). Antigenic properties of native and thermodenatured whey proteins and their fermentative partial hydrolysates. *Proceedings of BSU*, 6(1), 209–223. (In Russian)]
25. Головач, Т. Н., Червяковский, Е. М., Курченко, В. П. (2011). Физико-химическая и иммунохимическая характеристика частичного гидролизата сывороточных белков. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 1(11), 28–34. [Golovach, T. N., Chervyakovsky, E. M., Kurchenko, V. P. (2011). Physicochemical and immunochemical characteristics of partial hydrolysate of whey proteins. *Food Industry: Science and Technology*, 1(11), 28–34. (In Russian)]
26. Зорин, С. Н. (2019). Ферментативные гидролизаты пищевых белков для специализированных пищевых продуктов диетического (лечебного и профилактического) питания. *Вопросы питания*, 88(3) 23–31. [Zorin, S. N. (2019). Enzymatic hydrolysates of foods for therapeutic and prophylactic nutrition. *Voprosy Pitaniia [Problems of Nutrition]*, 88(3), 23–31. (In Russian)] https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10026
27. Симоненко, Е.С., Симоненко, С.В., Гмошинский, И.В., Ригер, Н.А, Шумакова, А. А., Зорин, С.Н. (2024). Влияние лактоферрина и ферментативных гидролизатов белков коровьего и кобыльего молока на анафилактическую чувствительность и цитокиновый профиль крыс. *Вопросы питания*, 93(2), 31–40. [Simonenko, E.S., Simonenko, S.V., Gmoshinsky, I.V., Rieger, N.A, Shumakova, A.A., Zorin, S.N. (2024). Effect of lactoferrin and enzymatic hydrolysates of cow and mare milk proteins on anaphylactic sensitivity and cytokine profile of rats. *Voprosy Pitaniia [Problems of Nutrition],* 93(2), 31–40. (In Russian)] https://doi.org/10.33029/0042-8833-2024-93-2-31-40
28. Мунблит, Д. Б., Корсунский, И. А. (2016). Определение специфических IgG-антител к пищевым продуктам в диагностике пищевой аллергии: миф или реальность? *РМЖ*, 24(18), 1206–1209. [Munblit, D. B., Korsunsky, I. A. (2016). Detection of specific IgG against foods in food allergy diagnosis: Myth or reality? *RMJ*, 24(18), 1206–1209. (In Russian)]
29. Агафонов, В. Е., Гервазиева, В. Б. (2012). IgG4 антитела к пищевым белкам у больных атопическим дерматитом. *Медицинский вестник Северного Кавказа*, 3, 66–69. [Agafonov, V. E., Gervazieva, V. B. (2012). IgG4 antibodies to food proteins in patients with atopic dermatitis. *Medical News of the North Caucasus*, 3, 66–69. (In Russian)]
30. Bielory, L., Terr, A. I. (2014). Unconventional theories and unproven methods in allergy. Chapter in a book: Middleton's Allergy. Saunders, 2014. http://doi.org/10.1016/B978-0-323-08593-9.00102-9
31. Kiewiet, M. B. G., Gros, M., van Neerven, R. J. J., Faas, M. M., de Vos, P. (2015). Immunomodulating properties of protein hydrolysates for application in cow's milk allergy. *Pediatric Allergy and Immunology*, 26(3), 206–217. https://doi.org/10.1111/pai.12354

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Семенова Елена Сергеевна — младший научный сотрудник, лаборатория опытно-экспериментальных технологических исследований, Научно-исследовательский институт детского питания — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, 143500 Московская область, Истра, ул. Московская, 48 Тел.: +7–498–313–03–96 E-mail: lab6@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3848-7478 * автор для контактов	**Elena S. Semenova**, Junior Researcher, Laboratory of Experimental Technological Research, Scientific Research Institute of Baby Food — a branch Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 48, Moskovskaya str., Moscow region, 143500, Istra, Russia Tel.: +7–498–313–03–96 E-mail: lab6@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3848-7478 * corresponding author
Симоненко Елена Сергеевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория технологий продуктов питания детей и дошкольного и школьного возраста, Научно-исследовательский институт детского питания — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи 143500, Московская область, Истра, ул. Московская, 48 Тел.: +7–498–313–03–96 E-mail: nir@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2878-8069	**Elena S. Simoneko**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Food Technologies for Children and Preschool and School Age, Scientific Research Institute of Baby Food — a branch Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 48, Moskovskaya str., Moscow region, 143500, Istra, Russia Tel.: +7–498–313–03–96 E-mail: nir@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2878-8069
Симоненко Сергей Владимирович — доктор технических наук, директор, Научно-исследовательский институт детского питания — филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи 143500, Московская область, Истра, ул. Московская, 48 Тел.: +7–498–313–03–96 E-mail: dir@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6999-5048	**Sergey V. Simoneko**, Doctor of Technical Sciences, Director, Scientific Research Institute of Baby Food — a branch Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety 48, Moskovskaya str., Moscow region, 143500, Istra, Russia Tel.: +7–498–313–03–96 E-mail: dir@niidp.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6999-5048

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Зорин Сергей Николаевич — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи 109240, Москва, Устьинский проезд, 2/14 Тел.: +7–495–698–53–71 E-mail: zorin@ion.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2689-6098	**Sergey N. Zorin**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Food Biotechnologies and Specialized Products, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety 2/14, Ustyinsky proezd, 109240, Moscow, Russia Tel.: +7–495–698–53–71 E-mail: zorin@ion.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2689-6098
Мазо Владимир Кимович — доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, лаборатория пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи 109240, Москва, Устьинский проезд, 2/14 Тел.: +7–495–698–53–71 E-mail: mazo@ion.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3237-7967	**Vladimir K. Mazo**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Food Biotechnologies and Specialized Products, Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety 2/14, Ustyinsky proezd, 109240, Moscow, Russia Tel.: +7–495–698–53–71 E-mail: mazo@ion.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3237-7967
Критерии авторства	**Contribution**
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480

Поступила 04.04.2024
Поступила после рецензирования 23.09.2024
Принята в печать 27.09.2024
© Макаров В. Н., Садыков А. Р., Четверикова Д. К., 2024

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

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ МЯСА В ПЕЛЬМЕНЯХ НА ВРЕМЯ ИХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ

Макаров В. Н.*, Садыков А. Р., Четверикова Д. К.
Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
частица мяса в тестовой оболочке, критериальный подход, этапы готовки, метод конечных элементов

АННОТАЦИЯ
На основании изученной литературы ставится цель: исследовать влияние объемной доли мяса в пельмене и количества пельменей на время их приготовления, а также провести анализ физико-математических и технических аспектов, которые необходимо учитывать (или не учитывать) в рамках намеченного исследования. Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи: провести экспериментальные исследования; описать допущения, которые необходимо принять при выполнении исследования; провести теоретические исследования (численные эксперименты, используя метод конечных элементов). Для проведения экспериментов в качестве объекта исследований были выбраны пельмени известных торговых марок, названия которых условно были обозначены как SK, SZ, RE, TS. Исследование пельменей известных торговых марок обусловлено как интересом потребителей, так и меньшей вариативностью параметров продукции, что повышает воспроизводимость результатов. В качестве допущений, принятых при натурных экспериментах, авторы выделяют следующие: при варке участвует дистиллированная вода; объем пельменя не меняется в процессе варки; биохимическим составом начинки возможно пренебречь. В результате теоретического анализа приняты следующие допущения: при исследовании варки пельменя не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты; время всплытия пельменя пренебрежительно мало; «приближение о начальных значениях» — геометрические и физико-химические параметры пельменя не меняются в процессе готовки. Получено время приготовления 1, 5, 10 пельменей известных торговых марок на основе численных экспериментов. С помощью натурных экспериментов исследовано время с момента погружения пельменей в воду до их всплытия. В результате численных экспериментов выяснено, что время нагрева центра пельменя известных торговых марок до температуры денатурации белков отличается от времени всплытия примерно на 360 секунд. Следовательно, после всплытия пельменям известных торговых марок необходимо еще около 6 минут варки до полной готовности.

Received 04.04.2024
Accepted in revised 23.09.2024
Accepted for publication 27.09.2024
© Makarov V. N., Sadykov A. R., Chetverikova D. C., 2024

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

THE INFLUENCE OF THE VOLUME FRACTION OF MEAT IN DUMPLINGS ON THEIR COOKING TIME

Valery N. Makarov*, Aleksandr R. Sadykov, Daria C. Chetverikova
Orenburg State University, Orenburg, Russia

KEY WORDS:
meat semi-finished product in dough, criterion approach, cooking steps, finite element method

ABSTRACT
Based on the studied literature, the aim was to investigate the influence of the volume fraction of meat in meat dumplings (pelmeni) and the number of dumplings on their cooking time, as well as to analyze the physico-mathematical and technical aspects to be taken into account (or not) within the framework of the planned experiment. To achieve this goal, the following tasks were set: to conduct experimental studies, to describe the assumptions that need to be accepted when performing the study and to conduct theoretical studies (numerical experiments, using the finite element method). When conducting experiments, dumplings of well-known brands, the names of which were conventionally labeled as “SK”, “SZ”, “RE”, “TS”, were chosen as objects of research. The need to study the dumplings of well-known brands is justified by both consumer interest and a smaller variability of product parameters, which increases the reproducibility of the results of the study. As assumptions adopted in real experiments, the authors emphasize the following ones: distilled water is used in cooking, the volume of a dumpling does not change during cooking, the biochemical composition of the filling can be neglected. As a result of the theoretical analysis, the following assumptions were made: the study of dumpling cooking does not take into account the resistance forces, i. e., turbulent and convective flows, as well as thermo-elastic effects; the time of dumpling floating to the surface is negligibly small; "approximation of initial values" — geometric, physico-chemical parameters of the dumpling do not change during cooking. Cooking time of 1, 5, 10 dumplings of known brands was obtained on the basis of numerical experiments. Using real experiments, the time from immersion of the dumplings in water to their floating to the surface was investigated. As a result of numerical experiments it has been found that the time of heating the center of the dumpling of known brands to the temperature of protein denaturation differs from the time of floating to the surface by about 360 seconds. Consequently, after floating to the surface, the dumplings of known brands need about six more minutes of cooking time until they are fully cooked.

1. Введение

За последние несколько лет пельмени стали объектом множества разносторонних исследований. Это объясняется экономической составляющей. Авторы [1] утверждают, что рынок пельменей является самым емким среди других замороженных полуфабрикатов, и эта тенденция сохраняется на протяжении уже многих лет. К аналогичным выводам пришла Курбангалиева А. А. [2] в результате анализа экспорта российской готовой мясной продукции на рынок Казахстана.

Актуальность исследований пельменей обусловлена нетривиальным сочетанием ингредиентов и техник приготовления, а также необходимостью оптимизировать процесс варки для сохранения питательных свойств и вкуса. Это особенно важно в условиях постоянно растущих требований к качеству и безопасности пищевых продуктов [3–5].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Макаров, В. Н., Садыков А. Р., Четверикова, Д. К.** (2024). Влияние объемной доли мяса в пельменях на время их приготовления. *Пищевые системы*, 7(3), 473–480. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480

FOR CITATION: **Makarov, V. N., Sadykov, A. R., Chetverikova, D. C.** (2024). The influence of the volume fraction of meat in dumplings on their cooking time. *Food Systems*, 7(3), 473–480. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-473-480

Кроме социально-экономических и инженерных исследований, пельмень рассматривали в рамках физико-математических наук — как теоретических, так и экспериментальных. Авторы статей [6,7] рассматривают процесс готовки пельменей с физико-математической точки зрения. Результатом разработки [6] является динамическая модель, учитывающая законы теплопередачи и использующая понятие степени готовности для пельменей M, введенное в исследовании [8]:

$$M = \int_0^t 10^{\frac{T-T_{ref}}{Z_M}} dt, \quad (1)$$

где Z_M — значения коэффициента качества, °C;
t — это время нагрева, мин;
T_{ref} — опорная температура, °C;
T — температура внутри пельменей, °C.

Понятие степени готовности по своей специфике схоже с величинами, введенными в рамках критериального подхода статьи [9]. Авторы работы [6] сопоставляли критерий M, учитывающий температуру пельменя и время его нагрева, с оценкой вкусовых качеств, выбрав диапазон, соответствующий его приемлемым значениям. Данный подход имеет весомую долю субъективности, поэтому авторами настоящей работы он не применялся. В работе [7] методом анализа размерностей получено соотношение между временем готовки τ и параметрами мяса пельменя (радиусом частицы мяса R):

$$\tau = C_0 \frac{\rho c}{\kappa} R^2, \quad (2)$$

где τ — время приготовления пельменя;
C_0 — константа порядка единицы;
ρ — плотность мяса, кг/м^3;
c — теплоемкость мяса, кДж/(кг · °C);
к — коэффициент теплопроводности мяса, Вт/(м · °C).

В работе [7] указано, что время приготовления пельменей составляет несколько минут, однако авторы не приводят подробного описания методики, с помощью которой был получен данный результат. Также в статье [7] рассмотрены процессы варки пельменей в воде и на пару без учета оболочки. Ранее в литературе встречалось исследование теплопроводности шарообразных частиц мяса без оболочки [10], что применительно к данной задаче можно рассматривать как модель пельменя с бесконечно тонкой тестовой оболочкой. Материал [11] демонстрирует результаты изучения тестовой оболочки и ее трансформацию в процессе варки.

Экспериментальные исследования по приготовлению пельменей были приведены в работах [6,12]. Приготовленные пельмени были также проанализированы авторами [7] относительно степени готовности (2). Результатом [12] были исследования изменений внутренней температуры пельменей в процессе приготовления в зависимости от размера пельменей и от времени приготовления. Авторы пришли к выводу, что для приготовления пельменей при обжаривании их на сковороде или во фритюре достаточно около 3 минут, однако при готовке на пару требуется значительно большее время. Несмотря на емкие экспериментальные результаты, в работе [12] недостаточно теоретических исследований. Настоящее исследование направлено на изучение ключевых аспектов приготовления пельменей. Современные исследования продуктов и технологии пищевых производств все больше и больше привлекают фундаментальные методы математической физики и численного моделирования [13]. Это наиболее емко позволяет анализировать процессы приготовления и выделять ключевые факторы. Поэтому в настоящей работе процесс приготовления пельменей был рассмотрен не только в рамках экспериментальных исследований, но и относительно методов математической физики и численного моделирования. Ранее для анализа приготовления мяса использовался метод конечных элементов, например, описанный авторами [14,15], но работ, в которых варка пельменей была бы рассмотрена относительно численных методов, авторами найдено не было. Подход, предлагаемый авторами настоящей работы, предполагает наличие многих физико-математических приближений для упрощения решения, причем эти приближения необходимо обосновывать или даже строго доказывать. Основные расчетные данные и данные, которыми необходимо руководствоваться при проведении экспериментов, были получены из ГОСТ 33394-2015[1].

[1] ГОСТ 33394-2015 Пельмени замороженные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. — 21 с.

Наиболее важными аспектами приготовления пельменей можно считать:
1) Форму пельменей;
2) Количество пельменей;
3) Толщину теста, которая влияет на объемную долю мяса в пельмене V_M/V;
4) Способ приготовления;
5) Время готовки.

Форму пельменя можно в первом приближении считать шарообразной. Количество пельменей важно учитывать, так как вопрос аппроксимации модели приготовления одного пельменя к множеству нетривиален и технологически важен. Способ приготовления также очень важен для учета физических процессов, протекающих в объекте исследования. На данный момент существует множество различных способов приготовления: классическая варка в воде, варка на пару [7,12], обжаривание на сковороде и во фритюре [12], варка в воде с использованием СВЧ-поля [16,17]. В работе [16] был проведен обширный кластерный анализ предпочтений потребителя относительно вкусовых качеств пельменей и их текстуры, приготовленных различными способами (обжаривание во фритюре, в микроволновой печи, на сковороде и на пару). Исследование показало слабую связь между субъективной оценкой текстуры и вкуса потребителями с объективными аналитическими показателями. Поэтому принято решение ограничить исследование анализом традиционного способа варки в воде. Следовательно, необходимо выяснить, как объемная доля мяса в пельменях V_M/V связана со временем приготовления.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния объемной доли мяса в пельмене и количества пельменей на время их приготовления, а также анализ физико-математических и технических аспектов, которые необходимо учитывать (или не учитывать).

2. Объекты и методы

Для достижения цели исследования необходимо проанализировать экспериментальные результаты, сформировав на их основе теоретическую базу, т. к. объектом исследования является сложная система с большим количеством параметров, частью из которых следует пренебречь на основе эмпирических данных.

2.1. Экспериментальные задачи

1) Выбрать пельмени известных торговых марок.

Необходимость исследования пельменей известных торговых марок обоснована как интересом потребителей, так и меньшей вариабельностью характеристик объекта исследования, что делает результаты исследования легко воспроизводимыми.

2) Определить основные физико-математические, химические и биологические параметры пельменей до и после приготовления.

К основным физико-математическим, химическим и биологическим параметрам пельменей можно отнести: их геометрию (диаметр, толщина теста); данные об их составе; параметры жидкости, в которой будут вариться пельмени (температура, концентрация солей в водном растворе; объем жидкости).

В качестве объекта исследования случайно были выбраны пельмени четырех ценовых категорий с разным, но близким составом. Данные сведены в Таблицу 1 (указаны по убыванию цены). Авторами настоящей работы были выбраны пельмени именно этих торговых марок, так как они имеют близкий состав, перекрывают широкий диапазон цен и имеют разные геометрические характеристики. Названия торговых марок пельменей были условно переименованы для большей объективности исследований.

Таблица 1. Сводная таблица характеристик пельменей торговых марок, рассматриваемых в рамках настоящего исследования

Table 1. **Summary table of characteristics of the dumplings of the brands examined within the framework of the present experiment**

Условное название торговой марки	Цена за 100 г, руб.	Состав мяса
SK	78,57	говядина, свинина
SZ	50,00	говядина, свинина
RE	31,43	говядина, свинина
TS	22,50	телятина, говядина, курица

Среди рассмотренных торговых марок авторами не обнаружено пельменей, изготовленных из одного сорта мяса. Также неизвестна доля каждого сорта мяса в составе. Поэтому биохимическим составом начинки было решено пренебречь, т. е. учитывалась только объемная доля мяса к объему пельменя. Получены основные значения физических и геометрических характеристик пельменя до приготовления: толщина теста, диаметр пельменя и его масса. Если форма пельменя была ближе к сфероиду или эллипсоиду, за диаметр принимали его наибольший размер. Для получения среднего результата проводились измерения 10 пельменей каждой торговой марки. Измеряли геометрические параметры электронным штангенциркулем 110–222U (CNCINS, Россия), не оказывая значительного давления на вещество, в воздушной среде с отрицательной температурой. Время измерения массы было сведено к минимуму, причем после этого пельмени были помещены в воздушную среду с отрицательной температурой. Масса измерялась с помощью лабораторных аналитических весов Pioneer PX224 (OHAUS Corporation, США). Для всех результатов измерений были характерны малые величины разброса результатов, среднеквадратичной ошибки и средней абсолютной погрешности. При анализе погрешностей измерений использовались стандартные методы учета приборных ошибок и ошибок, полученных в результате косвенных измерений. Аналогичные методы и объект исследования рассматривались, например, в работе [6]. Начальная температура объектов измерения в соответствии с ГОСТ 33394-2015 составляла — 10 °С. Температура измерялась с поверхности пельменей с помощью пирометра TemPro 900 (ADA Instruments, Китай). После покупки пельмени хранились в комбинированном лабораторном холодильнике ХЛ-250 (POZIS, Россия). Рассчитывалось отношение объемной доли мяса к объему пельменя до приготовления, которое равно:

$$\frac{V_M}{V} = 8\left(\frac{1}{2} - \frac{d}{D}\right)^3, \quad (3)$$

где V_M — объем мяса в пельмене, мм^3;
V — объем пельменя, мм^3;
d — толщина теста, мм;
D — диаметр пельменя, мм.

Далее в металлической цилиндрической емкости на газовой горелке была нагрета до кипения дистиллированная вода при атмосферном давлении. Подробнее проанализируем необходимость использования дистиллированной воды в рассматриваемых исследованиях. Согласно второму закону Рауля, при добавлении соли (NaCl, марка ЧДА) в дистиллированную воду температура кипения раствора увеличивается [18], что должно отражаться на времени приготовления пельменей в нем. Однако эта связь прослеживалась лишь при добавлении соли от 10 г на 2 литра дистиллированной воды, в результате чего пельмени уже не соответствовали желаемым вкусовым качествам (определено органолептическим методом). Таким образом, авторы не считали целесообразным учитывать наличие соли, а рассматривали задачу, предполагая, что вода является дистиллированной. Для этого с использованием дистиллятора «Аквалаб Р5» («Аквалаб», Россия) была получена дистиллированная вода с удельной проводимостью менее 0,5 мкСм/см и значением pH = 6,55. Показатель кислотности воды измерялся с помощью pH-метра настольного типа Hanna HI 2211-02 (Hanna Instruments, Германия).

Объем воды был намного больше объема продукта и составлял около 2 литров. Это условие позволяет минимизировать изменение температуры воды после погружения пельменей в нее и, следовательно, уменьшить время приготовления и точнее анализировать экспериментальные и теоретические данные.

Приготовление пельменей (τ) состоит из трех этапов:
1) Погружение в кипящую воду с последующим нагревом (t_1);
2) Процесс всплытия пельменей (t_2);
3) Варка пельменей до состояния готовности (t_3).

Запишем эти промежутки времени, как:

$$\tau = t_1 + t_2 + t_3, \quad (4)$$

где t_n — n-ный этап приготовления, причем n = 1, 2, 3.

Если продолжительность первых двух этапов можно легко измерить, то продолжительность третьего этапа зафиксировать затруднительно. Для этого в [12] были исследованы изменения внутренней температуры пельменей в процессе приготовления, причем температура измерялась термопарой. В настоящем исследовании контроль за температурой в процессе приготовления в натурных экспериментах не велся из-за технологической сложности. Фиксировалось только время с момента погружения пельменя до его всплытия ($t_1 + t_2$). Для измерения этого времени использовался электронный секундомер «Интеграл С-01» (Электроника ПО «Интеграл», Беларусь). Таким образом, измерялось время 1, 5 и 10 пельменей 4-х торговых марок с момента их одновременного помещения в воду и до момента всплывания последнего пельменя. Во время измерения жидкость периодически аккуратно помешивали, чтобы минимизировать риск прилипания пельменей ко дну. Натурный эксперимент проводился при стандартных условиях в течение одних суток. Анализ третьего этапа приготовления t_3 производится путем сопоставления численных и натурных экспериментальных результатов. Во время приготовления пельменей контролировалась температура воды с помощью пирометра TemPro 900 (ADA Instruments, Китай), которая составляла около 100 °С.

Обсудим вопрос о количестве пельменей, которое необходимо рассматривать для проведения экспериментов. Очевидно, минимальное число для анализа приведенной задачи — 1 пельмень. Для усложнения увеличили это количество на один порядок, получая 10 пельменей. Средняя точка между этими двумя значениями — 5 пельменей. Такой простой подход позволяет качественно проследить степень влияния количества пельменей на время их приготовления. Более того, рассмотренное количество пельменей хорошо согласуется с рекомендацией их употребления человеком в размере одной порции [19].

Также, кроме измерения времени, получены значения диаметра и массы пельменя после всплытия. При измерении с поверхности пельменя удалялась жидкость. Расчеты массы и геометрических характеристик проводились аналогичными приборами, рассмотренными в настоящем исследовании. Толщина теста после всплытия не измерялась, так как ее границы были неопределенными из-за внешнего физико-химического воздействия. Для получения среднего результата проводилось 5 экспериментов для каждого количества пельменей каждой торговой марки. Данное число экспериментов является удовлетворительным для достоверной статистической обработки результатов. Подобное количество исследований приводится и в работе [6]. Для всех результатов измерений были характерны малые величины разброса результатов, среднеквадратичной ошибки и средней абсолютной погрешности. При анализе погрешностей измерений использовались стандартные методы учета приборных ошибок и ошибок, полученных в результате косвенных измерений [6].

После авторами настоящей работы были поставлены теоретические задачи.

2.2. Теоретические задачи

1) Обосновать допущения теоретической модели, опираясь на результаты экспериментов.
2) Описать теоретическую модель и привести необходимые константы для расчета.
3) Исследовать влияние доли мяса на время приготовления пельменей с помощью численных методов.
4) Сопоставить полученные результаты численных экспериментов; найти оптимальное время приготовления пельменей известных торговых марок и сделать соответствующие выводы.

Рассмотрим зависимость времени нагрева центра пельменей от объемной доли мяса в них. Для решения задачи использовалась модель теплообмена между водой (термостат, 100 °С) и шарообразными частицами мяса в тестовой оболочке (начальная температура –10 °С, согласно ГОСТ 33394-2015). Используя программное обеспечение Comsol Multiphysics 6.1, подключая модуль «Теплопроводность в твердых телах и жидкостях», приведем дифференциальное уравнение теплопроводности, справедливое для рассматриваемых задач [20]:

$$\begin{cases} \rho C_p \dfrac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted}; \\ \mathbf{q} = -k \nabla T. \end{cases} \quad (5)$$

где: ρ — плотность, кг/м^3;
C_p — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
T — температура, К;
t — время, с;
$\mathbf{u}$ — характеристика поля скоростей, м/с;
$\mathbf{q}$ — плотность теплового потока, Вт/м^2;
Q — характеристика источника (или поглотителя) тепла, Вт/м^3;
Q_{ted} — величина, характеризующая термоупругие эффекты в телах, Вт/м^3.

В данном случае одновременно решается система дифференциальных уравнений в частных производных, причем для каждого из материалов — воды, шарообразной частицы мяса и тестовой

оболочки. Для решения этой системы уравнений применялся метод конечных элементов. Подобные исследования проводились для анализа охлаждения свиной туши [21]. В настоящей работе для достижения поставленной цели решается задача о нахождении времени, которое затрачивается для нагрева центра шарообразной частицы мяса в тестовой оболочке до температуры денатурации белков 343,15 К (70 °С) [22]. Стоит отметить, что процесс денатурации очень сложен и многоэтапен из-за наличия в мясе большого количества белков, например, миозина, актина, тропомиозиана, миоглобина. Однако, как было рассмотрено на начальной стадии исследования, биохимическим составом начинки возможно пренебречь. Поэтому авторами было принято решение использовать для численных экспериментов наиболее изученное мясо (с термодинамической точки зрения) — говядину [23,24], а примерной температурой денатурации белков выбрать 343,15 К (70 °С) [22]. Такое же значение температуры центра приготовленного пельменя используется в работах [6,8].

При решении задач методом конечных элементов необходимо проводить исследования на сходимость по сетке [25,26] и по шагу времени [27–29]. В программе Comsol Multiphysics 6.1 реализован алгоритм, который на основании геометрии модели и используемых модулей физики строит оптимальную сетку, поэтому было решено воспользоваться этим алгоритмом. Было проведено два набора численных экспериментов: один с переменным шагом по времени, задаваемым оптимизирующим алгоритмом Comsol Multiphysics 6.1, второй с фиксированным шагом 1 с. Для анализа результатов была выбрана вторая группа, так как дисперсия рассчитанных значений для нее оказалась меньше, чем у первой.

Модель также имеет несколько дополнительных допущений. Опишем их ниже.

Рассмотрим процесс всплытия пельменя со дна емкости. Высота столба жидкости h (глубина погружения пельменя в воду), температура на поверхности пельменя равна 100 °С, т. е. условно считаем, что поверхность пельменя с кипящей водой находится в термодинамическом равновесии.

Запишем второй закон Ньютона для всплывающего пельменя:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = m\vec{a}. \quad (6)$$

В рамках задачи будем считать, что сила сопротивления $\vec{F}_C$ равна нулю (рассмотрим задачу без учета влияния на процесс конвективных турбулентных потоков, наличия пузырьков воздуха и соударения пельменей между собой и об стенки емкости, так как это существенно усложняет задачу), тогда

$$m\vec{g} + \vec{F}_A = m\vec{a}. \quad (7)$$

В проекции сил на ось 0Z запишем уравнение (7) в дифференциальной форме:

$$F_A - mg = m\frac{d^2z}{d^2t}. \quad (8)$$

Силу Архимеда, действующую на пельмень, по определению найдем как:

$$F_A = \rho_w g V. \quad (9)$$

Тогда после преобразований получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2z}{dt^2} - \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1\right)g = 0. \quad (10)$$

Решение дифференциального уравнения (10) имеет вид:

$$z = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1\right)\frac{gt^2}{2} + C_1 t + C_2; \quad (11)$$

C_1, C_2 — вещественные числа.

В начальный момент времени ($t = 0$) пельмень находился в состоянии покоя на дне емкости. За начало координат принимается дно емкости, а время отсчитывается с момента всплытия пельменя. Тогда получим начальные условия:

$$\begin{cases} z(0) = 0; \\ \left.\dfrac{dz}{dt}\right|_{t=0} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Конечное условие — расстояние, которое преодолевает пельмень, равное высоте водяного столба; время всплытия пельменя:

$$z(t_2) = h. \quad (13)$$

Из начальных условий получим:

$$C_1 = C_2 = 0. \quad (14)$$

Из конечного условия получим:

$$h = \left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1\right)\frac{gt_2^2}{2}. \quad (15)$$

Отсюда время всплытия t_2 определяется как:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g\left(\frac{\rho_w}{\rho_d} - 1\right)}}. \quad (16)$$

Причем плотность пельменя равна:

$$\rho_d = \frac{6m}{\pi D^3}. \quad (17)$$

Оценим среднее значение времени всплытия пельменя t_2. Распределение средних плотностей пельменей, на основе полученных экспериментальных данных, приведено в Таблице 4 (или ГОСТ 33394-2015); плотность воды при температуре 100 °С равна $\rho_w = 958{,}4$ кг/м^3 [30], в расчетах используем нормальное атмосферное давление; высота столба жидкости равна $h \approx 5{,}5$ см (из натурных экспериментов). Тогда среднее время всплытия пельменя t_2 находится в диапазоне 0,09 ÷ 0,18 с, что намного меньше времени до всплытия пельменей ($t_1 + t_2$) (Таблица 3). Таким образом, временем всплытия пельменя t_2 при анализе задачи можно пренебречь.

Рассмотрим величину Q_{ted}, характеризующую термоупругие эффекты в телах из (5). Данные эффекты приводят к увеличению массы пельменя из-за физико-химических превращений. Определимся с основными факторами, влияющими на увеличение массы пельменя в процессе приготовления.

Так как тесто имеет пористую структуру [31], к нему применим закон Дарси [32,33] (запишем его для одной метрической координаты и времени):

$$\frac{dB}{dt} = -k(t)\cdot S(t)\cdot \frac{dp(t)}{dx}, \quad (18)$$

где $\frac{dB}{dt}$ — объемный расход воды, проходящей через тестовую оболочку, м^3/с;

$S(t)$ — площадь поверхности, м^2;

$k(t)$ — коэффициент проницаемости теста, (м$^3\cdot$с)/кг;

$\frac{dp(t)}{dx}$ — градиент давления воды в тесте, Па/м.

Следует отметить, что процесс, описанный формулой (18), также зависит от температуры, и так как температура является функцией времени ($T = T(t)$), то в данной задаче эта зависимость явно не прописывается. Физико-химические превращения пельменя во время варки также подчиняются закону сохранения массы:

$$m(t) = m_0 + d\mu(t), \quad (19)$$

где m_0 — начальная масса;

$m(t)$ — масса после физико-химических превращений;

$d\mu(t)$ — изменение массы.

Так как $\rho(t)\frac{dB}{dt} = \frac{d\mu}{dt}$, используя формулу (18), запишем:

$$\frac{d\mu}{dt} = -k(t)\cdot S(t)\cdot \rho(t)\cdot \frac{dp(t)}{dx}. \quad (20)$$

Результаты натурных экспериментов (Таблицы 3 и 4) позволяют заключить, что $m_0 \gg d\mu$, что справедливо и для объема пельменей. Таким образом, при проведении теоретического анализа можно пренебречь изменением массы и приравнять его к нулю:

$$d\mu = 0. \quad (21)$$

Отсюда следует, что скорость изменения массы также равна нулю:

$$\frac{d\mu}{dt} = 0. \quad (22)$$

Это, в свою очередь, позволяет заключить, что хотя бы один из сомножителей в формуле (20) равен нулю:

$$\begin{bmatrix} k(t) = 0; \\ S(t) = 0; \\ \rho(t) = 0; \\ \dfrac{dp(t)}{dx} = 0. \end{bmatrix} \quad (23)$$

Исходя из физических условий данной задачи известно, что все сомножители в формуле (23), кроме $\frac{dp(t)}{dx}$, не обращаются в нуль на всем рассматриваемом интервале времени: коэффициент проницаемости теста не обращается в нуль, так как тесто имеет пористую структуру [31]; площадь поверхности не обращается в нуль, так как в рамках данной задачи пельмень не является материальной точкой; плотность не обращается в нуль, так как масса и объем пельменя постоянны. Следовательно, градиент давления равен нулю, что свидетельствует об одинаковости давления внутри и снаружи пельменя. Тогда термоупругими эффектами в телах можно пренебречь, так как:

$$Q_{ted} \propto d\mu = 0. \quad (24)$$

Очевидно, что данный подход достаточно груб и условен, однако в рамках поставленных задач он вполне применим. Приведенные рассуждения применительно к пельменям авторами настоящей работы в литературе замечены не были, поэтому описание данного вопроса является актуальным.

Процесс варки пельменя при численном моделировании представляет собой изменение его температуры в объеме, причем временем приготовления τ будет считаться время, за которое центр пельменя прогревается до 343,15 К (70 °С) [22]. В процессе исследования температурных полей при описании геометрических и физико-химических характеристик пельменя используем начальные значения, не меняя размеры пельменя, его массу и плотность, а также теплоемкость и теплопроводность теста [34]. Из теоретических приближений 1 и 2 — рассмотренное приближение вполне обосновано. Обозначим это приближение как «приближение о начальных значениях».

Перед решением поставленной задачи приведем все допущения, полученные в результате теоретического анализа:

1) При исследовании варки пельменя не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты;
2) Время всплытия пельменя t_2 пренебрежительно мало;
3) «Приближение о начальных значениях» — геометрические и физико-химические параметры пельменя не меняются в процессе готовки.

Опишем рассматриваемую модель. Выбирались граничные и начальные условия, физико-математические и технические параметры задачи для численного моделирования:

1) T (вода) = 100 °С = 373,15 К (дополнительные характеристики взяты из [30]);
2) T (пельмени) = – 10 °С = 263,15 К (ГОСТ 33394-2015).
3) Вода имеет форму цилиндра (пусть, R = 11,25 см, h = 12 см, т. е. объем цилиндра с водой намного больше объема пельменей);
4) Шарообразная частица мяса (говядина [23,24]) с начальными геометрическими размерами r = 13 мм; тестовая оболочка [34] (d = 0,2 см) — значения для численного моделирования выбирались близкими к Таблице 3.
5) Время нагрева центра пельменя до температуры денатурации белков примерно равно времени готовки τ.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Экспериментальная часть

Средние значения параметров пельменей на начальном этапе исследований для каждой торговой марки рассчитаны по формуле (3) и сведены в Таблицу 2.

Полученные данные полностью соответствуют результатам ГОСТ 33394-2015. Значения средней объемной доля мяса к пельменю для трех торговых марок (SZ, RE, TS) отличаются незначительно и равны примерно 0,7 отн. ед., а у пельменей торговой марки SK это значение самое малое из рассмотренных, причем средняя масса этих пельменей также самая малая.

Средние значения параметров 1, 5 и 10 пельменей после всплытия для каждой торговой марки сведены в Таблицу 3.

Из Таблицы 3 видно, что при увеличении количества пельменей среднее время t_1 увеличивалось, особенно эта связь прослеживается при сопоставлении результатов для 1 и 5 пельменей. Это связано, во-первых, с тем, что при увеличении количества пельменей температура изначально кипящей воды уменьшается все более значительно (несмотря на то, что объем воды много больше объема пельменей, полностью избавится от этого эффекта невозможно), а, во-вторых, при увеличении количества пельменей необходимо передавать им суммарно большую энергию для приготовления. Стоит отметить, что для пельменей торговой марки SK время t_1 для 5 пельменей оказалось больше, чем для 10. Вероятно, это связано с наличием сложных конвективных турбулентных потоков, которые внесли в данные заметную погрешность.

В Таблице 4 приводятся данные об относительном изменении среднего диаметра до и после всплытия, а также средней плотности пельменя после всплытия. Средняя плотность пельменей после всплытия определялась с помощью формулы (17), причем данные для расчета приведены в Таблице 3 (массы m и диаметры D).

Так как относительное изменение объема пельменя незначительно (не более 10%) — данное изменение возможно не учитывать. Более того, в работе [11] рассматривается методика уменьшения этой величины путем добавления в тесто порошка листьев лотоса.

3.2. Теоретическая часть

К рассмотренной модели применим все ранее описанные приближения, формулу (5) и разобьем систему на конечные элементы (Рисунок 1).

Далее определим время, которое необходимо, для нагрева 1, 5 и 10 пельменей от начальной температуры (–10 °С = 263,15 К) до температуры (70 °С = 343,15 К). В качестве примера приведем изображение температурных полей для 5 пельменей (Рисунки 2a, 2b). Заметим, что пельмени в воде расположены случайно и расстояния между ними больше их собственного радиуса.

Таблица 2. **Исходные геометрические и физические параметры пельменей, рассматриваемые в натурных экспериментальных исследованиях**

Table 2. **Initial geometrical and physical parameters of the dumplings examined in the real experiments**

Торговая марка	Средняя толщина теста d, мм	Средний диаметр D, мм	Общая масса, г	Средняя объемная доля мяса к объему пельменя V_M/V, отн. ед.
SK	1,9	20,20	3,00	0,535
SZ	1,8	34,10	10,8	0,716
RE	1,6	28,60	8,40	0,701
TS	1,5	33,20	6,80	0,753

Таблица 4. **Относительное изменение среднего диаметра пельменей до и после всплытия; средняя плотность пельменя после всплытия**

Table 4. **Relative change in the average diameter of the dumplings before and after floating to the surface; average density of the dumpling after floating to the surface**

Торговые марки	Относительное изменение среднего диаметра ΔD, %	Средняя плотность после всплытия ρ_d, кг/м^3
SK	4,95	705,56
SZ	6,10	478,28
RE	10,28	567,33
TS	2,41	395,54

Таблица 3. **Геометрические и физические параметры пельменей после всплытия**

Table 3. **Geometrical and physical parameters of the dumplings after floating to the surface**

Средние значения физических характеристик после всплытия	Торговые марки											
	SK			SZ			RE			TS		
	Количество пельменей			Количество пельменей			Количество пельменей			Количество пельменей		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Время t_1, с	21,80	60,00	51,60	78,80	101,80	110,00	91,00	106,00	112,80	16,00	32,00	36,40
Диаметр D, мм		21,20			36,18			31,54			34,00	
Масса m, г		3,52			11,86			9,32			8,14	
Изменение массы $d\mu$, г		0,52			1,06			0,92			1,34	

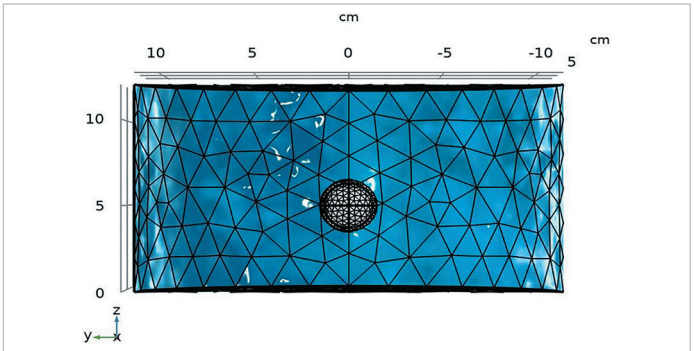


Рисунок 1. **Разбиение системы (один пельмень в воде) на конечные элементы**

Figure 1. **Division of the system (one dumpling in water) on finite elements**

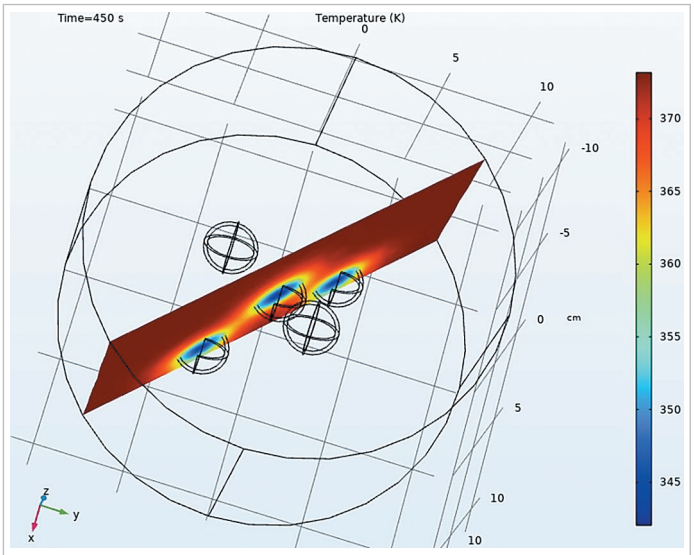


Рисунок 2a. **Распределение шарообразных частиц мяса в тестовой оболочке по объему воды**

Figure 2a. **Distribution of spherical meat particles in the dumpling wrapper in the volume of water**

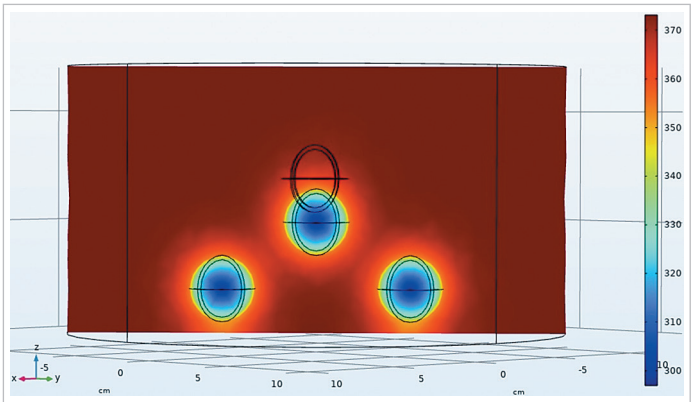


Рисунок 2b. **Срез, визуализирующий температурное поле пельменей при варке**

Figure 2b. **Section visualizing the temperature field of the dumplings during cooking**

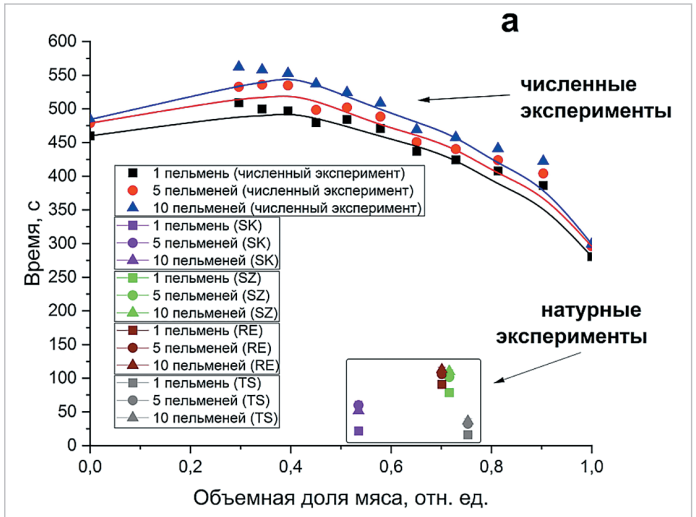


Рисунок 3a. **Сопоставление натурных (экспериментальное время всплытия t_1) и численных (расчетное время нагрева центра пельменя до температуры денатурации белков τ) экспериментов**

Figure 3a. **Comparison of real (experimental time of floating to the surface t_1) and numerical (calculated time of heating the dumpling center to the temperature of protein denaturation τ) experiments**

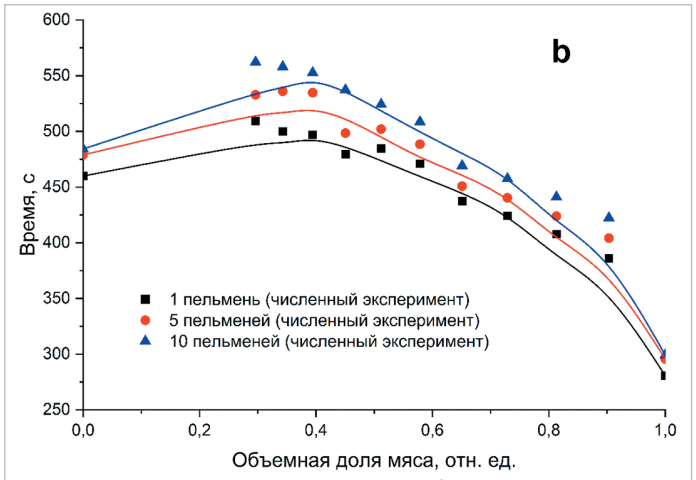


Рисунок 3b. **График зависимости объемной доли мяса в пельмене от времени нагрева центра пельменя до температуры денатурации белков τ, полученный с помощью численных экспериментов; для сглаживания графиков использовался метод скользящей средней**

Figure 3b. **Graph of the dependence of the volume fraction of meat in the dumpling on the time of heating the dumpling center to the temperature of protein denaturation τ obtained by numerical experiments; the moving average method was used for graph smoothing**

После проводились численные эксперименты, в которых изменяли толщину теста для 1, 5 и 10 пельменей (от шарообразных частиц теста до шарообразных частиц мяса), причем общий объем продукта оставался постоянным.

3.3. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов

На Рисунках 3a, 3b, 3c представлены результаты экспериментов, включая время всплытия пельменей.

При анализе Рисунков 3 получены следующие выводы.

1) Среднее время нагрева центра пельменей до температуры денатурации белков отличается от времени всплытия t_1 примерно на 360 секунд (Рисунок 3a). Следовательно, после всплытия пельменям необходимо еще около $t_3 \approx 6$ минут варки до полной готовности.
2) С увеличением толщины теста время приготовления возрастает нелинейно (Рисунок 3b). Этот результат согласуется с результатами из [35].
3) Время приготовления 1, 5 и 10 пельменей при равной объемной доле мяса в пельменях отличается незначительно (Рисунок 3b), однако, как и для случая с натурными экспериментами (Таблица 3), можно заключить, что при увеличении количества пельменей время их приготовления растет. Стоит отметить, что в натурных экспериментах эта связь прослеживается более явно, так как при увеличении количества пельменей температура изначально кипящей воды уменьшается все более значительно, а также конвективные и турбулентные потоки увеличивают теплообмен. При численном моделировании следует принимать во внимание ошибки, вызванные самим методом расчета.
4) Значения средней объемной доли мяса к пельменю для трех торговых марок (SZ, RE, TS) отличаются незначительно, однако значения их масс находятся в широком диапазоне (Таблица 2),

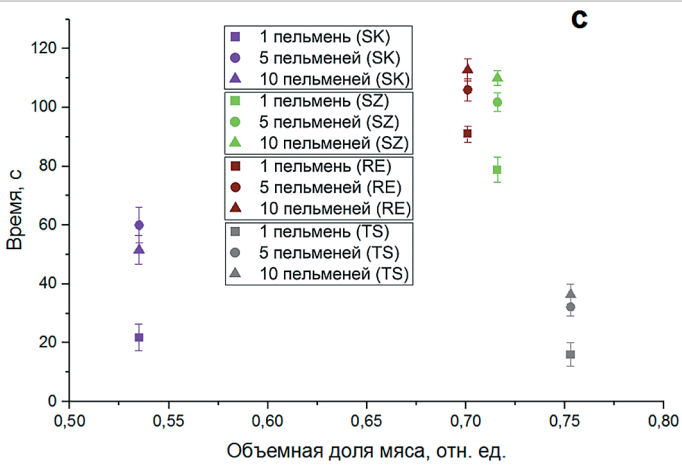


Рисунок 3c. **График зависимости средней объемной доли мяса в пельмене от времени помещения пельменей в емкость до его всплытия t_1, полученный с помощью натурных экспериментов**

Figure 3c. **Graph of the dependence of the average volume fraction of meat in a dumpling on the time of its placing into a container until its floating to the surface t_1 obtained by real experiments**

поэтому именно эта величина будет существенно влиять на время приготовления. Пельмени марок RE и SZ обладают наибольшей средней массой, что обуславливает самое продолжительное время всплытия t_1 среди рассмотренных образцов (Рисунок 3c). Пельмени торговой марки TS имеют самое высокое значение средней объемной доля мяса к пельменю, а пельмени марки SK — самое низкое. Поэтому время всплытия t_1 пельменей торговой марки SK в среднем больше, чем для пельменей торговой марки TS (Рисунок 3c). Этот результат натурных экспериментов хорошо согласуется с численными экспериментами (Рисунок 3b), однако он менее явный из-за разницы масс пельменей.

В Таблице 5 приведено время приготовления пельменей известных торговых марок на основе численных экспериментов, используя их параметры из Таблицы 2.

Полученные результаты по времени приготовления находятся в очень широком диапазоне времени (от 217,22 секунд для 1 пельменя марки SK до 663,37 секунд для 10 пельменей марки SZ) и согласуются с данными по времени приготовления пельменей из [17,35,36]. Для всех рассматриваемых пельменей наблюдается увеличение времени приготовления от количества пельменей, но незначительное. После всплытия необходимость учета массы пельменей становится более явной. Это заметно на примере разницы времени приготовления пельменей марок SK и SZ. При сопоставимых массах время приготовления пельменей марки TS в среднем больше, чем пельменей марки RE.

При этом среднее время от всплытия до готовности 1, 5, и 10 пельменей t_3 составляет около 6 минут (если рассмотреть пельмени всех марок из Таблицы 5). Следовательно, именно это время и стоит рекомендовать в качестве среднего времени готовки пельменей после их всплытия. Приведенные результаты будут полезны для пищевой промышленности.

4. Выводы

Пельмени рассматриваемых торговых марок полностью соответствуют ГОСТ 33394-2015. Анализ эмпирических и теоретических данных исследования варки пельменей выявил ряд физико-математических и технических аспектов, которыми можно пренебречь.

1) Не учитывается биохимический состав мясной начинки пельменя.
2) Не учитываются силы сопротивления, т. е. турбулентные и конвективные потоки, а также термоупругие эффекты.
3) Время всплытия пельменя со дна емкости пренебрежительно мало в сравнении с другими исследуемыми временами готовки.
4) В процессе исследования температурных полей не учитывается изменение начальных параметров пельменя: размеры, масса и плотность; теплоемкость и теплопроводность теста.
5) Процесс приготовления идет в дистиллированной воде при нормальном давлении.

В результате анализа натурных и численных экспериментов получены следующие результаты:

1) Время приготовления пельменей превышает время всплытия примерно на 6 минут, то есть после всплытия пельменей требуется около 6 минут для их полной готовности.
2) При увеличении толщины теста время приготовления увеличивается, причем зависимость нелинейная.
3) При увеличении количества пельменей время их приготовления возрастает.
4) При анализе времени приготовления пельменей стоит также учитывать их массу, так как при повышении средней массы пельменей время их приготовления увеличивается. После всплытия необходимость учета массы пельменей становится более явной.

Таблица 5. **Результаты расчета времени приготовления и времени всплытия до готовности 1, 5, 10 пельменей известных торговых марок**

Table 5. **Results of the calculation of the time of preparation and time of floating to the surface until readiness of 1, 5, 10 dumplings of well-known brands**

Физическая характеристика	Торговые марки											
	SK			SZ			RE			TS		
	Количество пельменей			Количество пельменей			Количество пельменей			Количество пельменей		
	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
Время приготовления τ, с	217,22	218,50	218,49	546,13	591,42	663,37	389,53	400,78	412,64	507,18	546,85	593,82
Время от всплытия до готовности t_3, с	195,42	158,50	166,89	467,33	489,62	553,37	298,53	294,78	299,84	491,18	514,85	557,42
Средняя объемная доля мяса в пельменях V_M/V, отн. ед.	0,535			0,716			0,701			0,753		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Глинкина, И. М., Рыжков, Е. И. (2020). Анализ современного состояния российского рынка мясных полуфабрикатов в тесте. *Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции*, 1, 28–32. [Glinkina, I. M., Ryzhkov, E. I. (2020). Analysis of the current state of the Russian market of semi-finished meat products in dough. *Technologies and Commodity Science of Agricultural Products,* 1, 28–32. (In Russian)]
2. Курбангалиева, А. А. (2021). Экспорт российской готовой мясной продукции на рынок Казахстана: возможности и вызовы. *Теория и практика мировой науки*, 4, 26–27. [Kurbangalieva, A. A. (2021). Export of Russian finished meat products to the Kazakhstan market: Opportunities and challenges. *Theory and Practice of World Science*, 4, 26–27. (In Russian)]
3. Embling, R., Neilson, L., Mellor, C., Durodola, M., Rouse, N., Haselgrove, A. et al. (2024). Exploring consumer beliefs about novel fortified foods: A focus group study with UK-based older and younger adult consumers. *Appetite,* 193, Article 107139. https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.107139
4. O'shea, P. (2015). Dodgy dumplings and lethal liver: Risk, food terrorism, and Sino-Japanese relations. *The Pacific Review,* 28(2), 303–321. https://doi.org/10.1080/09512748.2014.995128
5. Li, Z., Wang, L., Chen, Z., Yu, Q., Feng, W. (2018). Impact of protein content on processing and texture properties of waxy rice flour and glutinous dumpling. *Journal of Cereal Science,* 81, 30–36. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.03.005
6. Zhu, Q., Liang, Y., Shao, Z. (2015). Dumpling cooking-modeling and simulation. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 439–444. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.007
7. Varlamov, A., Zhou, Z., Chen, Y. (2018). Boiling, steaming or rinsing? (physics of the Chinese cuisine). *arXiv preprint arXiv:1806.09912*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.09912
8. Deng, L. (2013). Kinetic functions, optimizing model and definition of «Huoho» for Chinese cooking. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(4), 278–284. (In Chinese)
9. Chavez-Gonzalez, M. L., Balagurusamy, N., Aguilar, C. (2019). Advances in food bioproducts and bioprocessing technologies. CRC Press, 2019. https://doi.org/10.1201/9780429331817
10. Sheen, S., Huang, L., Hwang, C.-A. (2024) Numerical simulation of heat transfer during meat ball cooking and microbial food safety enhancement. *Journal of Food Science*, 89(3), 1632–1641. https://doi.org/10.1111/1750–3841.16949

11. Park, J. H., Kim, E. M. (2013). Quality characteristics of dumpling shell added with white lotus leaf powder. *Culinary Science and Hospitality Research*, 19(2), 1–10. https://doi.org/10.20878/cshr.2013.19.2.001 (In Korean)
12. Kim, J.-G., Kim, J.-S. (2013). Changes of internal temperature during the cooking process of dumpling (Mandu). *Korean Journal of Human Ecology*, 22(3), 485–492. https://doi.org/10.5934/kjhe.2013.22.3.485 (In Korean)
13. Фоменко, Е. В., Нугманов, А. Х. Х. (2019). Управление скоростью перемещения вязкоупругих материалов в цилиндрическом канале шнекового питателя формующих устройств. *Техника и технология пищевых производств*, 49(1), 113–119. [Fomenko, E. V., Nugmanov, A. Kh. Kh. (2019). Velocity control of visco-elastic materials movement in the cylindrical channel of the grinder feed screw of the former. *Food Processing: Techniques and Technology,* 49(1), 113–119. (In Russian)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-113-119
14. Olivera, D. F., Salvadori, V. O. (2008). Finite element modeling of food cooking. *Latin American Applied Research*, 38(4), 377–383.
15. Purlis, E., Salvadori, V.O. (August 14–18, 2005). *Meat cooking simulation by finite elements.* 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering. Rio de Janeiro, 2005.
16. Park, S., An, J., Lee, J. (2023). Consumer acceptability and texture analysis of frozen dumplings using different cooking methods. *Food Science and Biotechnology*, 33(4), 877–887. https://doi.org/10.1007/s10068-023-01389-9
17. Tang, J. (2015). Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality. *Journal of Food Science,* 80(8), E1776–E1793. https://doi.org/10.1111/1750-3841.12959
18. Mortimer R. G. (2008). Physical Chemistry. Academic Press, 2008.
19. Горбачев, В. В., Никитин, И. А., Велина, Д. А., Муталлибзода, Ш., Балашова, М. С. (2022). Оценка потребительских предпочтений россиян: «Ловушка среднего рациона». *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология,* 6(390), 90–98. [Gorbachev, V. V., Nikitin, I. A., Velina, D. A., Mutallibzoda, SH., Balashova, M. S. (2022). Assessment of consumer preferences of Russians: "Average ration trap". *Izvestiya Vuzov. Food Technology,* 6(390), 90–98. (In Russian)]
20. Tikhonov, A. N., Samarskii, A. A. (2013). Equations of mathematical physics. Edwin Mellen Press, 2013.
21. Ren, Q., Zhu, X., Li, J., Han, J., Fang, K. (2023). Heat and mass transfer model for pork carcass precooling: Comprehensive evaluation and optimization. *Food and Bioproducts Processing*, 138, 70–85. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.01.004
22. Беляева, М. А. (2004). Математические описания денатурации миозина, актина, тропомиозина, миоглобина мяса в процессе тепловой обработки. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6, 63–65. [Belyaeva, M. A. (2004). Mathematical descriptions of denaturation of meat myosin, actin, tropomyosin, myoglobin in the process of heat treatment. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 5–6, 63–65. (In Russian)]
23. Spiess, W., Walz, E., Nesvadba, P., Morley, M., Haneghem, Salmon, D.R. (2001). Thermal conductivity of food materials at elevated temperatures. *High Temperatures — High Pressures*, 33, 693–697.
24. Engchuan, W., Jittanit, W. (2013). Electrical and thermo-physical properties of meat ball. *International Journal of Food Properties*, 16(8), 1676–1692. https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604891
25. Карпухин, В. А., Вишнева, Н. В. (2014). Верификация модели взаимодействия ультразвуковой колебательной системы с тканями пародонта. *Машиностроение и компьютерные технологии,* 1, 70–82. [Karpushin, V. A., Vishneva, N. V. (2014). Verification of an interaction model of an ultrasonic oscillatory system with periodontal tissues. *Mechanical Engineering and Computer Technologies*, 1, 70–82. (In Russian)]
26. Mesalhy, O., Lafdi, K., Elgafy, A., Bowman, K. (2005). Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. *Energy Conversion and Management,* 46(6), 847–867. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.010
27. Sun, W., Ma, H., Qu, W. (2024). A hybrid numerical method for non-linear transient heat conduction problems with temperature — dependent thermal conductivity. *Applied Mathematics Letters,* 148, Article 108868. https://doi.org/10.1016/j.aml.2023.108868
28. Reddy, S. R., Dulikravich, G. S. (2019). Simultaneous determination of spatially varying thermal conductivity and specific heat using boundary temperature measurements. *Inverse Problems in Science and Engineering,* 27(11), 1635–1649. https://doi.org/10.1080/17415977.2019.1578352
29. Beckers, K. F., Koch, D. L., Tester, J. W. (2015). Slender-body theory for transient heat conduction: Theoretical basis, numerical implementation and case studies. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* 471(2184), Article 20150494. https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0494
30. Harvey, A. H., Hrubý, J., Meier, K. (2023). Improved and always improving: Reference formulations for thermophysical properties of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 52(1), Article 011501. https://doi.org/10.1063/5.0125524
31. Li, X., Lv, Y., Chen, Y., Chen, J. (2016). A study on the relationship between rheological properties of wheat flour, gluten structure, and dumpling wrapper quality. *International Journal of Food Properties*, 19(7), 1566–1582. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.951894
32. Yasin, M., Hina, S., Naz, R. (2023). A modern study on peristaltically induced flow of Maxwell fluid considering modified Darcy's law and Hall effect with slip condition. *Alexandria Engineering Journal*, 76, 835–850. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.074
33. Zhang, L., Doursat, C., Vanin, F. M., Flick, D., Lucas, T. (2017). Water loss and crust formation during bread baking, Part I: Interpretation aided by mathematical models with highlights on the role of local porosity. *Drying Technology*, 35(12), 1506–1517. https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1260029
34. Patil, P. N., Sawant, D. V., Deshmukh, R. N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water — A review. *International Journal of Environmental Sciences,* 3(3), 1194–1207.
35. Альшевский, Д. Л., Смирнова, Д. О. (2021). Разработка рецептуры мясных полуфабрикатов с использованием растительного, безглютенового сырья. *Наука и Образование*, 4(2). Статья 300. [Alshevsky, D. L., Smirnova, D. O. (2021). Development of a recipe for semi-finished meat products using vegetable, gluten-free raw materials. *Science and Education*, 4(2), Article 300. (In Russian)]
36. Пангачева, Ю. С., Есепенок, К. В. (2024). Оценка качества пельменей из мяса индейки, реализуемые в розничных сетях города Москвы. *Товаровед продовольственных товаров*, 4, 215–219. [Pangacheva, Yu.S., Esepenok, K. V. (2024). Assessing the quality of turkey meat pelmeni sold in Moscow retail chains. *Food Products Commodity Expert*, 4, 215–219. (In Russian)] https://doi.org/10.33920/igt-01-2404-04

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
Макаров Валерий Николаевич — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физики и методики преподавания физики физического факультета, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7–919–868–23–56 E-mail: makarsvet13@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5749-1427 * автор для контактов	**Valery N. Makarov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Faculty of Physics, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7–919–868–23–56 E-mail: makarsvet13@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5749-1427 * corresponding author
Садыков Александр Равильевич — ассистент, кафедра физики и методики преподавания физики физического факультета, аспирант, кафедра прикладной математики института математики и информационных технологий, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7–901–087–10–57 E-mail: aleksandr.sadykov.2012@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-4087-8104	**Aleksandr R. Sadykov**, Assistant, Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Postgraduate student, Department of Applied Mathematics, Institute of Mathematics and Information Technologies, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7–901–087–10–57 E-mail: aleksandr.sadykov.2012@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0001-4087-8104
Четверикова Дарья Константиновна — студент, кафедра химии химико-биологического факультета, Оренбургский государственный университет 460018, Оренбургская область, Оренбург, просп. Победы, 13 Тел.: +7–906–844–31–32 E-mail: chetverikova_dar@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0002-9074-3205	**Daria C. Chetverikova**, Student, Department of Chemistry, Faculty of Chemistry and Biology, Orenburg State University 13, Pobedy avenue, 460018, Orenburg, Russia Tel.: +7–906–844–31–32 E-mail: chetverikova_dar@mail.ru ORCID: http://orcid.org/0009-0002-9074-3205
Критерии авторства	**Contribution**
В. Н. Макаров руководил проектом, проводил анализ теоретических и экспериментальных данных, формировал рукопись статьи. **А. Р. Садыков** формировал литературный обзор, производил численное моделирование и численные эксперименты. **Д. К. Четверикова** получала экспериментальные данные.	**V. N. Makarov** led the project, analyzed theoretical and experimental data, and formed the manuscript of the article. **A. R. Sadykov** formed the literature review, performed numerical modeling and numerical experiments. **D. C. Chetverikova** obtained experimental data.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490

Поступила 12.08.2024
Поступила после рецензирования 27.09.2024
Принята в печать 30.09.2024
© Топникова Е. В., Мягконосов Д. С., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г., 2024

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

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА

Топникова Е. В., Мягконосов Д. С.*, Абрамов Д. В., Кашникова О. Г.

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
пастеризация, тепловая обработка, сывороточные белки, реакция Майяра, флюориметрия

АННОТАЦИЯ

Предложен метод определения интенсивности тепловой нагрузки при пастеризации молока основанный на преобразовании содержащихся в молоке продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированных аминокислот) в интенсивно окрашенные продукты финальной стадии реакции Майяра (меланоды). Интенсивность окраски продуктов измеряют колориметрически. Для проведения анализа из молока изготавливают очищенный от свободной лактозы препарат казеина, высушивают его и измельчают до частиц размером 500–800 мкм. Препарат казеина выдерживают при 100 °С в течение 5 ч для формирования меланоидов. Измеряют интенсивность окрашивания препаратов казеина по цветовой шкале CIE L^* a^* b^* и вычисляют критерий общего цветового отличия ΔE по величине цветовых критериев L^* a^* b^* до и после тепловой обработки препаратов казеина. Проведенные исследования образцов пастеризованного молока подтвердили физическую природу окрашивания порошков казеина, состоящую в наличии в них меланоидов, содержание которых было пропорционально интенсивности пастеризации образцов молока.

Received 12.08.2024
Accepted in revised 27.09.2024
Accepted for publication 30.09.2024
© Topnikova E. V., Myagkonosov D. S., Abramov D. V., Kashnikova O. G., 2024

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

COLORIMETRIC METHOD FOR ESTIMATING THE INTENSITY OF HEAT LOAD DURING MILK PASTEURIZATION

Elena V. Topnikova, Dmitry S. Myagkonosov*, Dmitry V. Abramov, Olga G. Kashnikova

All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheesemaking, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEY WORDS:
pasteurization, heat treatment, whey proteins, Maillard reaction, fluorimetry

ABSTRACT

The authors proposed a method for determining the intensity of heat load during milk pasteurization based on the transformation of the products of the initial stage of the Maillard reaction (lactosylated amino acids) contained in milk into intensely colored products of the final stage of the Maillard reaction (melanodes). The color intensity of products is measured by the colorimetric method. To carry out the analysis, a casein preparation purified from free lactose is made from milk, dried and crushed into particles with a size of 500–800 microns. The casein preparation is kept at 100 °C for 5 hours to form melanoids. The color intensity of casein preparations is measured on the CIE L^* a^* b^* color scale and the criterion of total color difference ΔE is calculated by the value of the L^* a^* b^* color criteria before and after heat treatment of casein preparations. The conducted studies of pasteurized milk samples confirmed the physical nature of the coloration of casein powders, consisting in the presence of melanoids in them, the content of which was proportional to the intensity of pasteurization of milk samples.

1. Введение

В промышленном производстве питьевого молока в основном используются следующие технологии тепловой обработки: высокотемпературная кратковременная пастеризация (72 °С, 30 с — 80 °С, 15 с), ультрапастеризация (135 °С, 10 с — 150 °С, 1 с), стерилизация в таре (110 °С, 20 мин — 125 °С, 3 мин). Учитывая важность сохранения от разрушительного действия температуры веществ молока для повышения его биологической ценности, в производстве питьевого термически обработанного молока в последние годы начала получать распространение технология Extended Shelf Life (ESL). Она предполагает бактофугирование и пастеризацию, микрофильтрацию и пастеризацию, либо одноступенчатую ультравысокотемпературную (УВТ)-обработку (120 °С, 10 сек или 140 °С, 1 сек) в сочетании с асептической упаковкой [1,2].

Тепловая обработка молока, наряду с обеспечением микробиологической безопасности продукта, направлена на увеличение срока хранения, что повышает вероятность его продажи и исключает риск порчи продукта до его потребления покупателем. Это позволяет снизить количество выбрасываемой и теряемой пищи, что является глобальной мировой задачей, выполняемой под эгидой ООН. Поиск способов увеличения срока годности молока, отвечающих требованиям безопасности, привел к постоянному росту производства молока с повышенными сроками годности (стерилизованного, ультрапастеризованного и ESL) начиная с 1960-х годов [3].

Ультравысокотемпературная (УВТ) технология должна совмещать требования максимального снижения бактериальной обсемененности при минимальном разрушении витаминов и других ценных веществ молока. При производстве ультрапастеризованного молока под действием температуры происходят и нежелательные реакции, ведущие к снижению его биологической ценности: денатурация сывороточных белков, лактозилирование белков, ведущее к потере незаменимой аминокислоты лизин, дефосфорилирование, дезаминирование, формирование комплексов денатурированных белков в процессе хранения (повышение вязкости продукта), образование не перевариваемой в организме лактулозы, разрушение витаминов (по большей части витамина С и фолиевой кислоты), переход солей молока в нерастворимое состояние [4,5]. Желирование УВТ-молока в процессе хранения связано с полимеризацией казеинов и сывороточных белков в ходе реакции Майяра, а также со снижением поверхностного заряда молекул казеина [6].

Реакция Майяра, проявляющаяся в образовании комплексов между лактозой и аминогруппами аминокислот, начинает протекать при термообработке УВТ-молока и продолжает развиваться в процессе его хранения [7]. Исходя из этого, важно минимизировать реакцию Майяра на стадии производства. Снизить интенсивность тепловой обработки возможно, в т. ч. за счет использования аппаратов с прямым контактным нагревом молока паром. Инновационная технология прямого нагрева паром (Innovative steam injection (ISI)) сочетает более высокую температуру (150–200 °С) при коротком

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **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. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490

FOR CITATION: **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. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490

времени воздействия (менее 0,1 секунды) в сравнении с традиционными режимами [8].

Прямой нагрев паром, несмотря на минимизацию разрушения полезных веществ молока, характеризуется более низкой энергетической эффективностью по сравнению с косвенным нагревом. При косвенном нагреве возврат тепловой энергии составляет более 90%, а при прямом нагреве — не более 50%. Поэтому системы УВТ-обработки с теплообменниками, более разрушительно действующие на полезные вещества молока, имеют более широкое применение. Несмотря на меньшую долю рынка, стерилизация в таре (стеклянные бутылки) продолжает использоваться в производстве молока длительного хранения. Это обусловлено, в первую очередь, экономической выгодой: стоимость оборудования для стерилизации ниже, чем для производства ультрапастеризованного молока [3].

Важно контролировать интенсивность тепловой нагрузки при производстве УВТ-молока. Для этого предложено использовать интегрированную оценку температурно-временного воздействия (time temperature integrator (TTI)) [9]. Индикаторы I типа включают компоненты молока, разрушающиеся при температурном воздействии (белки, витамины, ферменты). Индикаторы II типа включают вещества, изначально отсутствующие в молоке и формирующиеся в результате теплового воздействия (продукты реакции Майяра, продукты изомеризации лактозы). Более эффективную оценку интенсивности теплового воздействия на молоко можно получить при комплексном сравнении индикаторов двух типов.

Для контроля тепловой нагрузки при промышленном производстве молока предложено использовать оценку содержания различных веществ, относящихся к TTI первого и второго типов. Данный подход исследуется различными научными группами. Подробный обзор методов оценки тепловой нагрузки имеется в недавних обзорах [10,11].

Часто исследователи предлагают использовать только 3 показателя тепловой нагрузки, связанные с содержанием химических веществ разной природы: содержание неденатурированных белков сыворотки, фурозина и лактулозы [12,13].

Наиболее универсальным критерием оценки величины тепловой нагрузки можно считать содержание фурозина, который формируется в молоке в широком диапазоне температурного воздействия [14]. Содержание фурозина коррелирует с содержанием лактулозы ($r^2 > 0,99$) [15]. При этом лактулоза отсутствует в пастеризованном молоке [7].

Перспективным направлением является комбинированный спектрофлюориметрический метод, позволяющий одновременно определять содержание как растворимых сывороточных белков (по интенсивности флюоресценции триптофана), так и продуктов реакции Майяра (по интенсивности флюоресценции производных пиррола и имидазола) [16,17,18,19].

По результатам обзора литературы можно сделать вывод, что к настоящему времени разработано и применяется множество методов измерения тепловой нагрузки, основанных на разных критериях оценки. Однако такие методы, как правило, требуют дорогостоящей аппаратуры, высокой квалификации персонала, а также зачастую отличаются длительностью выполнения анализа. Имеется необходимость в быстром и малозатратном методе инструментального контроля интенсивности тепловой нагрузки для пастеризованного, ультрапастеризованного и стерилизованного молока. Ранее авторами был предложен быстрый и простой в реализации турбидиметрический метод для оценки тепловой нагрузки при пастеризации молока [20]. Недостатком указанного метода является его низкая чувствительность применительно к образцам молока с высокой степенью тепловой нагрузки, которые содержат малое количество растворимых сывороточных белков. Метод, основанный на оценке содержания продуктов начальной стадии реакции Майяра, будет лишен этого недостатка и позволит проводить объективную оценку интенсивности тепловой нагрузки для образцов молока в широком диапазоне температур тепловой обработки.

Возможным вариантом реализации такого быстрого и малозатратного метода оценки интенсивности тепловой нагрузки является применение подхода, основанного на преобразовании лактозилированных аминокислот в окрашенные продукты поздней стадии реакции Майяра (меланоиды), интенсивность окрашивания которых будет пропорциональна их содержанию в продукте. По интенсивности окрашивания можно будет судить об интенсивности тепловой обработки молока. Этот подход может стать альтернативой традиционно практикуемому методу перевода продуктов ранней стадии реакции Майяра посредством кислотного гидролиза в фурозин с последующим анализом методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [21,22], либо методом капиллярного электрофореза [23,24].

Оценка интенсивности реакции Майяра по интенсивности окрашивания образцов была проведена в работе Gómez-Narváez et al. [25]. В работе оценивали содержание фурозина, гидроксиметилфурфурола и интенсивность окрашивания образцов при нагревании лиофильно высушенных порошков сыворотки (~11% белка, ~78% лактозы) при температуре 60, 75 и 90 °C и при продолжительности от 2 до 40 мин. Было установлено, что интенсивность окрашивания образцов, определяемая по цветовой шкале CIE L* a* b*, была пропорциональна температуре и продолжительности теплового воздействия и резко возрастала при повышении температуры от 75 до 90 °C. Более высокая концентрация в образцах продуктов начальной и промежуточной стадии реакции Майяра, таких как фурозин и гидроксиметилфурфурол, приводила к более высокому выходу окрашенных компонентов. Показатели окрашивания L* a* b* слабо коррелировали с содержанием продукта начальной стадии реакции Майяра — фурозина ($r < 0,65$) — и при этом сильно коррелировали с содержанием гидроксиметилфурфурола — продукта промежуточной стадии реакции Майяра ($r > 0,80$).

Результаты, полученные в работе Gómez-Narváez et al. [25], были основаны на системах, содержащих лактозу. В связи с этим в процессе тепловой обработки образцов происходили как реакции формирования продуктов начальной стадии реакции Майяра за счет реакции аминогрупп аминокислот с лактозой, так и реакции, ведущие к преобразованию лактозилированных аминокислот в окрашенные продукты поздней стадии реакции Майяра. Тепловая обработка извлеченных из молока белков после предварительной их очистки от свободной лактозы позволит провести реакцию формирования меланоидов только из содержащихся в молоке лактозилированных белков, которая будет пропорциональна интенсивности тепловой нагрузки при пастеризации молока. Такой подход находит подтверждение в работах Rizzi [26], Burton [27], van Boekel [28] и ряда других исследователей, указывающих на пропорциональную зависимость между количественным содержанием продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированных аминогрупп аминокислот) и образующихся из них на финальной стадии реакции Майяра меланоидов.

На основании этого была выдвинута гипотеза о том, что оценку содержания продуктов начальной стадии реакции Майяра в молоке можно провести через их перевод из изначально бесцветного состояния в форму продуктов финальной стадии реакции Майяра, имеющих интенсивную окраску, которую можно измерить с помощью специальных приборов (колориметров).

Предлагаемый колориметрический метод оценки тепловой нагрузки может быть использован в целях:

- объективного контроля тепловой нагрузки на молоко при работе оборудования, что необходимо для контроля и наладки технологического процесса производства в целях поддержания качества выпускаемой продукции [2,29];
- идентификации и разделения пастеризованного молока и ультрапастеризованного молока. Поскольку при интенсивной тепловой обработке молоко теряет часть полезных веществ (витамины, растворимый кальций и ряд других), важно, чтобы потребитель имел точную информацию о свойствах приобретаемого продукта [30];
- определения наличия примеси в питьевом молоке повторно пастеризованного молока («сверхпастеризация» — признак возврата из торговли и повторной пастеризации) [31].

Целью настоящего исследования является разработка простого колориметрического метода для определения интенсивности тепловой обработки молока. Метод основан на оценке содержания продуктов ранней стадии реакции Майяра и не требует сложного дорогостоящего оборудования.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

В работе были использованы образцы сырого молока (3 образца от одного поставщика-производителя — ООО «АгриВолга» (Ярославская область, Угличский район, д. Бурмасово)), а также приобретенные в розничной торговле образцы пастеризованного молока (6 образцов от 5 разных производителей) и ультрапастеризованного молока (15 образцов от 9 разных производителей).

Для анализов использовали хинин безводный (Sigma-Aldrich, Швейцария). Прочие использованные реактивы имели квалификацию «хч».

2.2. Методы

2.2.1. Методы исследования фракции сывороточных белков молока

Массовую долю сывороточных белков молока, получаемую после осаждения казеиновой фракции молока раствором уксусной кислоты и отделения осажденного казеина с помощью фильтрации, определяли методом Къельдаля по ГОСТ 34536-2019[1].

Содержание сывороточных белков в пробе для измерения флюоресценции проводили спектрофотометрическим методом по величине поглощения на длине волны 280 нм [32]. Оптическую плотность образцов измеряли в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 10 мм на спектрофотометре PB2201 (ЗАО «Спектроскопия, оптика и лазеры — авангардные разработки», Республика Беларусь). Содержание сывороточных белков рассчитывали по методу Mahmoud et al [33] с помощью построенной калибровочной зависимости между величиной оптической плотности и содержанием сывороточных белков молока, определенным по ГОСТ 34536-2019.

2.2.2. Методы исследования флюоресценции

Измерение флюоресценции проводили в экстрактах сывороточных белков. Для приготовления экстракта молоко смешивали в соотношении 1:10 с 0,1 N ацетатным буфером, имеющим pH 4,6. Смесь выдерживали для формирования хлопьев в течение 10–15 мин, после чего фильтровали на фильтровальной бумаге «тип 102» (стандарт КНР GB/T 1914-2007[2]), а затем на фильтре из нейлона с размером пор 0,45 мкм (Tianjin Jinteng Experiment Equipment Co., ltd, КНР). Приготовление пробы для измерения флюоресценции и измерение флюоресценции проводили по методу Morales et al. [34]: фильтрат из сыворотки разводили деионизированной водой в соотношении 1:10 в целях получения оптически прозрачного образца. Измерения проводились при длине волны возбуждающего излучения (excitation wavelength) 347 нм и при длине волны испускаемого флюоресцентного излучения (emission wavelength) 415 нм при размере спектральной щели 2 нм. Для получения сравнимого результата измерений, не зависящего от марки используемого спектрофлюориметра, величину флюоресценции на приборе стандартизировали с помощью раствора хинина сульфата концентрации 0,2 мг/дм^3 [35]. Измерения проводили на спектрофлюориметре SFR100 (BAIRD-ATOMIC, Великобритания) в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 10 мм. Результат рассчитывали как среднее по трем последовательным результатам измерений.

2.2.3. Методы исследования окрашивания

Измерение интенсивности окрашивания препаратов казеина проводили в цветовом пространстве CIE L^* a^* b^* [36] при помощи колориметра модели NR20XE (SHENZHEN THREENH TECHNOLOGY CO., LTD, Китай) 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, Китай), имеющую геометрию кюветы для образца: диаметр 21 мм, глубина 4 мм. Порошок выравнивали при помощи шпателя.

Величину общего цветового отличия ΔE рассчитывали по формуле [37]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(L_1^* - L_0^*\right)^2 + \left(a_1^* - a_0^*\right) + \left(b_1^* - b_0^*\right)} \quad (1),$$

где L^* — интенсивность светлого тона;

a^* — интенсивность красного тона окрашивания;

b^* — интенсивность желтого тона окрашивания.

Нижними индексами «1», отмечены показатели образцов препаратов казеина после тепловой обработки, индексами «0» — показатели образца сравнения.

2.2.4. Микроскопические исследования

Микроскопические исследования препаратов казеина проводили методом световой микроскопии в отраженном свете. Фотоснимки были сделаны на цифровую фотокамеру Canon EOS600D. Коррекцию фотографий производили с помощью программного пакета Digital Photo Professional software v.4.5 (Canon Inc., Япония).

2.2.5. Процесс тепловой обработки молока

Тепловую обработку молока, в соответствии с планом эксперимента, проводили следующим образом. Сырое молоко обезжиривали на сепараторе-сливкоотделителе для получения обезжиренного молока с массовой долей жира около 0,05%. Полученное молоко подвергали термической обработке при режимах, определенных планом эксперимента. Молоко в количестве 100 см^3 помещали в конические колбы номинальным объемом 100 см^3 и нагревали на кипящей водяной бане до требуемой температуры. После установления температуры колбы переносили на водяную баню UT-4300 («ПромЭкоЛаб», Россия) и выдерживали необходимое время при температуре пастеризации. После завершения пастеризации молоко быстро охлаждали на водяной бане со льдом до температуры около 40 °C. Температуру образцов в процессе термообработки контролировали при помощи цифрового термометра Hanna CheckTemp HI 98501 (Hanna Instruments Inc., США).

2.2.6. Приготовление очищенных от лактозы препаратов казеина

Из термически обработанных образцов молока готовили 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%-й уксусной кислоты, перемешивали и центрифугировали при 6 000 g в течение 5 мин. Надосадок сливали, а казеиновый осадок промывали деионизированной водой. Для этого в стакан с осадком доливали воду, доводя массу содержимого центрифужной пробирки до 45,0 ± 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 45,0 ± 0,1 г и центрифугировали при 6 000 g в течение 5 мин. Надосадок отбрасывали. Проводили три цикла промывания. Получали очищенный от свободной лактозы казеиновый сгусток. Необходимое количество циклов промывания было установлено на предыдущей серии экспериментов (данные не приведены).

Промытый казеиновый сгусток высушивали в сушильном шкафе под током воздуха при температуре 40 °C в течение 2 ч. Высушенный казеин размалывали на ручной мельнице R3 Coffee Grinder (MHW-3BOMBER, Китай) с установленным зазором жерновов ~0,8 мм. Полученный порошок казеина просеивали через сито с размером пор 850 мкм, а просеянный порошок — через сито с размером пор 300 мкм. Фракцию размером менее 300 мкм отбрасывали.

2.2.7. Процесс тепловой обработки препаратов казеина и измерение окрашивания

Для компенсации влияния конструкции нагревательных шкафов на интенсивность нагревания образцов и их окрашивания, каждый образец препарата казеина разделяли на две части. Тепловую обработку препаратов казеина проводили с выдерживанием в шкафах двух разных марок: СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И5М (НПФ Термикс, Россия) и ГП-20-Ох ПЗ (Касимовский приборный завод, Россия). Величину общего цветового отличия ΔE рассчитывали как среднее значение уровней цветового отличия (ΔE) образцов, термически обработанных в двух разных шкафах.

2.2.8. Методы статистического анализа

Исследование было проведено по плану полного факторного эксперимента: в качестве влияющих факторов были взяты две непрерывных переменных «Температура» и «Продолжительность нагревания», значения которых варьировали на трех уровнях.

План эксперимента приведен в Таблице 1.

Таблица 1. **План эксперимента**

Table 1. **Experimental design**

Температура, °C	Продолжительность нагревания, мин
75	0,5
	5,5
	10,5
85	0,5
	5,5
	10,5
95	0,5
	5,5
	10,5

Выбор диапазонов температурно-временного воздействия был сделан исходя из применяемых в промышленности режимов тепловой обработки молока. В частности, режим 75 °C 0,5 мин используется при производстве питьевого пастеризованного молока, режим 85 °C 5 мин при — на стадии тепловой обработки, проводимой при производстве сухого цельного молока, 95 °C 10 мин — при тепловой обработке молока, предназначенного для изготовления йогурта [3].

[1] ГОСТ 34536-2019 Молоко и молочная продукция. Определение массовой доли сывороточных белков методом Кьельдаля. М.: Стандартинформ, 2019. — 8 с.

[2] GB/T 1914-2007. Chemical analytical filter paper. National Standards of People's Republic of China.

Эксперимент был выполнен в трех повторностях. Математическая обработка данных осуществлялась с применением программных пакетов Microsoft Excel и Statsoft Statistica (v. 5.5). Оценку влияния факторов «Температура» и «Продолжительность нагревания» на переменные отклика проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Оценку отличия по окрашиванию между вариантами препаратов казеина проводили методом однофакторного дисперсионного анализа методом парных сравнений Тьюки. Достоверность отличий сравниваемых вариантов принималась при уровне статистической значимости $p < 0,05$.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Тепловая обработка молока

Динамика изменения температуры образцов молока при нагревании и охлаждении приведена на Рисунке 1. Образцы молока были подвергнуты тепловой обработке в соответствии с планом эксперимента (Таблица 1). Температура образцов на этапе выдержки в водяной бане варьировала в диапазоне не более ± 0,7 °C от номинальной температуры, предусмотренной планом эксперимента. Динамика нагревания и охлаждения образцов зависела от целевой температуры пастеризации. В частности, температура 75 °C достигалась за время не более 3 мин, температура 85 °C — за время < 4,5 мин, температура 95 °C — за время < 7 мин (Рисунок 1 А). Продолжительность охлаждения образцов варьировала в меньшей степени (Рисунок 1 Б).

3.2. Микроскопические исследования препаратов казеина

Однородность образцов по размерам частиц является необходимым условием получения сравнимых результатов при оценке цветового тона и интенсивности окрашивания образцов, имеющих форму порошка [37,38]. Однородность состава препарата казеина контролировали с помощью микроскопа. Фото внешнего вида частиц препаратов казеина, полученное под микроскопом, представлено на Рисунке 2.

Полученные порошки препаратов казеина имели однородную структуру. Размер основной доли частиц находился в диапазоне от 500 до 800 мкм. Таким образом, требование по однородности структуры порошкообразных материалов, необходимых для получения сравнимых результатов при их колориметрическом анализе, было достигнуто.

3.3. Тепловая обработка препаратов казеина

Для преобразования содержащихся в составе препаратов казеина лактозилированных групп аминокислот, являющихся продуктом начальной стадии реакции Майяра в меланоиды, являющиеся продуктами финальной стадии реакции Майяра, препараты казеина подвергали нагреванию до температуры 100, 125 или 150 °C, с последующим выдерживанием в нагретом состоянии.

В процессе экспериментов была проведена оценка влияния температуры 100, 125 и 150 °C на динамику изменения окрашивания препаратов казеина, оцениваемому по критерию ΔE (общее цветовое отличие). При расчете ΔE, в качестве образца сравнения использовался тот же самый препарат казеина не подвергнутый тепловой обработке. Динамика изменения окрашивания образцов, выдерживаемых при разных температурах в течение 5 ч, представлена на Рисунке 3.

Режимы, с выдерживанием при 125 °C и 150 °C были отклонены, т. к. при таких температурах происходило изменение окрашивания (побурение) препаратов казеина, полученных из сырого молока. Поскольку казеин из сырого молока не содержит в себе аминокислот с лактозилированными группами, то его побурение не может происходить вследствие реакции Майяра. Причиной побурения, вероятно, является процесс окисления кислородом (обугливание). По этой причине для инициации реакции Майяра была выбрана температура 100 °C, при которой изменения окрашивания препарата казеина из сырого молока после 1 ч выдержки не происходит (статистически достоверные отличия по уровню ΔE между разными временными точками отсутствуют на уровне значимости $p < 0,05$). Незначительное изменение окрашивания препаратов казеина после 1 ч выдержки при 100 °C связано с выпариванием остаточной влаги из образца.

Для препарата казеина, полученного из ультрапастеризованного молока, окрашивание стабилизируется к 4 ч. Отсутствует статистически достоверное отличие по величине ΔE образцов казеина после 4 и 5 ч выдержки при 100 °C (тест Тьюки, $p < 0,05$). Для получения надежного результата формирования окрашивания при 100 °C была выбрана продолжительность тепловой обработки образцов, равная 5 ч.

3.4. Исследование показателей пастеризованного молока

Изготовленные согласно плану эксперимента (Таблица 1) образцы пастеризованного молока были исследованы на содержание растворимых сывороточных белков, на величину флюоресценции продуктов промежуточной стадии реакции Майяра и на интенсивность окрашивания препаратов казеина, выделенных из этих образцов молока.

Для формирования окрашивания препараты казеина были выдержаны в сушильном шкафу в течение 5 ч при 100 °C в соответствии с процедурой, описанной в разделе 2.2.7. Внешний вид препаратов казеина, полученных из образцов пастеризованного молока до и после выдержки при 100 °C представлен на Рисунке 4.

Для установления влияния факторов эксперимента на переменные отклика, являющиеся индикаторами тепловой нагрузки (содержание растворимых сывороточных белков, содержание флюоресцирующих продуктов промежуточной стадии реакции Майяра, интенсивность окрашивания препаратов казеина), был проведен дисперсионный анализ данных. Результаты дисперсионного анализа представлены в Таблице 2.

Графики, визуализирующие влияние факторов эксперимента на переменные отклика, представлены на Рисунке 5.

Прямая (линейная) зависимость индикатора тепловой нагрузки от температуры и продолжительности теплового воздействия свидетельствует о точной оценке интенсивности термообработки, даваемой данным индикатором. Наличие квадратичной (нелинейной) зависимости указывает на искаженную связь между характеристикой уровня тепловой нагрузки, даваемой данным индикатором, и реальным уровнем тепловой нагрузки. На основании результатов дисперсионного анализа, приведенных в Таблице 2, можно сделать выводы о точности исследованных индикаторов тепловой нагрузки.

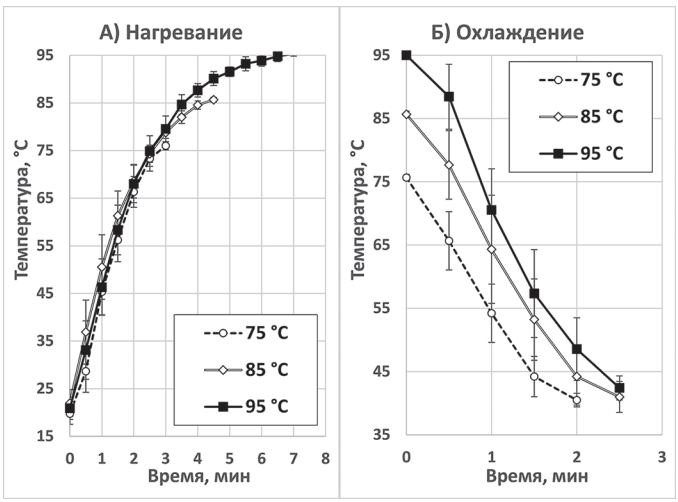


Рисунок 1. **Динамика изменения температуры при нагревании образцов до достижения температуры пастеризации и охлаждении образцов. Данные представлены в формате «среднее ± стандартное отклонение» (n = 3)**

Figure 1. **Dynamics of the change in temperature upon heating the samples to the pasteurization temperature and cooling the samples. Data are presented as mean ± standard deviation (n = 3)**

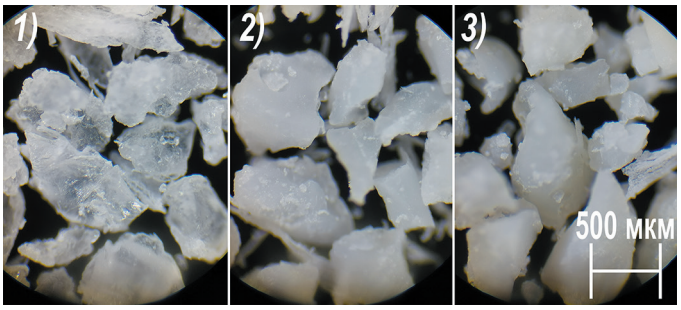


Рисунок 2. **Внешний вид частиц в препаратах казеина, полученных: 1) из сырого обезжиренного молока; 2) из пастеризованного молока; 3) из ультрапастеризованного молока**

Figure 2. **Appearance of particles in the casein preparations obtained: 1) from raw nonfat milk; 2) from pasteurized milk; 3) from ultrapasteurized milk**

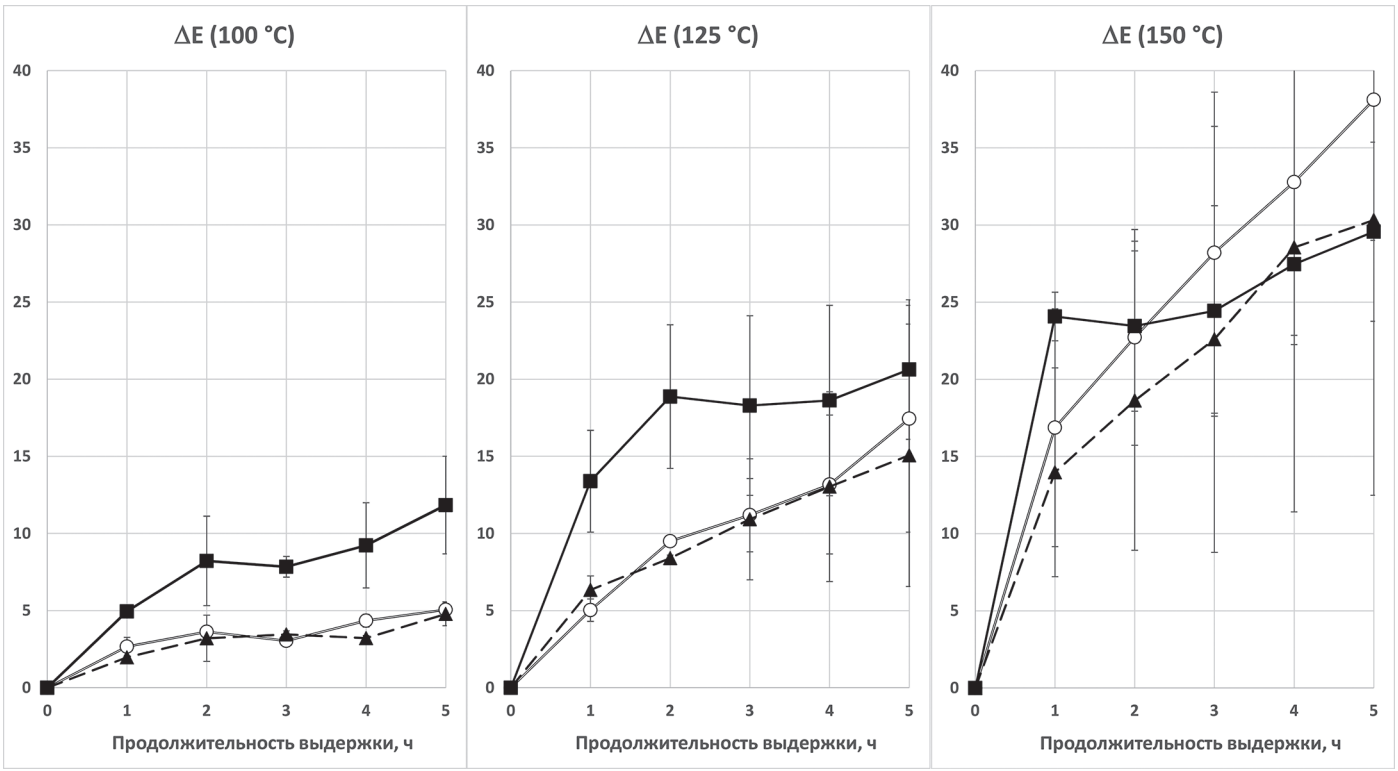


Рисунок 3. **Динамика изменения окрашивания препаратов казеина, полученных из сырого (○), пастеризованного (▲) и ультрапастеризованного молока (■), оцениваемая по критерию Δ*E* (общее цветовое отличие). Данные представлены в формате «среднее ± стандартное отклонение» (*n* = 3)**

Figure 3. **Dynamics of the change in coloration of the casein preparations obtained from raw (○), pasteurized (▲) and ultrapasteurized (■) milk assessed by the criterion Δ*E* (total color difference). Data are presented as mean ± standard deviation (*n* = 3)**

Для всех переменных отклика, используемых в качестве индикаторов тепловой нагрузки, отмечается сильное статистически достоверное ($p < 0{,}001$) влияние линейных эффектов факторов «Температура» (Temperature (*L*)) и «Время» (Time (*L*)). Оценка силы влияния факторов по сумме квадратов отклонений показывает, что фактор «Температура» (Temperature (*L*)) влияет на переменные отклика сильнее, чем фактор «Время» (Time (*L*)). Это означает, что все три индикатора тепловой нагрузки чувствительнее реагируют на изменение температуры, чем на продолжительность нагревания.

Статистически значимый линейный эффект фактора «Время» (Time (*L*)) означает, что содержание продукта реакции изменяется со временем. Статистически значимый линейный эффект фактора «Температура» (Temperature (*L*)) указывает на то, что температура статистически достоверно влияет на скорость реакции.

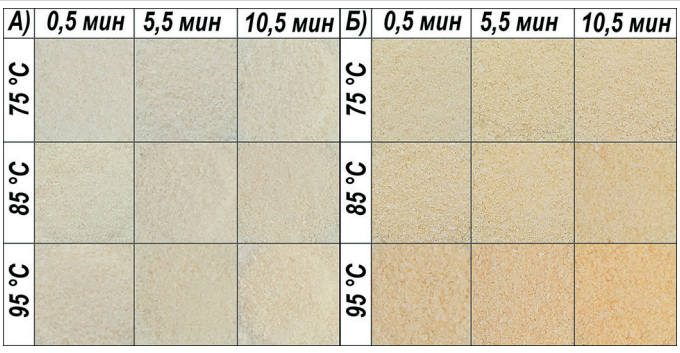


Рисунок 4. **Внешний вид препаратов казеина, полученных из образцов пастеризованного молока: А) исходный вид; Б) вид после тепловой обработки при 100 °C в течение 5 ч. Группировка образцов: в строках — по температуре пастеризации молока, в столбцах — по продолжительности пастеризации молока**

Figure 4. **Appearance of the casein preparations obtained from the samples of pasteurized milk: A) initial appearance; Б) appearance after thermal treatment at 100 °C for 5 hours. Grouping of the samples: in rows — by temperature of milk pasteurization, in columns — by time of milk pasteurization**

Статистически значимый квадратичный эффект фактора «Время» (Time (*Q*)) означает, что содержание продукта реакции изменяется со временем с ускорением или с замедлением. Отсутствие влияния фактора Time (*Q*) на переменные отклика, установленное в результате дисперсионного анализа, указывает, что при постоянной температуре уровни рассматриваемых индикаторов тепловой нагрузки изменяются линейно от времени без ускорения или замедления.

Таблица 2. **Средняя сумма квадратов отклонений, уровень статистической достоверности и коэффициенты детерминации модели ANOVA для переменных отклика**

Table 2. **Mean sum of squared deviations, level of statistical significance and coefficients of determination of the ANOVA model for response variables**

Фактор	df	WSWP, %	AMP	Δ*E*
Temperature (*L*)	1	0,237979 (***)	0,0001761 (***)	262,2813 (***)
Temperature(*Q*)	1	0,008561 (**)	0,0000022 (*)	0,7656 (–)
Time (*L*)	1	0,026026 (***)	0,0000414 (***)	49,1371 (***)
Time (*Q*)	1	0,000983 (–)	0,0000003 (–)	0,0587 (–)
Temperature (*L*) × × Time (*L*)	1	0,001553 (–)	0,0000055 (**)	9,3987 (*)
Error	21	0,000749	0,0000005	1,4245
R^2		0,95	0,96	0,91

Примечание:
df — количество степеней свободы;
WSWP (water soluble whey protein) — массовая доля сывороточных белков молока, %;
AMP (advanced stage Maillard products) — содержание флюоресцирующих продуктов промежуточной стадии реакции Майяра, мг хинина сульфата/г белка;
Δ*E* — интенсивность окрашивания препаратов казеина (при расчете Δ*E*, в качестве образца сравнения использовался тот же самый препарат казеина не подвергнутый тепловой обработке).
Обозначения факторов: Temperature — температура; Time — продолжительность термообработки. (*L*) — оценка линейного эффекта фактора; (*Q*) — оценка квадратичного эффекта фактора.
Error — доля вариации переменной отклика, отнесенная к ошибке;
R^2 — коэффициент детерминации для модели ANOVA.
Уровень статистической значимости оценки влияния фактора (в скобках): «–» — статистически не достоверно ($p > 0{,}05$); «*» — $p < 0{,}05$; «**» — $p < 0{,}01$; «***» — $p < 0{,}001$.

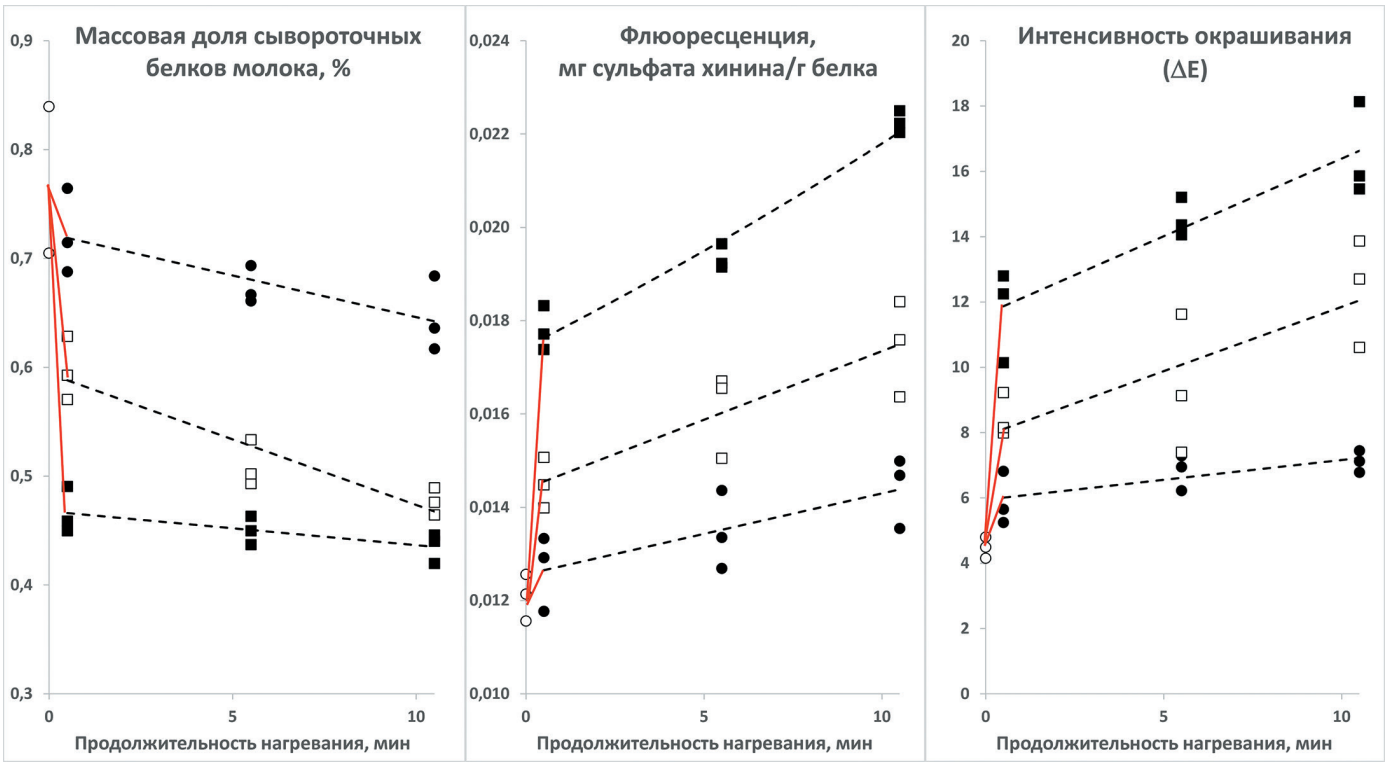


Рисунок 5. **Влияние продолжительности тепловой обработки молока при температуре 75 °C (●), 85 °C (□) и 95 °C (■) на содержание растворимых белков сыворотки, флюоресценцию продуктов промежуточной стадии реакции Майяра и интенсивность окрашивания препаратов казеина. Красными линиями показано изменение уровней показателей от их начальных значений (○) в сыром молоке**

Figure 5. **Effect of time of milk heat treatment at a temperature of 75 °C (●), 85 °C (□) and 95 °C (■) on the content of soluble whey proteins, fluorescence of products of the advanced stage of the Maillard reaction and color intensity of the casein preparations. The red lines show the change in the levels of indicators relative to their initial values (○) in raw milk**

На Рисунке 5 видно, что в исследованном диапазоне продолжительности нагревания от 0,5 до 10,5 мин при постоянной температуре наблюдается линейная зависимость уровней переменных отклика от времени. При разных температурах скорость изменения уровней переменных отклика отличается.

Статистически значимое влияние квадратичного эффекта фактора «Температура» (Temperature (*Q*)) на переменную отклика означает, что при изменении температуры происходит изменение скорости реакции, связанной с данной переменной отклика (ускорение или замедление). Наличие или отсутствие статистически значимого влияния Temperature (*Q*) на индикаторы тепловой нагрузки связано со спецификой химических реакций, происходящих в молоке при нагревании.

Процесс денатурации сывороточных белков имеет форму реакции первого порядка [39] и описывается формулой

$$C = C_0 \cdot e^{-Kt}, \quad (2)$$

где C_0 — начальная концентрация субстрата;
K — константа скорости реакции;
C — концентрация субстрата через время t.

В начале процесса нагревания денатурация сывороточных белков происходит с наибольшей скоростью. С течением времени скорость процесса денатурации снижается по причине исчерпания субстрата. С повышением температуры константа скорости реакции увеличивается и скорость денатурации сывороточных белков возрастает (Рисунок 5).

При температурах 85 °C и 95 °C большая часть растворимых белков денатурирует к моменту достижения целевой температуры пастеризации. На Рисунке 5 видно, что в исследованном диапазоне продолжительности нагревания от 0,5 до 10,5 мин при температуре 95 °C отмечается более медленная, чем при 75 °C и 85 °C, скорость денатурации белков. Это связано с практически полной денатурацией термолабильных сывороточных белков к моменту выдержки 0,5 мин при 95 °C. Сохраняющаяся в молоке термостабильная фракция альфа-лактоальбумина очень медленно денатурирует при данной температуре [40]. Статистически значимое влияние фактора Temperature (*Q*) на содержание растворимых сывороточных белков ($p < 0,01$) означает, что в исследованном диапазоне продолжительности нагревания от 0,5 до 10,5 мин при повышении температуры от 75 °C до 95 °C замедление скорости реакции денатурации сывороточных белков статистически достоверно.

Начальный этап реакции Майяра, в ходе которого формируются лактозилированные группы аминокислот, является реакцией нулевого порядка [39], описываемой формулой

$$C = Kt + C_0, \quad (3),$$

где C_0 — начальная концентрация продукта реакции ($C_0 = 0$);
K — константа скорости реакции;
C — концентрация продукта реакции через время t.

При постоянной температуре накопление продуктов реакции линейно зависит от времени. Нулевая кинетика течения реакции возможна, если концентрация субстрата существенно превышает количество формирующихся продуктов реакции [41]. Это условие выполняется при температурно-временных режимах пастеризации молока, когда только малая часть от реакционно-способных групп аминокислот подвергается лактозилированию.

Лактозилированные аминокислоты служат прекурсорами для флюоресцирующих продуктов реакции Майяра, образующихся на следующих стадиях этой реакции. Скорость накопления флюоресцирующих продуктов реакции Майяра лимитируется скоростью накопления этих прекурсоров. Из-за ограниченного содержания субстрата для реакции формирование флюоресцирующих веществ подчиняется закону реакции первого порядка [41].

При повышении температуры повышается содержание прекурсоров (лактозилированные группы аминокислот) и скорость их преобразования во флюоресцирующие продукты следующей стадии реакции Майяра. Из графиков, представленных на Рисунке 5, видно, что при повышении температуры нагревания от 75 °C до 95 °C происходит увеличение скорости накопления флюоресцирующих продуктов реакции Майяра. Статистическая достоверность влияния фактора Temperature (*Q*) на содержание флюоресцирующих продуктов реакции Майяра дает подтверждение того, что увеличение скорости реакции при повышении температуры статистически достоверно ($p < 0,05$).

Результаты дисперсионного анализа (Таблица 2) показывают, что для переменной отклика «Содержание флюоресцирующих продуктов Майяра» квадратичный эффект фактора «Время» (Time (*Q*))

статистически не достоверен. Т. е. отсутствует нелинейная зависимость в изменении содержания флюоресцирующих продуктов от времени и ход реакции подчинялся закону не первого, а нулевого порядка. Это объясняется следующим.

В работе Birlouez-Aragon et al [16] была установлена эмпирическая регрессионная зависимость (r^2 = 0,985) между продолжительностью нагревания раствора, содержащего прекурсоры реакции Майяра (бета-лактоглобулин и лактозу), и накоплением в растворе флюоресцирующих продуктов реакции Майяра, которая соответствовала закону реакции первого порядка. Однако данный результат был получен при температуре 103 °C и при продолжительности нагревания более 4 мин. До 4 мин кинетика реакции не отличалась от линейной [16]. При менее интенсивном тепловом воздействии, которое было исследовано в рамках настоящей работы (от 75 °C до 95 °C), накопление флюоресцирующих продуктов реакции Майяра происходит линейно от времени (Рисунок 5).

Статистическая значимость эффекта парного взаимодействия факторов «Температура» и «Время» (Temperature (*L*) × Time (*L*)) указывает на повышение выхода продукта реакции за счет взаимно усиливающего друг друга действия данных факторов. Выход продукта реакции, увеличивающийся при повышении температуры, дополнительно увеличивается при повышении продолжительности тепловой обработки. Подобная зависимость, установленная по результатам дисперсионного анализа для факторов «Концентрация флюоресцирующих продуктов реакции Майяра» и «Интенсивность окрашивания препаратов казеина», видна на графике, отражающем изменение уровней данных факторов от температуры и времени (Рисунок 5).

Из результатов дисперсионного анализа следует, что в исследованном диапазоне температурно-временного воздействия интенсивность окрашивания препаратов казеина (Δ*E*) является наиболее точным индикатором тепловой нагрузки. Это связано с линейной зависимостью данного индикатора от температуры и продолжительности пастеризации молока. Следовательно, изменение уровней Δ*E* подчиняется кинетике реакции нулевого порядка, которая типична для реакции формирования продуктов начальной стадии реакции Майяра. Подтверждение того, что интенсивность окрашивания препаратов казеина связана с содержанием в них продуктов начальной реакции Майяра, можно найти при анализе графиков, отражающих взаимную зависимость исследованных индикаторов тепловой нагрузки (Рисунок 6).

Из графиков, приведенных на Рисунках 6А и 6Б, видно, что существует достаточно устойчивая связь между содержанием растворимых сывороточных белков и содержанием флюоресцирующих продуктов промежуточной стадии реакции Майяра (r^2 > 0,74), а также интенсивностью окрашивания препаратов казеина (r^2 > 0,77). При этом, в области низкого содержания белка, характерного для образцов молока, пастеризованного при 95 °C, связь между содержанием растворимых сывороточных белков и двумя другими индикаторами тепловой нагрузки пропадает. Причина такой зависимости содержания продуктов реакции Майяра и интенсивности окрашивания препаратов казеина от концентрации белка связана с тем, что содержание продуктов реакции Майяра зависит от температуры линейно, а содержание белка характеризуется нелинейной зависимостью (Рисунок 5). Искаженная зависимость содержания растворимых сывороточных белков от температуры и продолжительности нагревания является недостатком данного индикатора для оценки тепловой нагрузки.

Из данных, приведенных на Рисунке 6В, видно, что имеет место сильная корреляционная связь между содержанием в молоке флюоресцирующих продуктов промежуточной стадии реакции Майяра и интенсивностью окрашивания препаратов казеина, выделенных из этого образца молока (r^2 > 0,91). Это совпадает с результатами исследований Leclère и Birlouez-Aragon, в процессе которых была установлена линейная корреляционная зависимость между содержанием фурозина и флюоресценцией продуктов промежуточной стадии реакции Майяра (r^2 > 0,96) [17,42].

Сильная корреляция индикатора «Интенсивность окрашивания препаратов казеина» (Δ*E*) с содержанием флюоресцирующих продуктов промежуточной стадии реакции Майяра, указывает, что Δ*E* по физической природе связано с реакцией Майяра. Линейная кинетика изменения Δ*E* от времени при постоянной температуре, которая типична для реакции формирования продуктов начальной стадии реакции Майяра, свидетельствует, что по физической природе Δ*E* связано с продуктами начальной стадии реакции Майара. Это позволяет сделать вывод, что интенсивность окрашивания препаратов

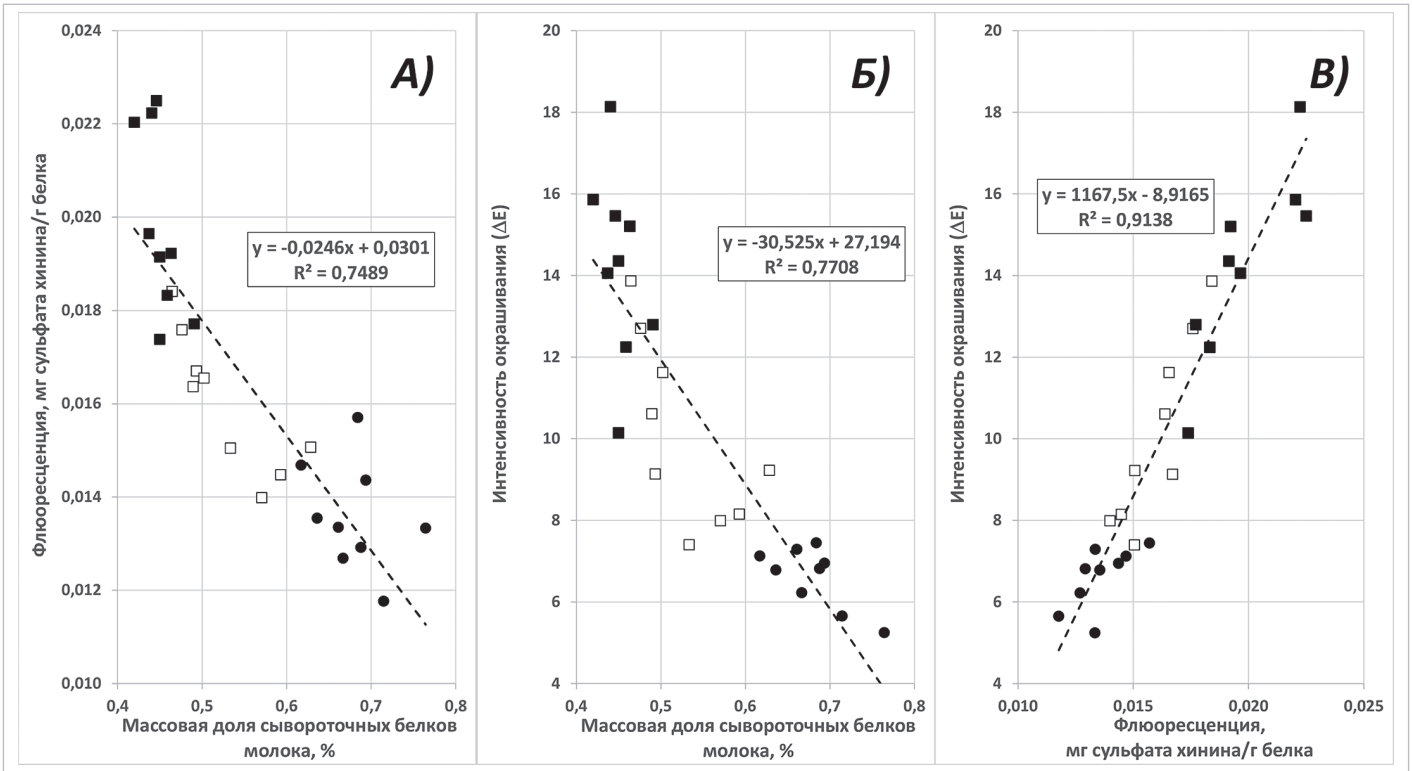


Рисунок 6. **Взаимная зависимость показателей тепловой нагрузки, оказываемой на молоко при пастеризации: А) флюоресценции продуктов реакции Майяра от содержания растворимых белков сыворотки; Б) интенсивности окрашивания препаратов казеина от содержания растворимых белков сыворотки; В) интенсивности окрашивания препаратов казеина от флюоресценции продуктов реакции Майяра. Точки данных имеют разные обозначения в зависимости от температуры пастеризации молока: 75 °C (●), 85 °C (□) и 95 °C (■)**

Figure 6. **Mutual dependence of indicators of heat load exerted on milk during pasteurization: A) fluorescence of the Maillard reaction products on the content of soluble whey proteins; Б) color intensity of the casein preparations on the content of soluble whey proteins; B) color intensity of the casein preparations on the fluorescence of the Maillard reaction products. Points of data have different denotations depending on a temperature of milk pasteurization: 75 °C (●), 85 °C (□) and 95 °C (■)**

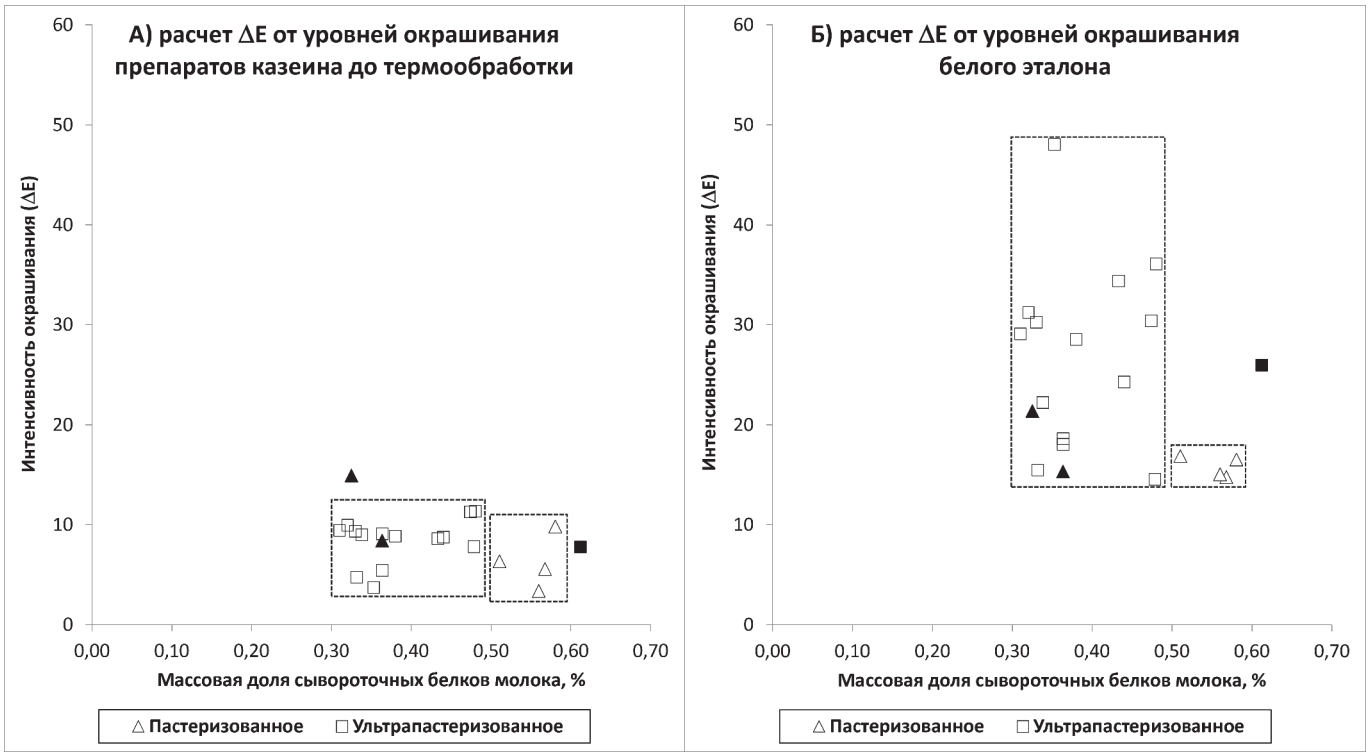


Рисунок 7. **Дифференциация промышленно производимых образцов пастеризованного (n = 6) и ультрапастеризованного молока (n = 15) по уровням индикаторов тепловой нагрузки: А) при расчете ΔE, в качестве образца сравнения использовался тот же самый препарат казеина не подвергнутый тепловой обработке; Б) при расчете ΔE, в качестве образца сравнения использовался калибровочный эталон белого цвета**

Figure 7. **Differentiation of the industrially produced samples of pasteurized (n = 6) and ultrapasteurized (n = 15) milk by levels of indicators of heat load: A) the same casein preparation not subjected to thermal treatment was used as a reference sample in calculation of ΔE; Б) the calibration standard of white color was used as a reference sample in calculation of ΔE**

казеина после термообработки (ΔE) пропорциональна содержанию в них продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированных аминокислот), которые являются прекурсорами меланоидов.

Следовательно, разработанный колориметрический метод позволяет проводить оценку интенсивности тепловой обработки молока по содержанию в нем продуктов ранней стадии реакции Майяра и получать результаты, сравнимые с получаемыми при оценке интенсивности тепловой обработки молока по содержанию в нем фурозина.

3.5. Адаптация колориметрического метода для оценки тепловой нагрузки в промышленно производимых образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока

Разработанный метод оценки интенсивности тепловой нагрузки при обработке молока был испытан на коммерческих образцах пастеризованного (6 образцов) и ультрапастеризованного молока (15 образцов). В исследованных образцах молока была измерена интенсивность окрашивания препаратов казеина, а также измерено содержание растворимых сывороточных белков.

В результате проведенных исследований было установлено, что требуется адаптация разработанного колориметрического метода для оценки тепловой нагрузки в промышленно производимых образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока. При производстве ультрапастеризованного и, отчасти, пастеризованного молока, реакция Майяра доходит до стадии формирования меланоидов [39]. Препараты казеина, выделенные из таких образцов молока, имеют выраженную бурую окраску. Расчет интенсивности окрашивания (ΔE) от уровней окрашивания частиц казеина с выраженным изначальным окрашиванием, приводит к получению заниженной величины ΔE, т. е. заниженного результата оценки интенсивности тепловой нагрузки. Чтобы учесть компоненту потемнения, вносимую меланоидами, формирующимися на стадии производства, следует в качестве уровней образца сравнения для расчета ΔE по формуле (1), брать уровни L_0^*, a_0^*, b_0^* эталона белого цвета, используемого для калибровки колориметра, как это сделано в работе Haghani-Haghighi et al. [43]. Применительно к оборудованию, использованному в настоящей работе, эти уровни составляли: L_0^* =96,54, a_0^* = –0,26, b_0^* = 0,41.

Результаты оценки тепловой нагрузки в промышленно производимых образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока при разных способах расчета ΔE, представлены на Рисунке 7.

Из данных, приведенных на Рисунке 7, видно, что использование двух критериев оценки интенсивности тепловой нагрузки — по содержанию растворимых сывороточных белков и по интенсивности окрашивания препаратов казеина, позволяет достаточно надежно разделить пастеризованное и ультрапастеризовнное молоко. При расчете ΔE от уровней эталона белого цвета, улучшается дифференциация образцов молока по интенсивности тепловой нагрузки. Происходит статистически достоверное разделение на группы пастеризованного (ΔE = 15,80 ± 1,05) и ультрапастеризованного (ΔE = 27,16 ± 8,85) молока (тест Тьюки, p < 0,05).

В результате исследований было установлено, что некоторые из исследованных образцов молока, маркированных как «пастеризованное», фактически характеризуются по содержанию растворимых сывороточных белков и продуктов ранней стадии реакции Майяра как «ультрапастеризованное» молоко. Один из образцов молока, маркированный как «ультрапастеризованное», можно было отнести к группе «пастеризованное» молоко. На графике, нетипичные образцы отмечены заполненными заливкой маркерами (▲) и (■). Типичные образцы помечены «пустыми» маркерами (Δ) и (□). Наличие таких образов связано с тем, что при производстве питьевого термически обработанного молока выдвигаются требования только к остаточной микробиологической обсемененности. Требования к содержанию других веществ, связанных с тепловым воздействием не молоко, не выдвигаются.

Нетипичный образец ультрапастеризованного молока, выделенный специальным маркером, можно отнести к группе молока с не используемой в настоящее время в России маркировкой: «молоко с увеличенным сроком годности» (Extended Shelf Life (ESL) Milk) [3]. Это свидетельствует о внедрении в отечественной молочной промышленности современных технологий, позволяющих производить молоко с длительным сроком годности, имеющее при этом высокую биологическую ценность.

4. Заключение

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- имеется необходимость в быстром и малозатратном методе инструментального контроля интенсивности тепловой нагрузки для пастеризованного, ультрапастеризованного и стерилизованного

молока, основанном на оценке содержания продуктов начальной стадии реакции Майяра, являющихся объективным критерием оценки в широком диапазоне температур тепловой обработки. Разработано и применяется на практике множество методов, основанных на данном критерии оценки, однако все эти методы требуют использования дорогостоящей аппаратуры и участия высококвалифицированного персонала, а также часто требуют длительного времени выполнения анализа.

На основании теоретических изысканий авторами был предложен подход к выявлению продуктов начальной стадии реакции Майяра (лактозилированные аминогруппы аминокислот). Суть подхода заключается в переводе этих бесцветных продуктов в интенсивно окрашенные продукты финальной стадии реакции Майяра (меланоиды), которые можно измерить с помощью специальных приборов.

В результате проведенных исследований были установлены режимы выполнения анализа:

- приготовление препарата казеина из молока, очищенного от лактозы, включает осаждение казеина добавлением 10% уксусной кислоты, трехкратное промывание осадка казеина деионизированной водой, высушивание очищенного казеина и его измельчение на частицы размером 500–800 мкм;
- тепловая обработка препаратов казеина при 100 °C в течение 5 часов. Такой режим позволяет добиться появления бурого окрашивания в препаратах, полученных из молока, подвергнутого тепловой обработке и содержащих продукты ранней стадии реакции Майяра. При этом температура и продолжительность обработки достаточна, чтобы избежать изменения окраски препаратов казеина вследствие окисления кислородом воздуха;
- оценка интенсивности окрашивания препаратов казеина, заключающаяся в измерении уровней их окрашивания по цветовой шкале CIE L^* a^* b^*, и вычисление критерия общего цветового отличия ΔE по уровням цветовых критериев L^*, a^*, b^* до и после тепловой обработки препаратов казеина.

Исследования, проведенные на модельных образцах обезжиренного пастеризованного молока, подтвердили физическую природу окрашивания препаратов казеина, обусловленную наличием в них меланоидов, формирующихся при контролируемом нагревании из лактозилированных аминокислот. Их содержание пропорционально тепловой нагрузке при пастеризации молока.

Были проведены испытания разработанного колориметрического метода на промышленного производимых образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока. После адаптации разработанного колориметрического метода по специфическим особенностям промышленно производимого термически обработанного молока, удалось дифференцировать образцы пастеризованного и ультрапастеризованного молока, характеризующиеся разной степенью тепловой нагрузки при их производстве.

REFERENSES

1. Lorenzen, P. C., Clawin-Räadecker, I., Einhoff, K., Hammer, P., Hartmann, R., Hoffmann, W. et al. (2011). A survey of the quality of extended shelf life (ESL) milk in relation to HTST and UHT milk. *International Journal of Dairy Technology*, 64(2), 166–178. https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00656.x
2. Deeth, H. (2017). Optimum thermal processing for Extended Shelf-Life (ESL) milk. *Foods*, 6(11), Article 102. https://doi.org/10.3390/foods6110102
3. IDF (2022). Heat treatment of milk. Bulletin of the IDF No. 516/2022. Retrieved from https://shop.fil-idf.org/products/bulletin-of-the-idf-n-515–2022-heat-treatment-of-milk Accessed December 01, 2023
4. Elliott, A. J., Datta, N., Amenu, B., Deeth, H. C. (2005). Heat-induced and other chemical changes in commercial UHT milk. *Journal of Dairy Research*, 72(4), 442–446. https://doi.org/10.1017/S002202990500138X
5. Hinrichs, J., Atamer, Z. (2011). Sterilisation of milk and other products. Chapter in a book: Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition) Academic Press, 2011. http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00218-1
6. Raynes, J. K., Vincent, D., Zawadzki, J. L., Savin, K., Mertens, D., Logan, A. et al. (2018). Investigation of age gelation in UHT milk. *Beverages*, 4(4), Article 95. https://doi.org/10.3390/beverages4040095
7. Deeth, H. C., Datta, N. (2011). Ultra-High Temperature Treatment (UHT): Heating Systems. Chapter in a book: Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition). Academic Press, 2011. http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00216-8
8. van Asselt, A. J., Sweere, A. P. J., Rollema, H. S., de Jong, P. (2008). Extreme high-temperature treatment of milk with respect to plasmin inactivation. *International Dairy Journal*, 18(5), 531–538. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.11.019
9. Claeys, W. L., Van Loey, A. M., Hendrickx, M. E. (2002). Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk. *Trends in Food Science and Technology*, 13(9–10), 293–311. https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00164-4
10. van den Oever, S. P., Mayer, H. K. (2021). Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products. *International Dairy Journal*, 121, Article 105097. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105097
11. Ritota, M., Di Costanzo, M., Mattera, M., Manzi, P. (2017). New trends for the evaluation of heat treatments of milk. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2017, Article 1864832. https://doi.org/10.1155/2017/1864832
12. 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
13. Mayer, H. K., Raba, B., Meier, J., Schmid, A. (2010). RP-HPLC analysis of furosine and acid-soluble beta-lactoglobulin to assess the heat load of extended shelf-life milk samples in Austria. *Dairy Science and Technology*, 90(4), 413–428. https://doi.org/10.1051/dst/2009058
14. Lan, X. Y., Wang, J. Q., Bu, D. P., Shen, J. S., Zheng, N., Sun, P. (2010). Effects of heating temperatures and addition of reconstituted milk on the heat indicators in milk. *Journal of Food Science*, 75(8), C653–C658. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01802.x
15. Resmini, P., Pellegino, 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.
16. Birlouez-Aragon, I., Nicolas, M., Metais, A., Marchond, N., Grenier, J., Calvo, D. (1998). A rapid fluorimetric method to estimate the heat treatment of liquid milk. *International Dairy Journa*l, 8(9), 771–777. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(98)00119-8
17. Birlouez-Aragon, I., Sabat, P., Gouti, N. (2002). A new method for discriminating milk heat treatment. *International Dairy Journal*, 12(1), 59–67. https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00131-5
18. Guan, R., Liu, D., Ye, X., Yang, K. (2005). Use of fluorometry for determination of skim milk powder adulteration in fresh milk. J*ournal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 6(11), 1101–1106. https://doi.org/10.1631/jzus.2005.B1101
19. Schamberger, G. P., Labuza, T. P. (2006). Evaluation of front-face fluorescence for assessing thermal processing of milk. *Journal of Food Science*, 71(2), C69–C74. https://doi.org/10.1111/j.1365–2621.2006.tb08884.x
20. 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. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-1-105-113
21. Serrano, M. A., Castillo, G., Muñoz, M. M., Hernández, A. (2002). Influence of hydrolysis, purification, and calibration method on furosine determination using ion-pair reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatographic Science*, 40(2), 87–91. https://doi.org/10.1093/chromsci/40.2.87
22. Tokuşoğlu, Ö., Akalin, A. S., Unal, K. (2006). Rapid high performance liquid chromatographic detection of furosine (epsilon-N-2-furoylmethyl-l-lysine) in yogurt and cheese marketed in Turkey. *Journal of Food Quality*, 29(1), 38–46. https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2006.00054.x
23. Vallejo-Córdoba, B., Mazorra-Manzano, M.A., González-Córdova, A.F. (2004). New capillary electrophoresis method for the determination of furosine in dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 52(19), 5787–5790. https://doi.org/10.1021/jf049850e
24. Bignardi, C., Cavazza, A., Corradini, C. (2012). Determination of furosine in food products by capillary zone electrophoresis tandem mass spectrometry. *Electrophoresis*, 33(15), 2382–2389. https://doi.org/10.1002/elps.201100582
25. Gómez-Narváez, F., Pérez-Martínez, L., J. Contreras-Calderón, J. (2019). Usefulness of some Maillard reaction indicators for monitoring the heat damage of whey powder under conditions applicable to spray drying. *International Dairy Journal*, 99, Article 104553. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104553
26. Rizzi, G. P. (1997) Chemical structure of colored Maillard reaction products. *Food Reviews International*, 13(1), 1–28. http://doi.org/10.1080/87559129709541096
27. Burton, H. (1994). Chemical and physical changes in milk at high temperatures. Chapter in a book: Ultra-high-temperature processing of milk and milk products. Springer, Boston, MA, 1994. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2157-0_3
28. Van Boekel M. A. J. S. (1998). Effect of heating on Maillard reactions in milk. *Food Chemistry*, 62(4), 403–414. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00075-2
29. Poltronieri, P., Rossi, F. (2017). Stabilization of milk quality by heat treatments. Chapter in a book: Microbiology in Dairy Processing: Challenges and Opportunities. 2018. John Wiley and Sons Ltd and the Institute of Food Technologists, 2018. https://doi.org/10.1002/9781119115007.ch4
30. Barraquio, V. L. (2014). Which milk is fresh? *International Journal of Dairy Science and Processing*, 1(201), 1–6. https://doi.org/10.19070/2379-1578-140002
31. Cattaneo, S., Masotti, F., Pellegrino, L. (2008). Effects of overprocessing on heat damage of UHT milk. *European Food Research and Technology*, 226(5), 1099–1106. https://doi.org/10.1007/s00217-007-0637-5
32. 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
33. Mahmoud, R., Brown, R. J., Ernstrom, C. A. (1990). Factors affecting measurement of undenatured whey protein nitrogen in dried whey by a modified Harland-Ashworth test. *Journal of Dairy Science*, 73(7), 1694–1699. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78845-5
34. Morales, F. J., Romero, C., Jiménez-Pérez, S. (1996). Fluorescence associated with Maillard reaction in milk and milk-resembling systems. *Food Chemistry*, 57(3), 423–428. https://doi.org/10.1016/0308–8146(95)00245–6
35. Skoog, D. A., Holler, F. J., Crouch, S. R. (2018). Molecular Luminescence Spectrometry. Chapter in a book: Principles of Instrumental Analysis. Seventh Edition. Cengage Learning. Boston, 2018.
36. Dufossé, L., Galaup, P. (2010). Color. Chapter in a book: Handbook of Dairy Foods Analysis. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2010. https://doi.org/10.1201/9781420046328

37. Wrolstad, R. E., Smith, D. E. (2017). Color Analysis. Chapter in a book: Food Analysis. Food Science Text Series. Springer, Cham, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_31
38. Švec, I., Hrušková, M., Vítová, M., Sekerová, H. (2008). Colour evaluation of different pasta samples. *Czech Journal of Food Science*, 26, 421–427.
39. 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.
40. Jeanson, S., Dupont, D., Grattard, N., Rolet-Répécaud, O. (1999). Characterization of the heat treatment undergone by milk using two inhibition ELISAs for quantification of native and heat denatured α-lactalbumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(6), 2249–2254. https://doi.org/10.1021/jf9809232
41. Van Boekel, M. A. J. S. (2001). Kinetic aspects of the Maillard reaction: a critical review. *Food/Nahrung,* 45(3), 150–159. http://doi.org/10.1002/1521-3803%2820010601%2945%3A3%3C150%3A%3AAID-FOOD150%3E3.0.CO%3B2-9
42. Leclère, J., Birlouez-Aragon, I. (2001). The fluorescence of advanced Maillard products is a good indicator of lysine damage during the Maillard reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4682–4687. https://doi.org/10.1021/jf001433o
43. Haghani-Haghighi, H., Mortazavian, A.M., Hosseini, H., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Khosravi-Darani, K. et al. (2019). Method validation and determination of hydroxymethyl furfural (HMF) and furosine as indicators to recognize adulterated cow's pasteurized and sterilized milks made by partial reconstitution of skim milk powder. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 9(2), 3842–3848. https://doi.org/10.33263/BRIAC92.842848

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	**Affiliation**
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: e.topnikova@fncps.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: e.topnikova@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0225-6870
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
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 author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	**Conflict of interest**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.

DOI: https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-491-504

Received 26.04.2024
Accepted in revised 28.09.2024
Accepted for publication 30.09.2024
© AlFadhly N. K. Z., Al-Temimi A. A., Alkanan Z. T., Altemimi A. B., Younis M. I., Giuffrè A. M., Abedelmaksoud T. G., 2024
Available online at https://www.fsjour.com/jour
Review article
Open access

SUSTAINABLE AGRICULTURE DEVELOPMENT FOR FOOD SAFETY AND NUTRITION

Nawal K. Z. AlFadhly[1], Anfal Alwan Al-Temimi[1], Zina T. Alkanan[1], Ammar B. Altemimi[1,2], Mohamed Ibrahim Younis[3], Angelo Maria Giuffrè[4], Tarek Gamal Abedelmaksoud[3]*

[1]Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah, Basrah, Iraq
[2]College of Medicine, University of Warith Al-Anbiyaa, Karbala, Iraq
[3]Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt
[4]Department Agraria, University of Studies "Mediterranea" of Reggio Calabria, Reggio Calabria, Italy

KEY WORDS:
biodiversity, climate change, environment, food safety, sustainability

ABSTRACT

Sustainable agriculture is a type of agriculture which, in addition to producing food and agricultural products, is also economically advantageous for farmers, socially correct, respectful of nature and the environment. Sustainable agriculture contributes to improving the quality of life of both farmers and society. Climate change, economic development and social equity influence the sustainable agriculture and require complex and shared solutions on a large scale. Sustainable agriculture includes different meanings, such as environmental, social and economic perspective. The environmental perspective is related to the development of virtuous processes that respect the planet's resources, the healthiness of the soil and water, guaranteeing the maintenance of biodiversity and avoiding the use of pesticides and chemical agents. The social and economic perspective is the ability to meet the global demand of both industrialized and developing countries by ensuring the improvement of the protection of human rights and solidarity-based economic development, the quality of life of farmers, the ethical treatment of animals. The aim of this work is to discuss the implications and perspectives of sustainable agriculture in relation to food production.

Поступила 26.04.2024
Поступила после рецензирования 28.09.2024
Принята в печать 30.09.2024
© Альфадли Н. К. З., Ал-Темими А. А., Алканан З. Т., Алтемии А. Б., Юнис М. И., Джуфре А. М., Абедельмаксуд Т. Г., 2024
https://www.fsjour.com/jour
Обзорная статья
Open access

РАЗВИТИЕ УСТОЙЧИВОГО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ДЛЯ ПИЩЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ПИТАНИЯ

Альфадли Н. К. З.[1], Ал-Темими А. А.[1], Алканан З. Т.[1], Алтемими А. Б.[1,2], Юнис М. И.[3], Джуфре А. М.[4], Абедельмаксуд Т. Г.[3]*

[1]Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный колледж, Университет Басры, Басра, Ирак
[2]Медицинский колледж, Университет Уарес Аль-Анбия, Кербела, Ирак
[3]Кафедра пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет
[4]Сельскохозяйственный факультет, Университет исследований «Медитеранеа" Реджо-ди-Калабрии, Реджо-ди-Калабрия, Италия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
биоразнообразие, изменение климата, окружающая среда, безопасность пищевых продуктов, устойчивое развитие

АННОТАЦИЯ

Устойчивое сельское хозяйство — это тип сельского хозяйства, которое в дополнение к производству пищевых и сельскохозяйственных продуктов также экономически благоприятно для фермеров, социально корректно, уважает природу и окружающую среду. Устойчивое сельское хозяйство вносит вклад в улучшение качества жизни как фермеров, так и общества. Изменение климата, экономическое развитие и социальное равенство влияют на устойчивое сельское хозяйство и требуют крупномасштабных комплексных и общих решений. Устойчивое сельское хозяйство включает различные аспекты, такие как экологический и социально-экономический аспекты. Экологический аспект связан с развитием эффективных процессов, которые уважают ресурсы планеты, здоровье почвы и воды, которые гарантируют поддержание биоразнообразия и избегают применения пестицидов и химических веществ. Социально-экономический аспект — это способность соответствовать глобальному спросу как индустриальных, так и развивающихся стран путем обеспечения улучшения защиты прав человека и основанного на солидарности экономического развития, качества жизни фермеров, этического обращения с животными. Целью данной работы является обсуждение значения и аспектов устойчивого сельского хозяйства в отношении производства пищевых продуктов.

1. Introduction

"Sustainable development" is an economic and social term coined by the United Nations, outlining a roadmap for global environmental, social, and economic development. Its primary objective is to enhance living conditions for every individual within society and to develop means of production and their management in ways that do not deplete the natural resources of the Earth, thereby avoiding overburdening the planet beyond its capacity [1]. The comprehensive and general concept of sustainable development entails a holistic activity involving all international sectors, organizations, and institutions, whether public, private, or individual. It constitutes a process of developing and improving existing conditions through studying the past, learning from experiences, understanding the present reality, and striving to change it for the better. This is achieved through careful planning for the future by optimizing human and material resources, including information, data, and knowledge possessed by those engaged in the development process. It emphasizes the absolute importance of continuous learning, gaining experiences, and applying knowledge. Sustainable development is not limited to a single aspect or

FOR CITATION: **AlFadhly, N. K. Z., Al-Temimi, A. A., Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Younis, M. I., Giuffrè, A. M., Abedelmaksoud, T. G.** (2024). Sustainable agriculture development for food safety and nutrition. *Food Systems,* 7(3), 491–504. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-491-504

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: **Альфадли, Н. К. З., Ал-Темими, А. А., Алканан, З. Т., Алтемии, А. Б., Юнис, М. И., Джуфре, А. М., Абедельмаксуд, Т. Г.** (2024). Развитие устойчивого сельского хозяйства для пищевой безопасности и питания. *Пищевые системы*, 7(3), 491–504. https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-491-504

field of life; rather, it encompasses social, economic, political, humanitarian, psychological, mental, medical, educational, technological, and other areas of development [2].

In the year 2015, all member countries of the United Nations adopted the Sustainable Development Agenda for 2030 as a shared plan for peace and prosperity for people and the planet. This agenda includes seventeen Sustainable Development Goals (SDGs), with the foremost goals being the eradication of poverty, the elimination of hunger, ensuring food security, achieving improved nutrition, and promoting sustainable agriculture [3]. Reports by experts from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) have confirmed that human activities are responsible for air pollution, greenhouse gas emissions into the atmosphere, global warming, and manifestations of ice melting in the polar regions, accompanied by rising sea levels, posing severe threats of natural disasters [4]. The reason for this is attributed to climate variability, which poses a threat to the safety of the food chain in several ways, including the potential to exacerbate foodborne diseases due to the provision of conducive conditions for their growth and mutation, leading to mutations in some toxic biological entities. Additionally, food safety may be compromised due to the risks posed by various chemical substances, such as pesticides, mycotoxins, and heavy metals. Thus, abrupt climate fluctuations can lead to current, emerging, and future risks that could harm food safety [5]. The succession of systemic crises over the past two decades has profoundly impacted our lives, prompting the global community, represented by institutions headquartered within the United Nations, to encourage concerted efforts to address global challenges, particularly in the agricultural food sector, which is among the most relevant sectors to emerging societal challenges. There is now a clear need for new agricultural food policies to be implemented [2]. Sustainable development primarily calls for raising and enhancing the standard of living for individuals and ensuring a better livelihood for future generations. The emergence of the concept of sustainable development was a direct result of previous failed policies and strategies that persisted for decades. Therefore, stakeholders in sustainable development have aimed to correct the traditional path of development by reconsidering the components of the economic process (productivity) for societal wealth, whether natural, human, social, or industrial, to achieve its main objective, which is achieving intergenerational equity in the utilization of the same resources within a clean environment and economic prosperity for society [6].

Sustainable development aims to urge all countries, whether poor, rich, or middle-income, to work towards enhancing prosperity while considering the protection of the Earth. These goals emphasize that eradicating poverty must go hand in hand with strategies that promote economic growth, as well as address a range of social needs including education, health, social protection, and employment opportunities, while addressing climate change and environmental protection [7]. Furthermore, sustainable development aims to strike a balance within the economic system without depleting natural resources while considering environmental security. Given the human dimension of sustainable development, inherently tied to the environmental dimension, present generations have become responsible for preserving natural resources for future generations. Therefore, environmental concern is fundamental to development, as the wastage and depletion of natural resources, which form the basis of agricultural and industrial activities, will have detrimental effects on development overall. The concept of sustainable development emerged as a result of neglecting the environmental aspects of development, leading to international efforts culminating in the report of the World Commission on Environment and Development, which introduced the new concept of sustainable development [8]. Economists have been encouraged to depart from the mechanistic system approach. It has been observed that policies aimed at reducing carbon emissions may create pressures on biodiversity. Additionally, policies supporting biofuels could jeopardize food security [9,10,11].

Many natural resources that we harness for comprehensive development in our countries are constantly diminishing because they are non-renewable, especially energy sources, water, and raw materials. The world's consumption of these resources has been steadily increasing since the beginning of the industrial revolution. However, there has persisted a prevalent misconception that the Earth is a source of inexhaustible resources and an unlimited reservoir of energy [1]. Therefore, this study aimed to investigate the concept of sustainable agricultural development, its dimensions, and challenges in the current circumstances. It sought to understand the interconnection between food, climate, and energy, as well as to assess the reality of agricultural policies and their effectiveness in achieving sustainable development. Furthermore, it aimed to explore the impact of food on our lives and to identify applications in food systems that contribute to sustainable development.

2. Objects and methods

The sources of information were the following scientific databases: ScienceDirect, PubMed, Scopus, ResearchGate, and Google Scholar. The search strategy included the following keywords: biodiversity, climate change; environment; food safety; and sustainability. The following acceptance criteria for research characterization were considered: the implications and perspectives of sustainable agriculture in relation to food production. The parameters of the publications were as follows: publication from 1989 until 2023 (110 references were selected for this review); language: English. Exclusion criteria: no access to the full text articles. Based on the review, the authors compiled information on discussion of the implications and perspectives of sustainable agriculture in relation to food production.

3. Sustainable development

Sustainable development aims to meet current needs without hindering future generations' ability to meet their own. It advocates for a balanced approach to economic, environmental, and social progress. Initially defined by the International Commission on Environment and Development in 1987, this concept represents a transformative developmental philosophy that offers new perspectives on the future of our planet. Development seeks to achieve economic and social objectives through specific processes that enhance living standards in various contexts, but it does not always equate to economic growth. A lack of economic growth does not necessarily imply a lack of development within a society [12]. Perspectives on the environmental crisis and sustainable development vary. The strong sustainability movement emphasizes aligning development with environmental conservation, focusing predominantly on ecological concerns. However, the notion of unlimited growth is challenging given the Earth's finite resources and capacity to manage environmental impacts. Advocates of this view argue that without a radical rethinking of our approach to nature and economic progress, an environmentally sustainable future may be unattainable. In contrast, moderate environmental sustainability is currently more widely accepted, particularly among governments in industrialized nations, and is seen as a more practical approach to achieving greater global equality [13,14].

The term sustainable development refers to continuous and ongoing genuine development with its aim and purpose being human-centric, emphasizing the balance between the environment in its economic and social dimensions [15]. It contributes to the development of natural resources and human resources and induces transformations in industrial and technological bases on a scientifically planned basis according to a specific strategy to meet present and future needs [16]. Sustainable development, from an environmental perspective, focuses on the optimal use of agricultural land and water resources worldwide, leading to an increase in green spaces of Earth's surface [17]. From a social and humanitarian perspective, it entails striving for population growth stability and preventing or reducing rural-to-urban migration by improving the levels of educational and healthcare services in rural areas, while from an economic standpoint, it aims to achieve sustainability through the visions of industrialized countries on one hand and developing countries on the other [18].

Industrialized countries perceive sustainable development as necessitating continuous reductions in their energy and resource consumption to bring about radical transformations in prevailing lifestyles and refraining from exporting their natural and industrial development model globally. For developing countries, sustainable development means utilizing resources to raise the living standards of the most impoverished populations in the South. Technologically, sustainable development involves transitioning communities to an era of clean industries and technologies that utilize minimal energy and resources and produce the least amount of gases and pollutants that contribute to global warming and ozone depletion [19].

4. Natural resources as one of the fields of sustainable development

Economic development serves as a significant indicator of the extent of progress in the fields of sustainable development, which are linked to several crucial aspects such as education, health, finances, and average age expectancy for individuals in a specific region. This is achieved through raising awareness among individuals on how to preserve and protect natural resources from pollution, as well as their understanding of the necessity to achieve balance, diversity, and continuity in planning for the needs of current and future generations, and how to achieve mutual coexistence between humans and the environment [20,21]. Since the first United Nations Conference on the Environment in 1972, the world's population has nearly tripled to over 7 billion people, while the size of

the global economy has also increased more than threefold. Although this growth has lifted hundreds of millions of people out of poverty, the benefits have been unevenly distributed, placing a heavy burden on the environment. Future economic growth is accompanied by decent work and increased living standards, leading to human welfare improvement, all of which depend on preserving the natural resources upon which all livelihood and economic activities rely [22].

The increasing use of natural resources and the resulting pollution have led to a growing impact of water scarcity and loss of fertile land. This has accelerated the reduction of biodiversity and triggered climate change, exacerbating damage beyond sustainable levels. Consequently, addressing environmental challenges and finding swift and decisive remediation methods are imperative. However, such measures may hinder economic growth, thereby affecting job opportunities and exacerbating environmental disasters [22]. Freshwater scarcity is prevalent in many parts of the world, with the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) projecting that by 2050, the number of people living in severely water-stressed areas will exceed 2.3 billion, representing over 40% of the world's population. This impedes various economic activities, with industries, energy generation, human consumption, and agriculture increasingly competing for water resources, resulting in serious repercussions on food security. Irrigation accounts for approximately 70% of available water, and while intensive agriculture has increased crop yields through chemical fertilizers, it has degraded soil quality and polluted water resources. Consequently, water and food scarcity are increasing individual work burdens [10].

5. The significance of the agricultural sector in achieving food security and sustainable development in Iraq

The Food and Agriculture Organization (FAO), a United Nations agency, defines sustainable agricultural development as the management and conservation of essential natural resources, including institutions, technologies, and current and future human requirements. This strategy must work towards preserving land, water, and plant and animal resources while being technically and economically acceptable to society [23]. Food security is defined as a community's ability to provide basic nutritional needs for its population and ensure a minimum level of those needs. It consists of four pillars: food availability, access, utilization, and stability, with the food dimension being an integral part of food security [24]. Addressing food security is crucial in all countries, whether developed or developing, and agricultural nations have supported food security for general and specific purposes by making “eradicating poverty and hunger” one of the United Nations' Millennium Development Goals. These countries, including Iraq, hope to achieve this goal despite economic constraints affecting agricultural productivity, making it challenging to attain [25]. World patterns of social and economic development vary, resulting in significant surpluses and chronic food shortages, contributing to hunger and malnutrition. Therefore, maintaining food security may pose a significant problem for developing countries with low levels of per capita gross domestic product, including Iraq, which suffers from unsuitable agricultural conditions and inadequate infrastructure, often attributed to the lack of economic resources for food [26]. Wars, such as the Gulf War of 1990–1991 and the invasion of 2003, marginalized and weakened the Iraqi regime, leading to a significant deterioration in living conditions and a decline in food security in Iraq [27].

Iraqi agriculture faces a significant water problem that affects cultivated areas, agricultural production, farmers' income, and food security. However, the results achieved in rationalizing the use of irrigation water remain limited and do not meet the requirements necessary to address this serious challenge [28].

Agricultural policy is a significant tool adopted by countries to guide their economic and social activities by facilitating the appropriate delivery of agricultural goods to consumers in terms of price and quality, while simultaneously providing agricultural inputs to farmers at minimal costs. This approach aims to ensure profitability that sustains agricultural producers' continued participation in the production process with the same efficiency and effectiveness, thereby enhancing the agricultural sector's contribution to the gross domestic product (GDP) [29]. Achieving agricultural development is crucial for food security and forms the foundation for comprehensive economic and social growth. However, it requires various measures to overcome the obstacles and problems hindering the development of this economic sector, thereby enabling it to achieve food security, contribute to national economic development, provide workforce opportunities, and reduce reliance on external sources for food supplies. This can only be achieved through the highest degree of efficiency and economic resource mobilization. Consequently, most developed and developing countries alike strive to achieve sustainable agricultural development to meet current and future food needs, maintain productivity, and renew natural resource bases.

In the Iraqi economy, however, significant challenges hinder agricultural progress due to various overlapping obstacles. These include the destruction of infrastructure after 2003, land issues such as salinity and desertification, water problems, environmental pollution, decreased investment in the agricultural sector, cessation of country support for agriculture, rising prices of agricultural production inputs, declining use of agricultural technology, trade policy issues leading to flooding of Iraqi markets with imported agricultural products, and the financial, technical, and technological weaknesses of the private agricultural sector. These obstacles have had a detrimental impact on the agricultural sector. Therefore, effective solutions must be found to address the problems facing this vital sector, necessitating full support from the country, represented by the Ministry of Agriculture. This support should include providing production inputs such as improved seeds, fertilizers, mechanization, and water pumps, as well as supporting final product prices. These measures play a significant and influential role in achieving food security for a large segment of Iraq's population [30].

6. Food and its effect on sustainable development

Food is a fundamental aspect of human life, integral to our survival and daily routines. Beyond its necessity for nourishment, food also plays a crucial role in fostering social interactions and connecting individuals from diverse backgrounds. Dietary practices often reflect cultural identities, underscoring the richness of global diversity. Understanding the role of technology in food — both now and in the future — is therefore essential [31].

Food significantly impacts human behavior, health, and cultural practices. With advancements in social networks, mobile technology, and the internet, people frequently share and document food-related content, such as images, recipes, and cooking videos. This has led to an abundance of food-related data, providing valuable insights into nutrition and societal issues. Food computing utilizes diverse data sources to analyze, recognize, and recommend food, applying computational methods to address challenges in medicine, biology, culinary arts, and agriculture. Recent developments in computer science are revolutionizing the analysis of food data, driving progress in various food-related applications [32].

As we advance toward sustainable development goals, the adoption of innovative agricultural and food technologies is anticipated to grow. While these innovations promise to support multiple sustainability objectives, it is crucial to approach them with caution. One-size-fits-all technological solutions can be misleading. Understanding the broader impacts of technological advancements — such as those involving energy, health, and artificial intelligence — is vital. The interplay of different technologies can lead to both significant opportunities and unforeseen consequences. Therefore, careful consideration of these innovations is necessary to avoid negative outcomes and ensure alignment with principles of social justice. Collaboration on regulatory, social, and economic frameworks, as well as environmental and social management standards, is essential for achieving both human and planetary health [33–34]. Figure 1 illustrates improving crop management and its impact on sustainable development.

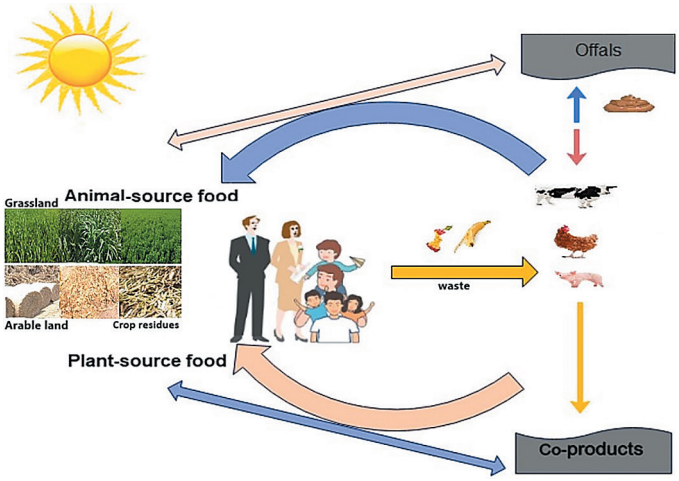


Figure 1. **Improving crop management and its impact on sustainable development**

Рисунок 1. **Улучшение менеджмента сельскохозяйственных культур и его влияние на устойчивое развитие**

Erdogan [35] pointed out the potential for implementing effective policy measures for sustainable development by identifying the health and environmental impact of producing long-lasting and perishable goods, such as the production and manufacturing of food items, which are impossible to reduce or eliminate due to their direct connection to daily individual life. Therefore, there should be a focus on not neglecting the environmental and health aspects and the negative effects resulting from long-term food production, including significant factors such as carbon emissions. However, it should be noted that statistical evidence has found a significant positive relationship between food production and life expectancy at birth, indicating that food production is a crucial determinant for sustainable development.

7. Malnutrition and its relationship to sustainable agricultural development

Four forms of malnutrition exist globally: energy-protein malnutrition, iron deficiency and anemia, vitamin A deficiency, and iodine deficiency disorders. These forms vary in their global impact, regional prevalence rates, affected age and gender groups, as well as their clinical and public health consequences. Recent advancements in quantitative measurement and monitoring at national and regional levels have improved understanding of these issues. Additionally, zinc deficiency, accompanied by decreased host resistance and increased susceptibility to infections, is also addressed [36]. The World Health Organization (WHO) identifies malnutrition as the greatest threat to global public health, with forty-five thousand children dying annually due to malnutrition-related causes [37].

Poverty and malnutrition are closely intertwined factors, with each depending on the other. Therefore, it is imperative to address both simultaneously rather than individually. The relationship between them is bidirectional, as each can be both a cause and a consequence of the other. Leaving this vicious cycle unaddressed poses a major concern for public health, necessitating immediate steps to confront it in order to achieve sustainable improvement.

Regarding nutritional outcomes, it is essential to address the challenges and obstacles that hinder poverty and malnutrition at all levels to achieve the primary goal of a healthier society. Despite advancements in social and economic development, malnutrition remains unacceptably high worldwide. This factor has been linked to a vital relationship between nutritional status and capital, as economic conditions negatively impact both nutritional and physiological/mental capacities of individuals, resulting in decreased productivity levels and making them and their countries more susceptible to poverty.

The eradication of poverty in all its forms is the first goal of the seventeen Sustainable Development Goals (SDGs), with ending hunger, achieving food security, improving nutrition, and promoting sustainable agriculture being the second goal. Additionally, at least twelve out of the seventeen SDGs include indicators closely related to nutrition [38].

The UNICEF framework outlines the underlying, basic, and direct causes of malnutrition, offering a comprehensive view of both direct and indirect pathways to mitigate malnutrition and enhance health outcomes. Sustainable Development Goal 2 seeks to “end hunger, achieve food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture”, which directly influences nutritional outcomes. Additionally, various other Sustainable Development Goals contribute to improving nutrition indirectly through their broader impacts [39].

In summary, there is a need to increase the utilization of emerging food innovations to achieve food security. Despite advancements in food sciences, the prevalence of malnutrition worldwide has not improved over the past decade. One of the Sustainable Development Goals emphasizes focusing immediate and long-term research and development efforts on: (1) adding value and increasing the use of crops rich in neglected and underutilized nutrients to enhance dietary diversity, (2) developing functional foods to address both undernutrition and overnutrition, and (3) applying knowledge of the food matrix to develop processing techniques that enhance the bioavailability of nutrients and reduce micronutrient deficiencies [40].

The Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations has highlighted that addressing malnutrition and changing eating habits could significantly influence global food demand by 2050. Strategists should incorporate these factors to manage the food industry effectively. Plant-based dietary systems offer a practical approach to combating malnutrition, leveraging the nutritional properties of products at the point of delivery. Our proposed model can assist governments and non-profit organizations in mitigating the long-term effects of malnutrition. It provides food sector managers with valuable insights for designing an environmentally sustainable, responsive, and profitable supply chain. Key managerial insights from applying this model to a real-world case study include: 1) The critical role of agricultural production in creating a sustainable food system. 2) Prioritizing the nutritional quality of products over their deterioration rate to alleviate malnutrition while minimizing costs and environmental impact. 3) Enhancing the nutritional value of manufactured products is more crucial than construction and manufacturing costs for ensuring their inclusion in diets. 4) Achieving dietary diversity may increase overall costs by 14% [41].

8. Food and nutritional security and its relationship to sustainable agricultural development

Addressing food issues has become increasingly challenging in recent times due to the challenges posed by global agricultural development trends. The rate of food production and growth is significantly lower than the rate of demand, leading to a rise in chronic famine in many regions. Analyses of food shortages and the production of quality goods have been conducted, along with practical recommendations to overcome these challenges and expand the range of products [42].

Sustainable food systems aim to minimize environmental impacts while managing high costs, thereby supporting food security and nutrition. To achieve this, household income and expenditure survey data were analyzed using linear programming to develop optimal food systems for two objectives: maximizing the Nutrient Rich Food (NRF) index and minimizing costs. Goal programming was then applied to balance all objectives. This sustainable food basket, considering cultural preferences and recommended nutrient quantities, suggests portion sizes from various food groups based on the food pyramid. Adhering to this basket results in a 23% cost reduction and a 7% increase in the NRF index. To align with sustainable consumption patterns, policy interventions are necessary to boost intake of dairy products, fruits, vegetables, grains, poultry, and vegetable oils while reducing consumption of bread, rice, pasta, meats, fish, eggs, legumes, saturated fats, and sugars. Enhancing food availability, access, and public awareness are crucial, as economic downturns and rising food prices exacerbate food insecurity. Strategies for achieving a sustainable food system include economic incentives, food assistance, reducing waste, and developing relevant guidelines [43].

Seaweed offers a nutritious, low-fat food option rich in minerals, fiber, unsaturated fatty acids, sugars, vitamins, and biologically active compounds. Seaweed by-products present unique opportunities for creating functional foods and can significantly contribute to climate change mitigation by sequestering carbon, reducing agricultural emissions, and providing materials for biofuel and livestock feed. Seaweed farming also aids climate adaptation by absorbing wave energy, protecting coastlines, and mitigating ocean acidification and oxygen depletion. Despite its benefits, challenges include making seaweed products affordable, nutritionally balanced, and appealing to consumers. Developing seaweed-based foods that can compete with current human diets is essential for its broader adoption [44].

Environmental pressures such as salinity, drought, temperature fluctuations, and increased diseases threaten crop production and nutritional value, complicating global food security. Projections for 2100 include a rise in carbon dioxide concentrations to 950 parts per million, temperature increases of 3.5 to 8 degrees Celsius, and sea level rises of over 2.4 meters. These changes could increase drought risk and affect rainfall patterns, leading to higher water vapor levels. Rice cultivation may play a crucial role in achieving food and nutritional sustainability, providing essential nutrients and biologically active compounds amidst these environmental challenges [45].

9. Food security in Iraq and its relationship to water security and sustainable agricultural development

Food security in Iraq is intricately connected to its water security, a crucial consideration for any sustainable development strategy in the country. Addressing this link requires incorporating “virtual water trade” into these strategies, as it helps bridge the gap between available water resources and the water needed to produce essential food products. This approach can mitigate the risk of famine and reduce reliance on external aid. To effectively implement this strategy, it is important to classify food products based on their water footprint and prioritize crops with medium and low water requirements while excluding those with high water footprints from agricultural plans. Additionally, importing products with high water footprints to provide “virtual water” should be a standard practice, ensuring that the country can sustainably meet its food needs.

Iraq relies heavily on water from the Tigris and Euphrates rivers and their tributaries. However, decreasing river flows are leading to a significant water shortage problem, which is expected to worsen in the coming decades. With the population projected to reach around 70 million by

2050 and approximately 90 million by 2070, future water availability will likely be insufficient to meet the country's food security needs, including both agricultural and animal products [46].

To address this challenge, water management must be based on scientific principles to tackle both current and anticipated issues. Key strategies include analyzing the virtual water footprint of various food crops to optimize the use of available water resources and minimize shortages. This involves maximizing the use of desalinated water, recycled sewage water (grey water), and reducing reliance on surface and groundwater irrigation (blue water) and rainwater (green water). Additionally, a comprehensive strategic plan should incorporate elements beyond food security, such as community development and policies to manage population growth, which currently stands at 2.97% annually.

Implementing awareness and education programs on water and food security is essential to highlight the critical nature of food security for Iraq's survival and sustainability [47].

10. Goals set by the international community as main components of sustainable development

One of the primary challenges in achieving sustainable development is eliminating poverty while fostering balanced production and consumption patterns that do not overly depend on natural resources. Sustainable development indicators provide a structured scientific approach, focusing on six key areas: international trade, investment, economic policy, climate change, energy, natural resource management, and communication technology. These indicators serve as a comprehensive framework to guide policies and actions toward sustainable growth [48]. Figure 2 depicts the key components of sustainable development.

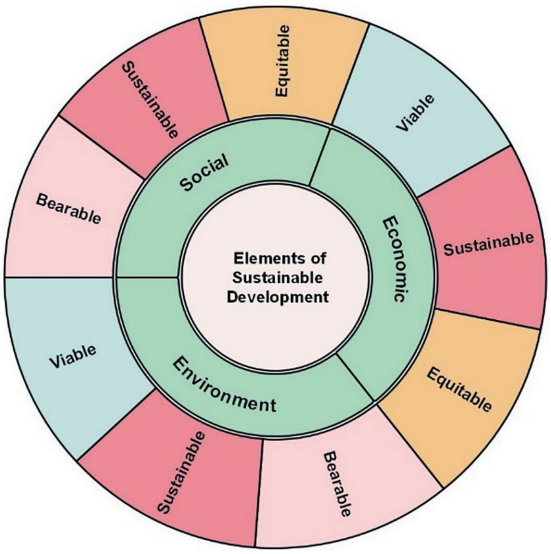


Figure 2. **Elements of sustainable development**
Рисунок 2. **Элементы устойчивого развития**

10.1. Ending poverty

Poverty extends beyond the mere absence of income or resources; it encompasses a lack of sustainable livelihoods and is manifested in forms such as hunger, malnutrition, limited access to education and basic services, social discrimination, societal exclusion, and a lack of participation in decision-making. Addressing poverty in all its dimensions is a central focus of the seventeen Sustainable Development Goals (SDGs) for 2030. These goals aim to eradicate extreme poverty, implement social protection programs, and promote gender equality in access to economic resources. The overarching aim of the SDGs is to combat poverty by "ensuring the provision of significant resources from diverse sources, including enhanced developmental cooperation for developing countries" [49].

Protected areas are the most effective places for conserving biodiversity, and the services provided by well-functioning ecosystems in protected areas are of great value to humans, ensuring livelihoods, health, and overall well-being. However, human activities may intersect with protection efforts, causing a sharp decline in biodiversity if social and economic development exceeds the carrying capacity of protected areas. Protected areas may have positive or negative effects on local social and economic development, as numerous studies have demonstrated the impact of protected areas on local development using quasi-experimental methods and constructing poverty indices. Cases have shown that protected areas have positive effects on poverty alleviation [50,51].

Protected area systems have been established to achieve a balance between poverty alleviation and the preservation of sustainable regional development. Several studies have indicated that protected areas tend to be biased towards low-productivity and low-economic-value locations, while the wide distribution and spread of populations are used as indicators of threats or pressures on natural ecosystems. Multidimensional poverty is widespread, affecting more than four out of every ten households and children. Although the incidence of household poverty appears modest at the regional level, it does not paint a complete picture, as the proportion of the population in poverty reaches 13.4%, approximately 38.2 million individuals [52].

10.2. Ending hunger

The Sustainable Development Goals (SDGs) for 2030 serve as a global framework for fostering international collaboration to advance sustainable development. Nutrition is a key element within the second SDG, "Zero Hunger", which focuses on achieving food security, improving nutrition, and promoting sustainable agricultural practices [3]. The nutrition-related targets of the SDGs aim to enhance health outcomes, foster sustainable food systems, and secure global food availability. While malnutrition poses a minimal issue in European Union member states, rising trends in childhood obesity remain a significant concern, with progress falling short of the desired goals. Notably, improvements in European food production systems have positively impacted various environmental factors in recent years. However, there is still a lack of a comprehensive regulatory framework to achieve environmental and climate goals towards addressing all forms of malnutrition while maintaining environmental sustainability through the production of good food and food systems [53].

Eliminating hunger, achieving food security, improving nutrition, and promoting sustainable agriculture encompass addressing malnutrition, improving agricultural production, ensuring sustainable and resilient food production, correcting trade practices, and ensuring functioning food markets. The Sustainable Development Plan for 2030 pledges to move away from escalating inequalities, environmental degradation, and mass extinction of plant and animal biodiversity, waste, and depletion of abundant natural resources to practices that respect and protect our resources within the common environment. It aims to move away from activities that expose hundreds of millions of people to harmful effects such as global warming and its consequences on climate risks. Priority is given to eradicating poverty, hunger, and malnutrition in all its forms in the 2030 plan, with nutritional interventions aimed at reducing child malnutrition (stunting among children under 5 years old) by about 30 million at an average cost of approximately US $5 billion annually. Additionally, taking all measures to reduce hunger together could potentially decrease the number of children suffering from stunting by about 40 million without any additional increase [54].

Industrial science and technology can play a crucial role in combating hunger, addressing malnutrition, improving food security, and ensuring food safety. Through the Food and Agriculture Organization (FAO), many industrialized countries utilize advanced agricultural practices and develop nutrition programs to ensure stable food supplies [23]. Their efforts contribute to achieving the second United Nations Sustainable Development Goal of eradicating hunger and all forms of malnutrition by 2030. Healthcare professionals and scientists employ advanced industrial techniques to study various forms of malnutrition, from undernutrition to obesity. The findings of their research assist policymakers and experts in developing programs and policies to address hunger and malnutrition. These initiatives include food fortification programs focusing on producing nutrient-rich foods, calorie reduction programs to combat obesity, as well as programs aimed at assisting mothers in breastfeeding and improving their children's nutrition. Hunger is one of the manifestations of poverty, with one in every nine individuals worldwide suffering from malnutrition. This leads to weakened health and immunity, making individuals more susceptible to various diseases. It is evident from research findings that malnutrition is linked to low educational attainment. Consequently, poverty leads to malnutrition, which negatively impacts learners [53]. Education, decent work, and economic growth have been linked to improved diet quality, though the causal relationship remains unclear. The preference for low-quality, energy-dense, and nutrient-poor foods among lower socioeconomic groups may be influenced by limited access to, or the unaffordability of, healthier food options, along with other contributing factors [55].

10.3. Good health and well-being

Promoting healthy lives and well-being for all individuals at every stage of life involves several key objectives, including reducing maternal mortality, preventing child deaths, combating diseases such as HIV/AIDS and other communicable diseases, and ensuring access to universal

health coverage. This also includes the availability of affordable essential medicines, sexual and reproductive healthcare, vaccine research, and access to medicines. Economic sustainability focuses on boosting productivity through preventive healthcare measures and enhancing workplace health and safety. Social sustainability emphasizes enforcing standards for air and water quality, as well as managing noise pollution to safeguard human health and provide primary healthcare to the poorest populations. Environmental sustainability, in turn, is dedicated to protecting biological resources, ecosystems, and life-support systems to ensure a healthy planet. This entails everyone enjoying healthy lifestyles and well-being at all ages by achieving comprehensive healthcare, providing opportunities to access medications, vaccines, appropriate treatment, regular check-ups, addiction treatment, ensuring complete nutrition and clean drinking water, suitable housing, and, above all, providing preventive protocols against infectious diseases, especially endemic ones such as malaria, AIDS, and others. This ensures the provision of good health conditions for mothers, guaranteeing the birth of generations that enjoy both physical and mental health and their ongoing monitoring from a health perspective [3]. Nutrition plays a key role in the Sustainable Development Goals (SDGs), serving as a vital element in the global effort to promote sustainable development by 2030. All countries, whether low-, middle-, or high-income, are encouraged to collaborate in achieving these 17 goals. Notably, the second SDG, "End hunger, achieve food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture", is the only one that explicitly emphasizes the concept of "nutrition" as a central focus [3]. Despite a significant reduction of nearly 50 million in the number of children under the age of five affected by stunting over the past 20 years, an estimated 150 million children are still stunted. Additionally, 50 million children under five suffer from wasting, and approximately 20 million newborns are born with low birth weight. Although these numbers are much lower in Europe, in Southeast Europe, stunting prevalence may be up to 10% among children under the age of five [53].

11. Simultaneous combatting of climate change and poverty

Civil society organizations are essential in advancing sustainable development and climate action, both locally and globally. In collaboration with the Green Climate Fund, they contribute significantly to achieving Goal 13 of the Sustainable Development Goals, which focuses on combating climate change. These organizations encompass non-governmental institutions, non-profit organizations, associations, academic organizations, youth groups, women's groups, and environmental organizations. Civil society organizations work on raising awareness and education regarding environmental and climate challenges, and they encourage community participation in implementing principles and goals related to sustainable development and climate action. These organizations implement local, regional, and international projects and initiatives to promote sustainable development and adapt communities to climate change. Additionally, there is an emphasis on the need to enhance adaptation in developing countries to climate change. Developing countries face particular challenges due to the impacts of climate change, necessitating the provision of funding, technology, and training to enhance their adaptation and increase their ability to address risks and climate-related transformations. There is a close relationship between sustainable development and climate action, and understanding their mutual impacts and promoting integration between them is necessary to achieve sustainable development and protect the environment. Strong cooperation and effective coordination among the United Nations, civil society organizations, governments, the private sector, are required to effectively and comprehensively address climate change challenges to achieve a balance between economic and social development and environmental preservation for current and future generations [2].

Eliminating poverty and addressing climate change require a broader reliance on well-funded social protection programs, which can be easily scaled up in times of disasters, alongside robust data and the ability to identify and provide support to the poor. Moreover, the widespread provision of financial services enabling the poor to save and borrow is essential for their swift recovery from shocks. Additionally, access to healthcare and education is crucial for rebounding from shocks and mitigating the effects of poverty [56].

Climate-related actions can bring about new income opportunities through increasing the workforce, such as reforestation efforts and soil fertility restoration, and by encouraging innovative industries that consider the environment. Climate change provides a significant opportunity for retraining in economic activities and trade patterns diversification, represented by the growth of pastures and the construction of sustainable cities. Climate change is a fundamental factor in exacerbating land drought, as rising temperatures can accelerate the process of water transfer from the Earth's surface to the atmosphere. As a result, drought can severely impact water resources in the future, influencing population growth, increasing pollution, lowering living standards, shifting dietary habits, altering agricultural practices, and reducing both industrial and economic activities. The rising demand for water and energy presents a significant challenge in the face of climate change, which will consequently affect agriculture and food security, leading to hunger and poverty, particularly in regions with high levels of malnutrition and extreme vulnerability to climate change. Global food demand is projected to rise by 59% to 98% by 2050 [56].

12. Challenges of sustainable agricultural development

12.1. Food security and nutrition

Economic sustainability focuses on boosting agricultural productivity and output to ensure local food security, whereas social sustainability aims to enhance the productivity and profitability of small-scale farming to achieve household food security. Environmental sustainability, in contrast, is dedicated to the responsible use and preservation of lands, forests, water, wildlife, and fish resources. The Arab Sustainable Agricultural Development Strategy includes 19 main sub-programs covering most agricultural development areas, as well as addressing all Sustainable Development Goals for 2030 related to the agricultural sector. These main programs focus on technology transfer, increasing and sustaining production and productivity, agricultural yield, governance of agricultural resource management systems, and enhancing the competitiveness of agricultural products, improving the investment environment and agricultural trade, plant and animal health, and food safety [2].

It is worth mentioning that achieving many of the Sustainable Development Goals (SDGs) is of paramount importance for achieving the nutrition goal. "Nutrition" is a fundamental element for achieving many other SDGs, and malnutrition is influenced by several social and economic factors, including food insecurity attributed to poverty (the first goal of the SDGs) [3]. Approximately 800 million individuals worldwide suffer from hunger due to poverty, with 43 million people in the European Union unable to afford regular high-quality meals every two days. This inability stems from the incapacity to bear the costs of high-quality foods. Another factor is food choice, which is crucial for maintaining good health, representing the third goal of the SDGs [3]. The term "double burden" describes the simultaneous occurrence of malnutrition, which is linked to higher risks of cancer and infectious diseases, and overweight/obesity, which is associated with an increased risk of non-communicable diseases. This global issue affects approximately 4 billion people across both developing and developed nations. Since 1990, there has been a notable rise in overweight and obesity rates among children and adolescents. Countries such as Greece, Italy, Malta, and Spain have seen particularly high rates, with about 18% to 21% of children affected by obesity. In contrast, Ireland, Latvia, and Norway have reported much lower obesity rates, ranging from 5% to 9%. Maintaining a healthy body weight remains crucial for overall health [53].

12.2. Poverty and food wastage

The Oxford Poverty and Human Development Initiative (OPHI) introduced a new concept of poverty termed Global Multidimensional Poverty (GMP), [57] launching the Global Multidimensional Poverty Index (MPI) in 2010 in collaboration with the United Nations Development Program (UNDP). This initiative utilizes statistical data from the Human Development Reports to analyze available statistical data for the Global MPI alongside the Sustainable Development Goals. The Global Multidimensional Poverty Report for 2019 covered approximately 7.5 billion individuals, equivalent to 77% of the world's population, living in 105 countries, including those experiencing poverty according to three indicators: health, education, and living standards, across ten dimensions as illustrated in Figure 3.

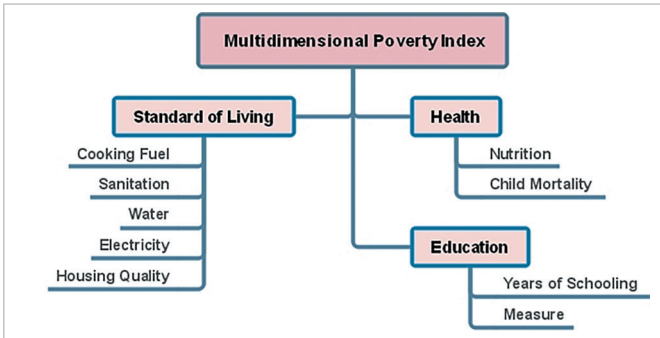


Figure 3. **Multidimensional poverty index**
Рисунок 3. **Индекс многомерной бедности**

In 2019, the aforementioned institution added a numerical classification to the Multidimensional Poverty Index ranging from 0 to 1. According to this classification, Iraq scored 0.032, reflecting a low level of multidimensional poverty [57].

The risks arising from unemployment, which increase poverty rates, have doubled. According to the United Nations Development Program (UNDP), approximately 1.75 billion people suffer from multidimensional poverty that affects health, economic opportunities, education, and living standards. With an additional 27 million unemployed since 2008, there are still 200 million unemployed individuals waiting for opportunities. This unprecedented level of unemployment coincides with the entry of 400 million youths into the global labor market over the next decade in search of employment opportunities. Considering that 75 million individuals aged between 16 and 25 are unable to find employment, youth account for more than one-third of the total unemployment rate [2].

In order to generate sustainable growth while simultaneously maintaining social cohesion, the world must rise to the high challenge of creating 600 million productive jobs over the next decade. In addition to the widespread phenomenon of unemployment and the poor quality of jobs, challenges are exacerbated by the prevalence of poverty among workers, with approximately 900 million workers, or around 30% of the total workforce, living with their families below the poverty line, earning daily wages not exceeding $2 USD, particularly in developing countries where labor is weakly organized. A significant proportion of these workers are employed in sectors that pose risks due to excessive use of natural resources and climate change, such as agriculture and fisheries, which together employ over a billion people. Furthermore, securing basic income for individuals through sufficient social security coverage to meet individual needs and access to healthcare is essential. This serves as an attraction to increase productive employment and break the cycle of multidimensional poverty [2].

Despite humans' adaptation to their primary environment, they sometimes appear ill-prepared for the developed environment, leading to mismatches between biological predisposition and the new food environment [58]. Some researchers and institutions advocate for the inclusion of a fourth dimension in sustainable development, arguing that the existing economic, environmental, and social dimensions do not fully capture the complexities of modern society. In this context, the 21st-century agenda for culture and the United Cities and Local Governments (UCLG) Executive Bureau emphasize the need for a policy statement on culture and sustainable development. This statement, prepared for the third World Conference in Mexico City, underscores the importance of integrating culture into sustainable development strategies. It proposes a dual approach: developing strong cultural policies and incorporating a cultural dimension into all public policies. This approach identifies four areas of sustainability: economic, environmental, political, and cultural. Information technology is also recognized as a key enabler of sustainable development, offering potential benefits across economic, social, and environmental domains by promoting technology-driven sustainable practices (see Figure 4) [59].

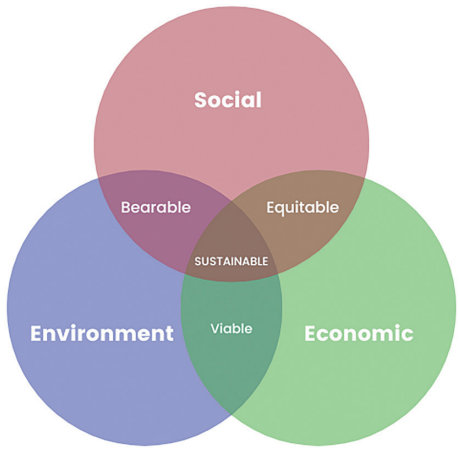


Figure 4. **Circles of sustainability**
Рисунок 4. **Круги устойчивого развития**

13. Food loss and waste and its relationship to food security and sustainable development

Food loss and waste represent major issues in the food industry, affecting all stages of the food supply chain. They are associated with environmental degradation, economic losses, and increased hunger. Figure 5 illustrates the amount of food waste for available food commodities in the European Union [60]. The Food and Agriculture Organization [23] defines food loss as a reduction in the quantity of food originally intended for human consumption, while food waste refers to discarded food as waste. The term "food waste" encompasses both concepts despite differences between them. Food classification helps distinguish between food types based on intrinsic characteristics, including seasonal production, quantity, and quality, relying on biological diversity and quality constraints at each step of inventory depletion risk, transportation and storage requirements, temperature, waiting time, and other requirements. Fruits, vegetables, and grains contribute the most to food waste, with the fruits and vegetables sector being the most susceptible to insect attacks. Meanwhile, edible food waste (about 35%) mainly consists of fresh meat and bakery products [61].

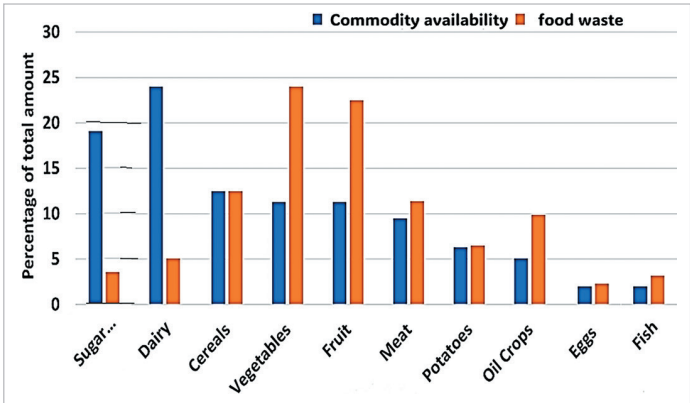


Figure 5. **Total amount of food waste in the European Union [60]**
Рисунок 5. **Общее количество пищевых отходов в Европейском Союзе [60]**

The relationship between food loss and waste and food security is a crucial topic in societal discussions, highlighting the challenges linked to the ongoing and unsustainable development of agricultural food systems. Addressing this issue involves identifying, assessing, and managing how food loss and waste impact food security. Food loss and waste represent inefficient use of resources such as water, energy, and food, which adversely affects food security. To mitigate these impacts, implementing policy measures to reduce food loss and waste across various stages of food production and supply chains is essential. Future research should focus on exploring the complex interactions between food loss, waste, and food security, drawing from multiple disciplines including agricultural sciences, agricultural economics, development economics, environmental sciences, and engineering. This research should aim to provide evidence-based insights into how different supply chain domains interact and how resource management can be optimized through circular and green economy principles — primarily reducing, reusing, and recycling. Future studies must also address environmental protection and natural resource conservation to develop strategies that promote a circular economy and minimize food waste. Actions to reduce food loss and waste include preventing loss during processing by identifying waste causes and training employees, improving production practices, and supporting farmers in converting perishable raw materials into shelf-stable products. Enhancing storage and cold chain facilities, improving transportation, and extending shelf life through innovative packaging and labeling are also crucial. Additionally, redirecting food to consumers via food banks or markets, using food for animal feed, or converting food waste into compost or renewable energy are sustainable alternatives. The food sector is increasingly producing biofuel from waste streams, reflecting a shift towards a more circular food system (see Figure 6) [55,62].

Addressing global food security necessitates the development of new strategies to tackle challenges such as climate change, depletion of natural resources, and the need to protect ecosystem quality and biodiversity. Food loss and waste directly impact food security, nutrition, and the sustainability of food systems. Quantifying the negative effects of food waste is a complex, multidimensional task that requires a comprehensive approach, considering economic, environmental, and social factors. Effective management of food loss and waste throughout the food supply chain depends on implementing sound, standardized practices and measures [63]. According to the European Waste Framework Directive, waste is defined as "any substance or object which the holder discards or intends or is required to discard." Food loss specifically refers to food discarded after harvest. Table 1 provides details on the degree or percentage of food loss and waste across different food groups and stages of the food processing chain [60].

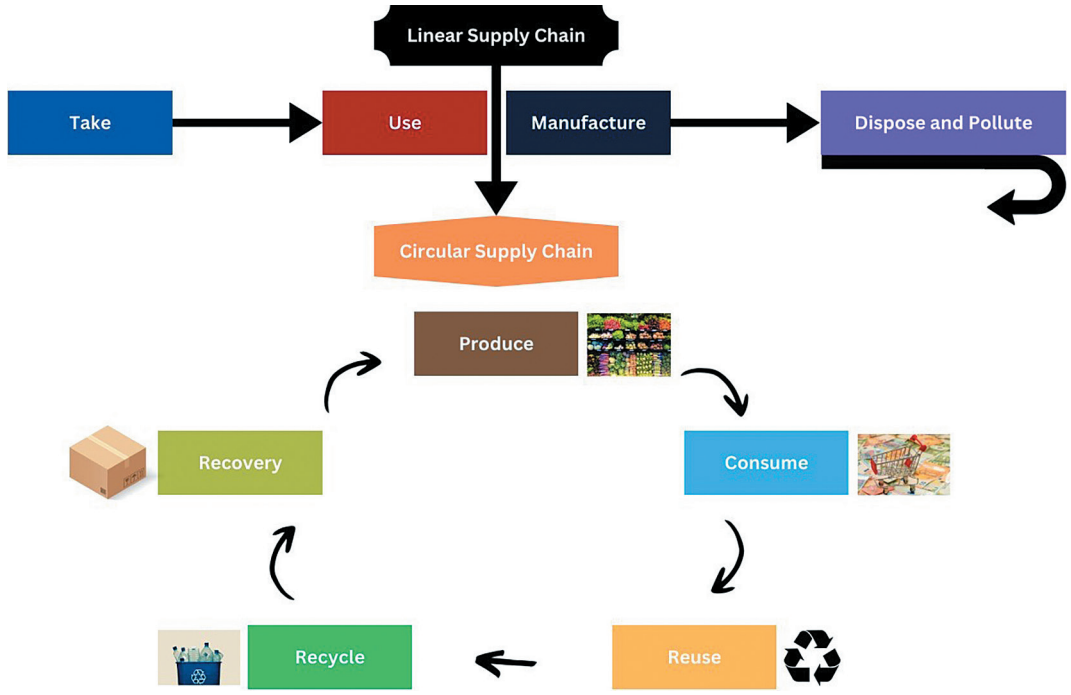


Figure 6. **Transition from a linear forming chain to a circular forming chain**
Рисунок 6. **Переход от линейной цепочки к замкнутой цепочке**

Table 1. **Degree or range of food loss and waste (%) for each food group and stage of the food processing chain [60]**
Таблица 1. **Степень или диапазон продовольственных потерь и пищевых отходов (%) для каждой группы пищевых продуктов и стадии цепи переработки пищевых продуктов [60]**

Food supply chain stage	Food Groups							
	Eggs	Fish	Dairy	Roots and tubers	Oil crops	Meat	Cereals	Fruits and vegetables
Consumption	2	8–22.6	9.8–15	13.3–25.5	4–5	11–14.6	13–27	17.9–26.2
Distribution	1.6–2	9	0.3–0.8	0.3–1	0.7–7	2.8–4	2–3	1.2–10
Processing	0.5–1.6	6	0.7–1.2	4.9–15	5–28.2	4.7–5	3.2–10.5	2–6.4
Storage and handling	1.9	0.5–7.9	0.5–1.7	7.6–9	1–1.2	0.7	3.9–4	5–7.3
Primary production	4–4.8	9.4	0.3–3.5	2.8–20	2.5–10	0.8–3.2	1.5–4.3	18–20

The study by Principato et al. [64] emphasizes the crucial role of reducing food waste in creating a more sustainable food system. To support this, the United Nations Sustainable Development Goals have set a target to cut per capita food waste in half by 2030. The study highlights that employing digital tools for monitoring and managing food inventory in warehouses can lead to more sustainable food service operations within industrial settings. By analyzing longitudinal data from 2018 and 2019 collected from a major Italian food production company's cafeteria, the study found a decrease in both food loss and waste over time, which resulted in notable environmental benefits. The analysis also revealed significant differences between food lost during meal preparation and food left uneaten on employees' plates. The findings suggest the importance of implementing educational programs and using digital tools to share food-related data among employees, kitchen staff, and procurement teams to enhance awareness of behavioral practices. The study proposes new interventions at both the kitchen and customer levels to further address food waste, as illustrated in Figure 7, which depicts the food waste management routine applied in company warehouses.

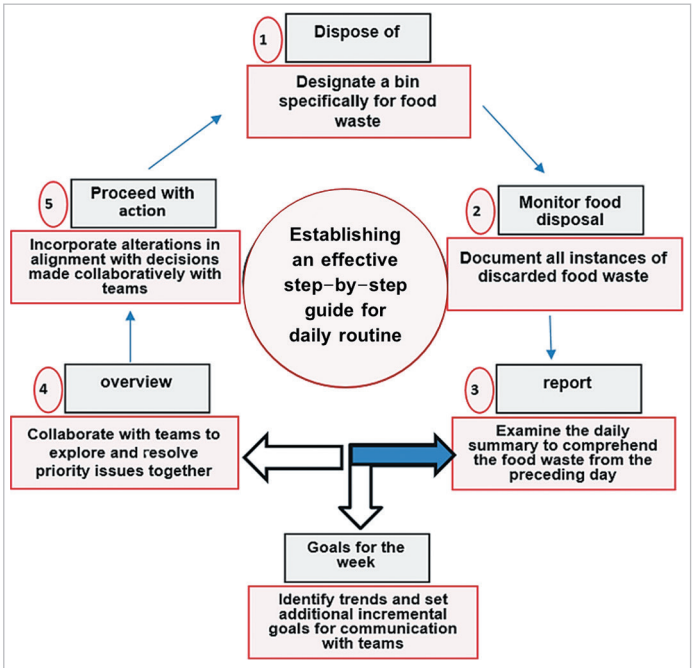


Figure 7. **Food waste management routine and its application in work company canteens**
Рисунок 7. **Обычный порядок менеджмента отходов и его применение в столовых производственных предприятий**

14. Sustainable food systems

Global progress towards food security and nutrition has been sluggish in many areas, with some experiencing regression. Given the changes in population composition, income, technology, climate, and other influential factors, pressures on food systems have become immense. When designing and implementing future interventions to achieve these goals, leveraging insightful knowledge to anticipate and prepare for various potential scenarios becomes highly necessary. Overcoming current and emerging challenges, as well as seizing available opportunities, requires continuous efforts to provide robust analyses. The latest insights from studies focus on three key aspects within the food system. Firstly, consumer demand and the changes it undergoes are significant factors

shaping the food system itself, alongside nutritional and environmental outcomes. Secondly, inequality in distribution and exchanges within the food system has been identified as a major challenge to address to counteract the negative health effects of the current food system. Thirdly, due to the COVID-19 crisis, efforts to enhance the resilience of the food system are escalating as it faces increasing exposure to multiple risks [65].

Lab-grown meat is a novel concept in food biotechnology that combines tissue engineering and cellular agriculture, involving the production of edible biomass through the cultivation of stem cells extracted from live animal muscles, using the self-organization method. This type of meat is considered an efficient, environmentally friendly, and safer method for general food safety and security. Additionally, it is deemed an ethical approach to meat production. To achieve any significant change in various social, economic, and environmental domains, marketing this technology is essential, and it must be cost-effective like traditional meats while being widely accepted by consumers. New challenges, such as increased meat demand due to population growth, can be met by establishing large-scale lab-grown meat production and enhancing its popularity. Industrial-scale adoption of lab-grown meat production will lead to achieving self-sufficiency in advanced economies [66].

Soybeans currently provide fats for human dietary needs mostly in the form of soybean oil, which is one of the primary plant oils. Soybean oil is generally considered healthy due to its relatively high content of alpha-linolenic fatty acid (n-3), and soybeans are legumes capable of nitrogen fixation directly from the atmosphere (using nitrogen-fixing bacteria). Peanut, like other legumes, has the ability to fix nitrogen in the soil, making it a sustainable option for fat production. Furthermore, tree-grown nuts such as almonds and walnuts have been proposed as significant sources of fats in sustainable diets due to their ability to sequester carbon and their potential use in agroforestry systems. However, it is worth noting that water availability poses a constraint on the cultivation of these nuts. Currently, peanuts play a vital role in providing fats in areas with low consumption. There is significant potential to increase peanut productivity in Africa. Tree-grown nuts offer another sustainable option but require sufficient water supply for success [67,68].

Milk is the second-largest source of fat globally. In many countries, dietary recommendations encourage the consumption of low-fat dairy products, leading to increased consumption of skimmed milk and other low-fat dairy products. However, unlike lard and tallow, the fats remaining from low-fat products like butter and cream are fully utilized in other food products [69]. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and the Food and Agriculture Organization (FAO) anticipate an increase in butter demand in the future. Changes in future dietary recommendations may lead to increased demand for dairy fats, which could be detrimental from a sustainability perspective due to the greater environmental impact of dairy fats compared to plant oils. It is worth mentioning that dairy production results in a significant amount of beef as a joint product, so careful consideration must be given to the relationship between these two sources [70].

Legumes have been valued as vital nutrient sources in both human and animal diets for thousands of years, initially appreciated for their benefits to soil health and agricultural productivity. However, over time, their popularity as a human food declined due to various factors, including their perception as “poor man's meat”, occasional gastrointestinal issues, and longer preparation times compared to other plant foods. The rise in meat consumption in the latter half of the 20th century further reduced the role of legumes as a primary protein source. This decline was mirrored by a decrease in legume production, particularly in Europe, where legumes now occupy only a small fraction of agricultural land. Recently, there has been a renewed focus on sustainable dietary practices, leading to a revival of legume production and consumption in Europe. This resurgence is supported by policies and initiatives aimed at reintegrating legumes into modern diets. Today, legumes are being incorporated into a variety of products such as beverages, grain bars, bread, meat alternatives, snacks, and flours, and are featured in resource-conserving agricultural systems, including organic farming and intercropping. The increased production and consumption of legumes are seen as significant contributions to addressing global health and environmental challenges. Dried legumes offer excellent nutritional benefits, providing protein, amino acids, fatty acids, fiber, and carbohydrates with a low glycemic index. They also contribute to ecosystem services by reducing the need for synthetic fertilizers, promoting soil conservation, and enhancing agricultural biodiversity [71].

15. Utilizing food waste to achieve a circular economy

Achieving sustainable development through the concept of the circular bioeconomy can only be realized through the adoption of advanced techniques for valorizing food waste. Valorizing food waste opens up new avenues for economic growth, making waste a suitable raw material for biological processes to produce bioproducts from a biological source in a circular loop. Advanced techniques such as ultrasound-assisted extraction, microwave-assisted extraction, enzymatic reactors, and enzyme-assisted extraction alleviate global concerns resulting from poor food waste management. Decomposing food waste below zero level using advanced techniques transforms food waste into bioproducts such as biologically active compounds (antioxidants, pigments, sugars, polyphenols, etc.), biofuels (biodiesel, biogas, biohydrogen), and bioplastics. The circular bioeconomy allows for the best use of organic resources in the most productive and economical way. There are many advanced techniques and their combinations to enhance the value of food waste for premium goods, attracting significant interest from researchers. Food waste reclaims a variety of bioproducts that open up numerous opportunities in future bioeconomics. The circular bioeconomy is a fast-growing sector contributing to increased material and energy production with minimal environmental impact [72]. Anaerobic digestion (AD) is a well-established technology for converting food waste into biogas. Despite its effectiveness, a substantial amount of undigested material remains, highlighting the need for sustainable management and recycling of nutrient-rich anaerobically digested food waste (FWD). Closing the resource loop and achieving circular economy goals necessitate exploring the potential of FWD as a substrate for cultivating microalgae and producing biofuels. Emerging technologies, such as thermal conversion methods (pyrolysis and hydrothermal treatment), offer promising avenues for transforming FWD into value-added products like biochar and hydrochar, which have diverse applications. Additionally, hydrothermal carbonization represents an effective technique for managing high-moisture digestion, providing benefits such as enhanced water drainage, functional carbon materials, and solid fuel production. Integrating anaerobic digestion with subsequent valorization techniques can significantly advance circular economy objectives [73].

Waste management remains a critical environmental issue, and traditional methods such as landfilling are merely temporary fixes rather than solutions. Effective waste recycling is economically advantageous, reducing reliance on raw materials and minimizing environmental impact. Sustainable waste management practices, including those based on circular economy principles, are vital. For instance, universities can recycle food waste into fertilizers for campus gardens, thereby reducing waste and food costs, which aligns with circular economy goals. Addressing waste generation and minimizing food waste through innovative recycling methods can significantly reduce treatment costs and contribute to a cleaner environment [74].

The rapid population growth and lifestyle changes have led to a dramatic increase in food waste from industrial, agricultural, and household sources, with approximately one-third of produced food wasted annually. This not only depletes resources but also poses environmental and health risks. Food waste, rich in biologically active compounds such as polyphenols, dietary fibers, proteins, fats, vitamins, and minerals, can be transformed into value-added products. Advances in extracting these compounds are fostering new uses for food waste in sectors like food, bioplastics, bioenergy, and organic fertilizers. The development of innovative techniques for extracting and utilizing these compounds is crucial for reducing waste, conserving resources, and promoting sustainability. Emerging research emphasizes the potential of food waste in creating functional food components, cosmetics, and dietary supplements, and highlights the opportunities for incorporating waste-derived materials into active packaging and other industrial applications. Evaluating factors such as storage stability, practical application, and cost will be essential for enhancing the industry’s adaptability to these sustainable practices [75].

16. Waste recycling is the way to achieve food security and sustainable development

The concept of “shallow environmentalism” contends that there is a need to expand the resource base through the development of renewable resources, finding alternatives to non-renewable resources, and optimizing current resource use. It suggests that technological advancements will enable humans to control the land to meet their growing demands, with any emerging problems being addressed through technological advancement. It posits that the root causes of the environmental crisis, such as pollution, resource depletion, biodiversity loss, poverty, and inequality, stem from ignorance, greed, and incorrect environmental practices, rather than the values of the dominant modernity model centered around humans, its standards, institutions, or practices [56].

Ecological modernization considers the compatibility between the environment and development not only possible but beneficial for the business sector, suggesting that sustainable development can take a step

forward. It emphasizes that the industrial society will not only survive but can adapt well and fruitfully to environmental pressures. Pollution reflects inefficiency and thus adds further costs to the business sector, whereas working within cost, effectiveness, and efficiency boundaries [56].

Circular economy is defined as an organized approach to economic development and the triple dimension of sustainable development, a result of the application of the industrial revolution by reducing environmental accumulations that pose a threat to the environment through recycling until waste is fully exhausted and converted into new materials useful for consumers. Hence, researchers have become more interested in the circular economy as an alternative to the linear economy, which turns consumed materials into waste and leads to their accumulation in the environment. The main goal of the circular economy is to achieve economic prosperity [76]. There is currently a growing interest in manufacturing food products containing nutrients that enhance health, prevent nutrition-related disorders, improve sensory and natural characteristics, prevent spoilage and unwanted changes.

16.1. Benefiting from fish waste to achieve sustainable development

There are huge amounts of fish waste, including inedible parts such as skeletal structures, internal organs, heads, scales, and skin, as well as fish unsuitable for consumption and processing due to their color, size, type, and damage during handling and processing. These waste products are usually discarded or directly used as fertilizer. Due to the large quantities of waste and economic pressure, among other factors related to obtaining useful materials, a device has been designed to extract oils from fish waste using infrared radiation to utilize fish waste from carp (*Cyprinus carpio*) with its massive quantities, low cost, and high nutritional value [77]. The oil is used in margarine production and serves as feed for fish farms. The by-products of oil extraction are protein concentrates, which are used in fish farm feed and fertilizers, as all by-products are utilized in addition to the extracted oil. Fish waste oils can be used for human consumption purposes and animal feed by blending them with natural feed as they are a rich source of vitamins A and D. Alternatively, they can be used in linoleum sealing, detergent production, rubber, decorative materials, printing ink, cosmetics, and leather production [78].

Rustad [79] noted that approximately 20 million tons, equivalent to 25% of total fish production, are disregarded as by-products or waste, causing environmental pollution. However, these waste products can serve as a source of enzymes and fats [80,81,82]. The oil content in fish waste ranges from 1.4% to 40.1% [83], with fish oil being one of the best sources of essential fatty acids (omega-3) [84], which are among the most effective anti-inflammatory agents with minimal usage and no negative side effects compared to chemical medications that may be lethal [85].

16.2. Extracting hyaluronic acid from animal waste

The by-products of slaughterhouses can be utilized in biotechnology and polymer applications, given the thousands of tons produced from fish eyes, poultry heads, and other waste materials, which pose numerous environmental and health problems. They can be employed in the cosmetics, medical, pharmaceutical, and food industries [86]. An example of this is the extraction of pure hyaluronic acid from poultry waste, such as rooster combs, using cost-effective methods suitable for industrial production [87].

16.3. Using by-products of oil presses in preparing bread

Activating what is known as the circular economy and sustainable development involves maximizing the utilization of waste or by-products from oil mills, including sesame, flaxseed, anise, black cumin, coconut, and sunflower residues after oil extraction. These by-products contain important nutrients and natural antioxidants such as numerous minerals, vitamins, essential and non-essential amino acids, as well as saturated and unsaturated fatty acids, phenols and flavonoids. Addition of these by-products to various foods, such as bakery and meat products, can improve the nutritional and functional properties of the final products [88]. Dahdah et al. [89] demonstrated that partially replacing wheat flour with olive pomace enhanced the nutritional, functional, biological, and sensory qualities of bread while having minimal impact on its technological properties.

16.4. Using feather and wool waste to prepare antioxidant protein hydrolysates

Recent attention has been directed towards peptides resulting from protein degradation as an excellent source of natural antioxidants, replacing synthetic antioxidants that have negative effects on human health. It is possible to produce biologically active peptides from proteins that have various physiological functions in living organisms, such as antioxidants, antimicrobial agents, blood pressure and cholesterol-lowering agents, immune system enhancers, and metal chelators [90–91]. Due to the significant abundance of slaughterhouse residues, including chicken feathers and sheep wool, which are disposed of into the environment without being utilized and are unable to degrade, they are considered a source of environmental pollution. However, they can be used in the production of biopolymers, such as keratin, which has a potential for application in many fields. Keratin in various forms (powders, micro/nanoparticles, films, hydrogels, sponges, nanofibrous materials) can be applied for purification of air and water, drug delivery and packaging, as well as in production of animal feed and fertilizers [92].

16.5. Use of bioactive carotenoids extracted from shrimp shells as antioxidants in food systems

Recent scientific trends in the field of food science emphasize the utilization of functional properties of foods and their active components to make food ingredients that inhibit the growth of microorganisms and act as antioxidants [93]. The need to use astaxanthin as a natural antioxidant for food preservation arises in line with the advancement of modern manufacturing techniques in the food industry to meet increasing nutritional requirements and move away from artificial additives to ensure the human health aspect. There is an attempt to leverage marine biowaste, which is wasted in hundreds of tons, containing biologically active compounds crucial for food preservation [94]. Applied studies have been conducted to test the effectiveness of carotenoid compounds extracted from shrimp shells of *Penaeus semisulcatus, Penaeus japonicus* and *Exopalaemon styliferus* species obtained from local markets as antioxidants in sesame oil. The extract also contributed as a 1% antioxidant in sesame oil by stabilizing the values of peroxide and thiobarbituric acid [95].

16.6. Using onion, potato and lemon peels as antioxidants and including them in the manufacture of meat products

During food processing of fruits and vegetables, significant quantities of waste are generated, causing serious environmental issues. Therefore, it is necessary to recycle and utilize them [96]. The peels of these materials contain numerous active compounds, including polyphenolic compounds, which are natural antioxidants that prevent the formation of free radicals in the body. These important active compounds were obtained from potato, onion, lemon, and clementine peels [97,98,99,100]. The addition of plant peel extracts as functional components, antioxidants, and antimicrobial agents preserves food products, including meat and meat products, enhancing their oxidative stability, maintaining quality, prolonging shelf life, and obtaining natural and safe products. This approach replaces the addition of chemical and synthetic substances with toxic and harmful effects on consumer health, such as synthetic antioxidants, nitrates, and nitrites, which are added to stabilize the color of processed meat products and prolong their storage life [101].

17. Nanotechnology applications in achieving food security and sustainable development

17.1. Nanotechnology applications in food packaging

The issue of food security represents a fundamental problem in light of the linear increase in population numbers. Achieving food security and sustainable agricultural development requires the utilization of all modern technologies related to food and nutrition. Several studies have indicated that food production will be affected by numerous variables over the next two decades due to water issues, energy crises, rising prices, and unfavorable climate variations. Specialists may resort to using modern technologies, including nanotechnology, to address these needs. It is expected that such technologies will contribute to increasing food production globally. By the year 2040, nanotechnology is projected to be incorporated into the production of most food items, as it does not affect the chemical composition, taste, or texture of food products [102].

Applications of nanotechnology in the food industry include nanocapsules and nanoparticles, which are utilized to enhance food flavor, treat various plant sterols, and remove chemical substances and pathogens from food. Nanotechnology has become widely used in the manufacturing, packaging, and processing of food products [103], with an expected utilization that will be expanded across various industries in the coming years. The production of effective and intelligent packaging capable of extending the shelf life of food products is a significant goal for many companies involved in the production of food packaging materials. These packages are characterized by their ability to minimize the impact of changes in external environmental humidity and temperature on the contents through the fine pores they contain. Furthermore, such packaging can clearly indicate the potential contamination of consumed food [104].

Nanotechnology can contribute to the development of antibacterial and antifungal properties on the surfaces of packaging materials to inhibit the growth and spread of microorganisms in food. Additionally, it

can increase the sensitivity of these surfaces to any chemical changes that occur in the food substance, expressing them clearly. Currently, there are between 400–500 nanoproducts of food packaging materials available in the global markets, and it is anticipated that nanotechnology will be used in the production of approximately 25% of packaging materials on a commercial scale over the next two decades [105].

17.2. Improving the bioavailability of nutrients using nanotechnology

Nanotechnology refers to a collection of techniques that manipulate matter at the molecular and atomic levels, which are not visible under an ordinary microscope, with dimensions typically around 1/1000th the width of a human hair. What makes this technology promising is that food substances remain unchanged in their chemical composition, unlike genetic modification techniques. Nanotechnology works solely by reducing the size of food particles without altering the substance itself. By working on particles smaller than the food material, new properties such as electrical conductivity, elasticity, increased strength, color variation, and enhanced reactivity can emerge. These properties are not evident at the macroscopic or even microscopic levels of the material [106]. In recent years, human understanding of this technology has grown alongside the increasing capacity to find applications for sustainable development in the food manufacturing industry. However, further time is needed for commercial-scale application of this technology in food manufacturing [103].

There is a possibility that this technology will have a significant impact on the selection of suitable raw materials for manufacturing, and it may also unexpectedly alter the extent of food's effect on human body structure. For instance, German chemical laboratories like BASF produce nano-sized lycopene (a type of carotenoid pigment) as an additive for manufacturing fruit juices, cheeses, and margarine. Carotenoids are known antioxidants that convert into vitamin A in the body. BASF reports that the body absorbs carotenoids produced by nanotechnology more easily, and foods containing these manufactured carotenoids remain fresh for longer periods [107].

Furthermore, nanotechnology has been utilized in the Nutralease program in the Applied Chemistry department to develop compound liquids that transport nano-sized nutritional elements to the body's cells. These particles are emulsifying agents containing essential nutrients such as plant-based carotenoids and sterols. These liquids facilitate the easy entry of these elements into the bloodstream through the small intestine. These liquids can also be used to manufacture clear beverages free from impurities, loaded with these important nutrients processed using nanotechnology, and unaffected by heat treatments such as pasteurization [108].

One of the prominent benefits of this new technology is its ability to enhance the bioavailability of food substances. For example, in China, a nanotechnology company utilized particles smaller than 100 nanometers to release plant elements into green tea solutions, which would otherwise be inaccessible. This paved the way for various nano-enriched tea products rich in selenium, which helps absorb or attract free radicals that destroy cells, thereby reducing cholesterol and blood fat levels. The same Chinese company also applies nanotechnology to maximize the beneficial properties of coffee [109].

One of the applied research studies in this field involves extending the shelf life of pasteurized milk by adding Chitosan Nanoparticles (CNP), derived from chitosan through ionotropic gelation and sonication methods. It has been found that CNP compound at a concentration of 0.3% w/v inhibits the growth of *Bacillus cereus* vegetative cells in stored pasteurized milk at 5 °C, prolonging its shelf life from two weeks to 30 days. Additionally, it does not affect the physical and chemical properties of pasteurized milk, such as acidity and color [110].

18. Potential hazards and risks associated with nanotechnology

Nanotechnology, while promising, poses several potential hazards and risks that necessitate thorough investigation. The increased use of engineered nanoparticles (NPs) across various products raises concerns about their safety throughout their lifecycle. Key exposure routes include inhalation, dermal contact, and ingestion. Inhaled nanoparticles can deposit in the respiratory tract, potentially causing oxidative stress and inflammatory reactions, with some evidence linking them to tumor formation in rats under overload conditions. There is also concern about their ability to cross into the brain via the olfactory epithelium and their potential translocation into systemic circulation, although evidence on this is inconsistent [111].

Dermal exposure to nanoparticles, such as those in sunscreens, has not shown significant systemic absorption through intact skin. However, the adequacy of existing skin testing protocols is debated. Oral exposure to nanoparticles is utilized intentionally in food and pharmaceuticals, but the implications for systemic uptake and safety are still under evaluation [111].

Environmental concerns are also significant. The large-scale production of nanomaterials raises the risk of environmental release through various pathways. Current data on the bioaccumulation, bio-toxicity, and biodegradation of nanoparticles in environmental species are limited. Preliminary studies suggest that while some nanomaterials, like fullerenes, may exhibit toxicity to aquatic organisms, others, such as single-walled carbon nanotubes (SWNT), show limited bacterial toxicity. Thus, comprehensive, case-by-case assessments are needed to understand the environmental and health impacts fully. Despite these uncertainties, nanotechnology holds potential for environmental benefits, such as in bioremediation and enhancing renewable energy technologies, which could reduce dependence on fossil fuels [111,112].

19. Conclusion

In conclusion, sustainable agriculture emerges as a multifaceted approach that balances the production of food and agricultural products with broader economic, social, and environmental considerations. This review underscores the importance of sustainable practices in enhancing the quality of life for farmers and society at large. By addressing climate change, economic development, and social equity, sustainable agriculture provides a framework for achieving long-term agricultural viability. The environmental perspective emphasizes the need for processes that conserve natural resources, promote soil and water health, and protect biodiversity while minimizing reliance on harmful chemicals. Meanwhile, the social and economic dimensions highlight the necessity of meeting global food demands, supporting human rights, and fostering ethical treatment of animals. As this review illustrates, integrating these perspectives is crucial for developing effective, shared solutions that advance sustainability in agriculture. Continued exploration and application of sustainable practices are essential for addressing the complex challenges facing modern agriculture and ensuring a resilient and equitable food system.

REFERENCES

1. Uriona, M., Grobbelaar, S. S. (2018). Innovation system policy analysis through system dynamics modelling: A systematic review. *Science and Public Policy*, 46(1), 28–44. https://doi.org/10.1093/scipol/scy034
2. Harjan, S. A., Abdulrida, M. S., Alduhaidahawi, H. M. K., Jiyad, A. A. (2021). Supporting sustainable development processes and measuring the impact of financial inclusion on them. *Cihan University-Erbil Journal of Humanities and Social Sciences*, 5(2), 60–68. https://doi.org/10.24086/cuejhss.v5n2y2021.pp60-68 (In Arabic)
3. United Nations. (2018). The Sustainable Development Goals Report 2018. Retrieved from https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2018/thesustainabledevelopmentgoalsreport2018-en.pdf Accessed March 2, 2023.
4. Eyring, V., Gillett, N. P., Achuta Rao, K. M., Barimalala, R., Barreiro Parrillo, M., Bellouin, N. et al. (2021). Human influence on the climate system. Chapter in a book: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2023. https://doi.org/10.1017/9781009157896.005
5. Duchenne-Moutien, R. A., Neetoo, H. (2021). Climate change and emerging food safety issues: A review. *Journal of Food Protection*, 84(11), 1884–1897. https://doi.org/10.4315/JFP-21-141
6. Bukovová, S., Foltínová, Ľ. (2020). Sustainable development and its impact on the quality of human capital. *SHS Web of Conferences*, 83, Article 01005. https://doi.org/10.1051/shsconf/20208301005
7. Gupta, J., Vegelin, C. (2016). Sustainable development goals and inclusive development. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 433–448. https://doi.org/10.1007/s10784-016-9323-z
8. Cepal, N. (1991). Sustainable development: Changing production patterns, social equity and the environment. ECLAC, 1991.
9. Elbehri, A., Segerstedt, A., Liu, P. (2013). Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, 2013.
10. Standish, R. J., Prober, S. M. (2020). Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund — is there a carbon-biodiversity trade-off? *Ecological Management and Restoration*, 21(3), 165–172. https://doi.org/10.1111/emr.12426
11. Arthur, W. B. (2021). Foundations of complexity economics. *Nature Reviews Physics*, 3(2), 136–145. https://doi.org/10.1038/s42254-020-00273-3
12. Grosskurth, J., Rotmans, J. (2005). The scene model: Getting a grip on sustainable development in policy making. *Environment, Development and Sustainability*, 7, 135–151. http://doi.org/10.1007/s10668-003-4810-0
13. Lowe, I. (2004). Globalisation, environment and social justice. *Social Alternatives*, 23(4), 37–41.
14. Dambudzo, I. I. (2015). Curriculum issues: Teaching and learning for sustainable development in developing countries: Zimbabwe case study. *Journal of Education and Learning*, 4(1), 11–24. https://doi.org/10.5539/JEL.V4N1P11
15. Trusina, I., Jermolajeva, E. (2021). The scientific discourse on the concept of sustainable development. *Eastern Journal of European Studies*, 12(2), 298–322. https://doi.org/10.47743/ejes-2021-0215

16. UN General Assembly (2014). Report of the Intergovernmental Committee of Experts on Sustainable Development Financing. New York, United Nations, 2014. Retrieved from https://www.un.org/esa/ffd/wp-content/uploads/2014/12/ICESDF.pdf Accessed March 10, 2024.
17. Falkenmark, M., Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(3), 129–132. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733–9496(2006)132:3(129)
18. Sorensen, N. N., Van Hear, N., Engber-Pedersen, P. (2003). Migration, development and conflict: State-of-the-art overview. Chapter in a book: The Migration-Development Nexus. Geneva: IOM, 2003.
19. UNESCO. (2016). Global Education Monitoring Report: Education for People and Planet: Creating Sustainable Futures for All. Unesco, 2016.
20. Kruk, M. E., Gage, A. D., Arsenault, C., Jordan, K., Leslie, H. H., Roder-DeWan, S. et al. (2018). High-quality health systems in the Sustainable Development Goals era: Time for a revolution. *The Lancet Global Health*, 6(11), e1196-e1252. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(18)30386-3
21. Hess, P. N. (2013). Economic Growth and Sustainable Development. London, Routledge, 2013. https://doi.org/10.4324/9780203070512
22. Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M., Zornes, M. (2011). Resource Revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs. Retrieved from https://globaltrends.thedialogue.org/publication/resource-revolution-meeting-the-worlds-energy-materials-food-and-water-needs/ Accessed April 4, 2024.
23. FAO. (2012). Towards the future we want. End hunger and make the transition to sustainable agricultural and food systems. Retrieved from http://www.fao.org/docrep/015/an894e/an894e00.pdf Accessed April 4, 2024.
24. CFS. (2011). Global Strategic Framework for Food Security and Nutrition. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/cfs/Docs1011/WG_GSF/GSF_annotated_outline_formatted_Rev1_22_Jun_11.pdf Accessed April 4, 2024.
25. Ali, M. M., Alnuaimi, S. A. (2023). The importance of the agricultural sector to achieve food security in Iraq. *Journal of Administration and Economics*, Special issue 3, 1–18. (In Arabic)
26. Pawlak, K., Kołodziejczak, M. (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13), Article 5488. https://doi.org/10.3390/su12135488
27. Koc, M., Jernigan, C., Das, R. (2015). Food security and food sovereignty in Iraq: The impact of war and sanctions on the civilian population. *Food, Culture and Society*, 10(2), 317–34. https://doi.org/10.2752/155280107X211467
28. Al-Taye, H. K., Fayyadh, S. O., Hassooni, I. R. (21–22 January, 2021). *A vision to develop the effectiveness of the dissemination of innovations to rationalize the use of irrigation water in Iraqi agriculture*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 735, 2nd Virtual International Scintific Agrticultural Conference, Iraq, 2021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/735/1/012036
29. Monke, E. A., Pearson, S. R. (1989). The policy analysis matrix for agricultural development. Ithaca: Cornell University Press, 1989.
30. Hussein, I. A., (2017). Sustainable agricultural development in Iraq. Solutions and treatments obstacles. *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 23(95), Article 345. https://doi.org/10.33095/jeas.v23i95.392 (In Arabic)
31. Grimes, A., Harper, R. (5–10 April, 2008). *Celebratory technology: New directions for food research in HCI*. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2008. https://doi.org/10.1145/1357054.1357130
32. Min, W., Jiang, S., Liu, L., Rui, Y., Jain, R. (2019). A survey on food computing. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(5), 1–36. https://doi.org/10.1145/3329168
33. Herrero, M., Thornton, P. K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Bodirsky, B. L., Pradhan, P. et al. (2021). Articulating the effect of food systems innovation on the Sustainable Development Goals. *The Lancet Planetary Health*, 5(1), e50-e62. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30277-1
34. McElwee, P., Calvin, K., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V. et al. (2020). The impact of interventions in the global land and agri-food sectors on Nature's Contributions to People and the UN Sustainable Development Goals. *Global Change Biology*, 26(9), 4691–4721. https://doi.org/10.1111/gcb.15219
35. Erdogan, S. (2022). Investigating the effects of food production on sustainable development: The case of the upper middle-income countries. *Sustainable Development*, 30(4), 606–619. https://doi.org/10.1002/sd.2252
36. Stephenson, L. S., Latham, M. C., Ottesen, E. A. (2000). Global malnutrition. *Parasitology*, 121(S1), S5-S22. https://doi.org/10.1017/s0031182000006478
37. Prasad Dhore, D. Y. K. S., Kumbharkar, D. P. (2021). Malnutrition detection and administration organization. *International Journal of Computer Techniques*, 8(1), 1–4.
38. Siddiqui, F., Salam, R. A., Lassi, Z. S., Das, J. K. (2020). The intertwined relationship between malnutrition and poverty. *Frontiers in Public Health*, 8, Article 453. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00453
39. Sabbahi, M., Li, J., Davis, C., Downs, S. M. (2018). The role of the Sustainable Development Goals to reduce the global burden of malnutrition. Chapter in a book: Advances in Food Security and Sustainability. Elsevier, 2018. https://doi.org/10.1016/bs.af2s.2018.09.007
40. Mensi, A., Udenigwe, C. C. (2021). Emerging and practical food innovations for achieving the Sustainable Development Goals (SDG) target 2.2. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 783–789. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.079
41. Heidari, S.Y., Taleizadeh, A. A., Thaichon, P. (2023). Sustainable plant-based dietary supply chain design to reduce malnutrition in deprived areas. *Computers and Industrial Engineering*, 181, Article 109234. http://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109234
42. Adilov, T. T., Israilova, X. M., Uzohkov, I. E., Axtamov, M. X., Raxmatullayeva, X. I. (2021). Food security: National food market strategy. *Academicia: An International Multidisciplinary Research Journal*, 11(2), 619–626. http://doi.org/10.5958/2249-7137.2021.00445.6
43. Eini-Zinab, H., Sobhani, S. R., Rezazadeh, A. (2021). Designing a healthy, low-cost and environmentally sustainable food basket: An optimisation study. *Public Health Nutrition*, 24(7), 1952–1961. https://doi.org/10.1017/s1368980020003729
44. Sultana, F., Wahab, M. A., Nahiduzzaman, M., Mohiuddin, M., Iqbal, M. Z., Shakil, A. et al. (2023). Seaweed farming for food and nutritional security, climate change mitigation and adaptation, and women empowerment: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 8(5), 463–480. http://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.001
45. Rezvi, H. U. A., Tahjib-Ul-Arif, Md., Azim, Md. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M. H., Najnine, F. et al. (2023). Rice and food security: Climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food and Energy Security*, 12(1), Article e430. http://doi.org/10.1002/fes3.430
46. Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J. et al. (2019). The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. Global Environmental Change, 58, 101944. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944
47. Sissakian, V.K., Al-Ansari, N., Adamo N., Laue, J. (2023). The impact of water scarcity on food security in Iraq. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 17(9), 441–456. https://doi.org/10.17265/1934-7359/2023.09.003
48. Boulanger, P.-M. (2008). Sustainable development indicators: A scientific challenge, a democratic issue. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, 1(1), 59–73. https://doi.org/10.5194/sapiens-1-59-2008
49. Fan, L., Feng, C., Wang, Z., Tian, J., Huang, W., Wang, W. (2022). Balancing the conservation and poverty eradication: Differences in the spatial distribution characteristics of protected areas between poor and non-poor counties in China. *Sustainability*, 14(9), Article 4984. https://doi.org/10.3390/su14094984
50. Fischborn, M., Sandwith, T. (2021). Solutions for Development Challenges: Insights from Protected and Conserved Areas. IUCN, Gland, Switzerland, 2021.
51. Wei, F., Ping, X., Hu, Y., Nie, Y., Zeng, Y., Huang, G. (2021). Main achievements, challenges, and recommendations of biodiversity conservation in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*, 36(4), 375–383.
52. Alkire, S., Seth, S. (2015). Identifying destitution through linked subsets of multidimensionally poor: An ordinal approach. WIDER Working Paper, Helsinki, 2015. https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2015/040-9
53. Grosso, G., Mateo, A., Rangelov, N., Buzeti, T., Birt, C. (2020). Nutrition in the context of the Sustainable Development Goals. *European Journal of Public Health*, 30(Suppl 1), i19-i23. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa034
54. ZEF and FAO. (2020). Investment costs and policy action opportunities for reaching a world without hunger (SDG2). Rome and Bonn, 2020. https://doi.org/10.4060/cb1497en
55. Jacobs, D. R., Kromhout, D. (2019). Education, diet, and incident cardiovascular disease: ecological interactions and conclusions. *The Lancet Global Health*, 7(6), e684-e685. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30187-1
56. Xiong, T. (2014). Shallow environmentalism: A preliminary eco-critical discourse analysis of secondary school English as a Foreign Language (EFL) texts in China. *The Journal of Environmental Education*, 45(4), 232–242. https://doi.org/10.1080/00958964.2014.943686
57. Oxford Poverty and Human Development Initiative. Retrieved from https://ophi.org.uk/. Accessed March 02, 2024.
58. Rozin, P. (2005). The meaning of food in our lives: A cross-cultural perspective on eating and well-being. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 37 (Suppl 2), S107-S112. https://doi.org/10.1016/s1499-4046(06)60209-1
59. James, P. (2017). Creating capacities for human flourishing: An alternative approach to human development. Chapter in a book: Cultures of Sustainability and Wellbeing. Routledge, 2017. http://doi.org/10.9774/gleaf.9781315306599_4
60. Caldeira, C., De Laurentiis, V., Corrado, S., van Holsteijn, F., Sala, S. (2019). Quantification of food waste per product group along the food supply chain in the European Union: A mass flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 479–488. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.011
61. Lemaire, A., Limbourg, S. (2019). How can food loss and waste management achieve sustainable development goals? *Journal of Cleaner Production*, 234, 1221–1234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.226
62. Santeramo, F. G., Lamonaca, E. (2021). Food loss–food waste–food security: A new research agenda. *Sustainability*, 13(9), Article 4642. https://doi.org/10.3390/su13094642
63. De Boni, A., Ottomano P, G., De Angelis, M., Minervini, F. (2022). Challenges for a sustainable food supply chain: A review on food losses and waste. *Sustainability*, 14(24), Article 16764. https://doi.org/10.3390/su142416764
64. Principato, L., Marchetti, S., Barbanera, M., Ruini, L., Capoccia, L., Comis, C. et al. (2023). Introducing digital tools for sustainable food supply management: Tackling food loss and waste in industrial canteens. *Journal of Industrial Ecology*, 27(4), 1060–1075. https://doi.org/10.1111/jiec.13391
65. Chan, C. Y., Prager, S., Balie, J., Kozicka, M., Hareau, G., Valera, H. G. et al. (2021). The future of food security, nutrition and health for agri-food systems transformation. *SocArxiv Papers*, 2021. https://doi.org/10.31235/osf.io/qgn9u
66. Kumar, P., Sharma, N., Sharma, S., Mehta, N., Verma, A. K., Chemmalar, S. et al. (2021). In-vitro meat: A promising solution for sustainability of meat sector. *Journal of Animal Science and Technology*, 63(4), 693–724. https://doi.org/10.5187/jast.2021.e85
67. 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
68. Schwingshackl, L., Bogensberger, B., Benčič, A., Knüppel, S., Boeing, H., Hoffmann, G. (2018). Effects of oils and solid fats on blood lipids: A systematic review and network meta-analysis. *Journal of Lipid Research*, 59(9), 1771–1782. https://doi.org/10.1194/jlr.p085522
69. Bajželj, B., Laguzzi, F., Röös, E. (2021). The role of fats in the transition to sustainable diets. *The Lancet Planetary Health*, 5(9), e644-e653.
70. Herforth, A., Arimond, M., Álvarez-Sánchez, C., Coates, J., Christianson, K., Muehlhoff, E. (2019). A global review of food-based dietary guidelines. *Advances in Nutrition*, 10(4), 590–605. https://doi.org/10.1093/advances/nmy130
71. Ferreira, H., Pinto, E., Vasconcelos, M. W. (2021). Legumes as a cornerstone of the transition toward more sustainable agri-food systems and diets in Europe. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Article 694121. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.694121

72. Sharma, P., Gaur, V. K., Sirohi, R., Varjani, S., Hyoun Kim, S., Wong, J. W. C. (2021). Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 325, Article 124684. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124684
73. Dutta, S., He, M., Xiong, X., Tsang, D. C. W. (2021). Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review. *Bioresource Technology*, 341, Article 125915. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915
74. Bigdeloo, M., Teymourian, T., Kowsari, E., Ramakrishna, S., Ehsani, A. (2021). Sustainability and circular economy of food wastes: Waste reduction strategies, higher recycling methods, and improved valorization. *Materials Circular Economy*, 3(1), Article 3. https://doi.org/10.1007/s42824-021-00017-3
75. Zainal Arifin, M., Mohd Adzahan, N., Zainal Abedin, N., Lasik-Kurdyś, M. (2023). Utilization of food waste and by-products in the fabrication of active and intelligent packaging for seafood and meat products. *Foods*, 12(3), Article 456. https://doi.org/10.3390/foods12030456
76. Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
77. Al-Hilphy, A. R. S., Al-Shatty, S. M. H., Al–Mtury A. A. A. (2020). Characterization of fatty acids and determination of Vitamins A and E in carp fish (Cyprinus carpio) viscera oil extracted using infrared radiation. *Syrian Journal of Agricultural Research,* 7(1), 185–197. (In Arabic)
78. Abd El-Rahman, F., Mahmoud, N., Badawy, A. E. K., Younis, S. (2018). Extraction of fish oil from fish viscera. *Egyptian Journal of Chemistry,* 61(2), 200–211. http://doi.org/10.21608/ejchem.2018.2798.1230
79. Rustad, T. (2003). Utilization of marine by-products. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 2(4), 458–463.
80. Arnesen, J., Gildberg, A. (2007). Extraction and characterization of gelatin from Atlantic salmon (*Salmo salar*) skin. *Bioresource Technology*, 98(1), 53–57. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.021
81. Bhaskar, N., Sathisha, A. D., Sachindra, N. M., Sakhare, P. Z., Mahendrakar, N. S. (2007). Effect of acid ensiling on the stability of visceral waste proteases of Indian major Carp *Labeo rohita*. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 16(1), 73–86. http://doi.org/10.1300/J030v16n01_06
82. Gildberg, A. (2001). Utilisation of male Arctic capelin and Atlantic cod intestines for fish sauce production — evaluation of fermentation conditions. *Bioresource Technology*, 76(2), 119–123. https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00095-x
83. Babbit, K.J. (April 27–27, 1990). *Intrinsic quality and species of north pacific fish in making profits out of seafood wastes.* Proceedings of the International Conference on Fish by Products. Anchorage, Alaska, 1990.
84. Covington, M. B. (2004). Omega-3 fatty acids. *American Family Physician*, 70(1), 133–140.
85. Maroon, J.C., Bost, J.W. (2006). ω-3 fatty acid (fish oil) as an anti-inflammatory: An alternative to nonsteroidal anti-inflammatory drugs for discogenic pain. *Surgical Neurology*, 65(4), 326–331. https://doi.org/10.1016/j.surneu.2005.10.023
86. Hashim, M., Akbar, A., Safi, S. Z., Arshad, M., Gul, Z. (2023). Valorization of animal waste for the production of sustainable bioenergy. Chapter in a book: Climate Changes Mitigation and Sustainable Bioenergy Harvest Through Animal Waste. Springer, Cham, 2023. http://doi.org/10.1007/978-3-031-26224-1_17
87. Kulkarni, S. S., Patil, S. D., Chavan, D. G. (2018). Extraction, purification and characterization of hyaluronic acid from Rooster comb. *Journal of Applied and Natural Science*, 10(1), 313–315. https://doi.org/10.31018/jans.v10i1.1623
88. Nevara, G. A., Giwa Ibrahim, S., Syed Muhammad, S. K., Zawawi, N., Mustapha, N. A., Karim, R. (2022). Oilseed meals into foods: An approach for the valorization of oilseed by-products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* 63(23), 6330–6343. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2031092
89. Dahdah, P., Cabizza, R., Farbo, M. G., Fadda, C., Del Caro, A., Montanari, L. et al. (2024). Effect of partial substitution of wheat flour with freeze-dried olive pomace on the technological, nutritional, and sensory properties of bread. *Frontiers in Sustainable Food Systems,* 8, Article 1400339. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1400339
90. Silvestre, M.P.C. (1997). Review of methods for the analysis of protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 60(2), 263–271. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00347-0
91. Rutherfurd, S.M. (2010). Methodology for determining degree of hydrolysis of proteins in hydrolysates: A Review. *Journal of AOAC International*, 93(5), 1515–1522. https://doi.org/10.1093/jaoac/93.5.1515
92. Vineis, C., Varesano, A., Varchi, G., Aluigi, A. (2019). Extraction and characterization of keratin from different biomasses. Chapter in a book: Keratin as a Protein Biopolymer. Springer Series on Polymer and Composite Materials. Springer, Cham, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02901-2_3
93. Helkar, P. B., Sahoo, A. K., Patil, N. J. (2016). Review: Food industry by-products used as a functional food ingredients. *Inernational Journal of Waste Resources*, 6(3), Article 1000248. https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000248
94. Stachowiak, B., Szulc, P. (2021). Astaxanthin for the food industry. *Molecules*, 26(9), Article 2666. https://doi.org/10.3390/molecules26092666
95. Awad, H.A., Hindi, M.J. (2018). Effect of carotenoids extracted from shrimp shell on lipid oxidation in sesame oil. *Plant Archives*, 18(2), 2324–2328.
96. Parashar, S., Sharma, H., Garg, M. (2014). Antimicrobial and Antioxidant activities of fruits and vegetable peels: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 3 (1), 160–164.
97. Kumar, K., Yadav, A. N., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H. S. (2017). Food waste: A potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, Article 18. https://doi.org/10.1186/s40643-017-0148-6
98. Shabir, I., Pandey, V. K., Dar, A. H., Pandiselvam, R., Manzoor, S., Mir, S. A. et al. (2022). Nutritional profile, phytochemical compounds, biological activities, and utilisation of onion peel for food applications: A review. *Sustainability*, 14(19), Article 11958. https://doi.org/10.3390/su141911958
99. Gómezejía, E., Sacristán, I., Rosales-Conrado, N., León-González, M. E., Madrid, Y. (2023). Effect of storage and drying treatments on antioxidant activity and phenolic composition of lemon and clementine peel extracts. *Molecules*, 28(4), Article 1624. https://doi.org/10.3390/molecules28041624
100. Calcio Gaudino, E., Colletti, A., Grillo, G., Tabasso, S., Cravotto, G. (2020). Emerging processing technologies for the recovery of valuable bioactive compounds from potato peels. *Foods*, 9(11), Article 1598. https://doi.org/10.3390/foods9111598
101. Ibrahim, H.M., Haassan, I.M., Hamed, A.A.M. (2018). Application of lemon and orange peels in meat products: Quality and safety. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(4), 2703–2723. http://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.309
102. Singh, R., Dutt, S., Sharma, P., Sundramoorthy, A. K., Dubey, A., Singh, A. et al. (2023). Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety. *Global Challenges*, 7(4), Article 2200209. https://doi.org/10.1002/gch2.202200209
103. Paull, J. (2010). Nanotechnology no free lunch., *PLATTER*, 1(1), 9–17.
104. Perera, K. Y., Jaiswal, A. K., Jaiswal, S. (2023). Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods*, 12(12), Article 2422. https://doi.org/10.3390/foods12122422
105. Thiruvengadam, M., Rajakumar, G., Chung, I. M. (2018). Nanotechnology: Current uses and future applications in the food industry. *3 Biotech*, 8, Article 74. https://doi.org/10.1007/s13205-018-1104-7
106. Invernizzi, N., Foladori, G., Maclurcan, D. (2008). Nanotechnology's Controversial Role for the South. *Science, Technology and Society*, 13(1), 123–148. http://doi.org/10.1177/097172180701300105
107. Global / Human nutrition. (2022). Lucarotin® Beta-Carotene: An important provitamin A for health and wellbeing Retrieved from https://nutrition.basf.com/global/en/human-nutrition/portfolio/carotenoids/lucarotin-beta-carotene Accessed September 12, 2024.
108. Ravichandran, R. (2010). Nanotechnology applications in food and food processing: Innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry*, 1(2), P72-P96. https://doi.org/10.1080/19430871003684440
109. Wang, K., Fang, Q., He, P., Tu, Y., Liu, Z., Li, B. (2024). Unveiling the potential of selenium-enriched tea: Compositional profiles, physiological activities, and health benefits. *Trends in Food Science and Technology*, 145, Article 104356. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104356
110. Shawkat, S. M., Al-Jawasim, M., Khaleefah, L. S. (2019). Extending shelf life of pasteurized milk via chitosan nanoparticles. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 13(4), 2471–2478. https://doi.org/10.22207/JPAM.13.4.62
111. Borm, P. J. A., Robbins, D., Haubold, S., Kuhlbusch, T., Fissan, H., Donaldson, K. et al. (2006). The potential risks of nanomaterials: A review carried out for ECETOC. *Particle and Fibre Toxicology,* 3, 1–35. https://doi.org/10.1186/1743-8977-3-11
112. European Commission. (2004). Nanotechnologies: A preliminary risk analysis on the basis of a workshop organized in Brussels on 1–2 March 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission. Retrieved from https://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/documents/ev_20040301_en.pdf Accessed September 12, 2024.

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Nawal K. Z. AlFadhly, Assistant Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq Tel.: +964–773–600–47–12 E-mail: nawal.zben@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0366-7594	**Альфадли Навал К. З.** — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры Басра, 61004, Ирак Тел.: +964–773–600–47–12 E-mail: nawal.zben@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0366-7594
Anfal Alwan Al-Temimi, Assistant Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq Tel.: +964–770–567–37–84 E-mail: anfal.abdul_nabi@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2658-2194	**Ал-Темими Анфал Алван** — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры Басра, 61004, Ирак Тел.: +964–770–567–37–84 E-mail: anfal.abdul_nabi@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2658-2194

AUTHOR INFORMATION	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
Affiliation	**Принадлежность к организации**
Zina T. Alkanan, Assistant Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah Basrah, 61004, Iraq Tel.: +964–773–010–48–00 E-mail: zina.alkanan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0607-1358	**Алканан Зина Т.** — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры Басра, 61004, Ирак Tel.: +964–773–010–48–00 E-mail: zina.alkanan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0607-1358
Ammar B. Altemimi, Associate Professor, Department of Food Science, College of Agriculture, University of Basrah. Basrah, 61004, Iraq. College of Medicine, University of Warith Al-Anbiyaa Karbala, 56001, Iraq Tel.: +964–773–564–00–90 E-mail: ammar.ramddan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7750-5988	**Алтемими Аммар Б.** — адъюнкт-профессор, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный колледж, Университет Басры Басра, 61004, Ирак Медицинский колледж, Университет Уарис Аль-Анбия Карбала, 56001, Ирак Тел.: +964–773–564–00–90 E-mail: ammar.ramddan@uobasrah.edu.iq ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7750-5988
Mohamed Ibrahim Younis, Teaching Assistant, Department of Food Science, Faculty of Agriculture, Cairo University 1, Gamaa Street, Giza, 12613, Egypt Tel.: +2–0100–-42–22–92 E-mail: mohamedyounis2201@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4421-4885	**Юнис Мохамед Ибрагим** — Ассистент, кафедра пищевых наук, сельскохозяйственный факультет, Каирский Университет 12613, Египет, Гиза, ул. Гамаа, 1 Тел.: +2–0100–542–22–92 E-mail: mohamedyounis2201@agr.cu.edu.eg ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4421-4885
Angelo Maria Giuffrè, Professor, Food Technologies Laboratory, Department AGRARIA, University of Studies “Mediterranea” of Reggio Calabria Via dell'Università, 25, Reggio Calabria, 89124, Italy Tel.: +39–0965–169–43–62 E-mail: amgiuffre@unirc.it ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4663-8056	**Джуфре Анжело Мария** — профессор, лаборатория пищевых технологий, сельскохозяйственный факультет, Университет исследований “Медитеранеа” Реджо-ди-Калабрии 89124, Италия, Реджо-ди-Калабрия, Via dell'Università, 25 Тел.: +39–0965–169–43–62 E-mail: amgiuffre@unirc.it ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4663-8056
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 пищевых наук, 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
Contribution	**Критерии авторства**
Authors 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.