

ISSN 2072-9669
eISSN 2658-767X

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

ХиПС

33(4) | 2025

Storage and Processing
of Farm Products

SPFP



ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

Том 33, № 4 | 2025

Периодичность издания — 4 номера в год
Основан в 1993 г.

ISSN 2072-9669

eISSN 2658-767X

УЧРЕДИТЕЛЬ, ИЗДАТЕЛЬ И РЕДАКЦИЯ: Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация.

РЕДАКЦИЯ

Заведующий редакцией и академический редактор — Тихонова Елена Викторовна.
Выпускающий редактор — Иванова Марина Александровна.
Ответственный секретарь — Косычева Марина Александровна.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-71128 от 22 сентября 2017 г.

Журнал включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» по группам специальностей:

- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки) — с 01.02.2022
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (биологические науки) — с 15.02.2023
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры (технические науки) — с 15.02.2023
- 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и лекарственные культуры сельскохозяйственные науки) — с 15.02.2023
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки) — с 15.02.2023
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (сельскохозяйственные науки) — с 15.02.2023
- 4.3.3. Пищевые системы (биологические науки) — с 15.02.2023
- 4.3.3. Пищевые системы (технические науки) — с 15.02.2023
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) — с 15.02.2023

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ:

125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11
Тел. +7 (499) 750-01-11*6585

E-mail: info@spfp-mgupp.ru

Сайт учредителя: <https://www.mgupp.ru>

Сайт журнала: <https://www.spfp-mgupp.ru>

Адрес издателя: 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 11

Отпечатано в ООО «Издательство «Перспект»
121471, Москва, ул. Рябиновая, 51-А, стр. 1.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная. Бумага офсетная.
Тираж 100 экз. Подписано в печать 30.12.2025. Свободная цена.
Дата выхода в свет 30.12.2025.

16+

© Российский биотехнологический университет
(РОСБИОТЕХ), 2025

STORAGE AND PROCESSING OF FARM PRODUCTS

Vol. 33, No. 4 | 2025

Periodicity of publication — quarterly
Published since 1993

ISSN 2072-9669

eISSN 2658-767X

FOUNDER, PUBLISHER AND EDITORIAL: Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russian Federation.

EDITORIAL OFFICE

Head of Editorial Team and Academic Editor — Elena V. Tikhonova.
Issue Editor — Marina A. Ivanova.
Executive Secretary — Marina A. Kosycheva.

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communication, Information Technologies and Mass Media. The Mass Media Registration Certificate PI No FS77-71128 dated September 22, 2017.

The Journal is included in the «List of Russian peer-reviewed scientific journals in which the main scientific results of dissertations for the academic degrees of a doctor and candidate of sciences should be published» according to the groups of specialties:

- 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences) — from 01.02.2022
- 4.1.4. Gardening, vegetable growing, viticulture and medicinal crops (biological sciences) — from 15.02.2023
- 4.1.4. Horticulture, vegetable growing, viticulture and medicinal crops (technical sciences) — from 15.02.2023
- 4.1.4. Horticulture, vegetable growing, viticulture and medicinal crops agricultural sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (agricultural sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.3. Food systems (biological sciences) — from 15.02.2023
- 4.3.3. Food systems (technical sciences) — from 15.02.2023
- 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions (technical sciences) — from 15.02.2023

EDITORIAL CONTACTS:

11 Volokolamskoe Highway, Moscow, 125080, Russian Federation
Tel. +7 (499) 750-01-11*6585

E-mail: info@spfp-mgupp.ru

Founder website: <https://www.mgupp.ru>

Journal website: <https://www.spfp-mgupp.ru>

Publisher's address: 11 Volokolamskoe Highway, Moscow, 125080, Russian Federation

Printed by LLC "Prospect Publishing House"
121471, Moscow, Ryabinovaya Street, 51-A, Bldg. 1.

Format 60×84 1/8. Seal offset. Offset paper. 100 copies.
Signed in print 30.12.2025. Free price.
Date of publication 30.12.2025.

© Russian Biotechnological University (BIOTECH University), 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

ДАНИЛЬЧУК ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА — доктор технических наук, директор института прикладной биотехнологии имени академика РАН И.А. Рогова, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии:

Абдельмаксуд Тарек Гамаль	доктор пищевых наук, адъюнкт-профессор кафедры пищевых наук, Сельскохозяйственный факультет, Каирский университет, Гиза, Египет.
Аксёнова Лариса Михайловна	доктор технических наук, профессор, академик РАН, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Акулич Александр Васильевич	доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Республики Беларусь, Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, г. Могилев, Республика Беларусь
Аль-Наддаф Лина	PhD (биотехнология и молекулярная биология), Университет Аль-Баас, г. Хомс, Сирийская Арабская Республика
Андреев Николай Руфеевич	доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмалопродуктов — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Ансори Ариф Нур Мухаммад	PhD, доктор ветеринарных наук, научный сотрудник, Университет Айрланга, Сурабая, Индонезия
Ахремчик Олег Леонидович	доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Тверской государственной технической университет, г. Тверь, Российская Федерация
Баскаков Иван Васильевич	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, г. Воронеж, Российская Федерация
Битюков Виталий Ксенофонтович	доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Российская Федерация
Боронтов Олег Константинович	доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы им. А.Л. Мазлумова, г. Воронеж, Российская Федерация
Гинс Мурат Сабирович	доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, Федеральный научный центр овощеводства, г. Москва, Российская Федерация
Горлов Иван Федорович	доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, Поволжский НИИ производства и переработки мясомолочной продукции, г. Волгоград, Российская Федерация
Гудковский Владимир Александрович	доктор сельскохозяйственных наук, профессор академик РАН, Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина, г. Мичуринск, Российская Федерация
Добровольский Виктор Францевич	доктор технических наук, НИИ пищекоцентрализованной промышленности и специальной пищевой технологии — филиал ФИЦ питания и биотехнологии, г. Москва, Российская Федерация
Донник Ирина Михайловна	доктор биологических наук, профессор, академик РАН, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
Ильина Ирина Анатольевна	доктор технических наук, Северокавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, г. Краснодар, Российская Федерация
Калашникова Елена Анатольевна	доктор биологических наук, профессор, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация
Коденцова Вера Митрофановна	доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центра питания и биотехнологий, г. Москва, Российская Федерация
Копусь Михаил Мефодьевич	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Аграрный научный центр «Донской», Центр фундаментальных научных исследований, г. Зерноград, Российская Федерация
Короткий Игорь Алексеевич	доктор технических наук, профессор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация
Косован Анатолий Павлович	доктор экономических наук, академик РАН, НИИ хлебопекарной промышленности, г. Москва, Российская Федерация
Красуля Ольга Николаевна	доктор технических наук, профессор, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация
Кульнева Надежда Григорьевна	доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Российская Федерация
Левшин Александр Григорьевич	доктор технических наук, профессор, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

Лисицын Александр Николаевич	доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Лисицын Андрей Борисович	доктор технических наук, академик РАН, Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Мелешкина Елена Павловна	доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Неверов Евгений Николаевич	доктор технических наук, профессор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация
Никитюк Дмитрий Борисович	доктор медицинских наук, член-корреспондент РАН, профессор, Федеральное исследовательское учреждение питания и биотехнологии, г. Москва, Российская Федерация
Никифоров-Никишин Алексей Львович	доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, г. Москва, Российская Федерация
Оганесянц Лев Арсенович	доктор технических наук, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности — филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Ожерельев Виктор Николаевич	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Российская Федерация
Оробинский Владимир Иванович	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, г. Воронеж, Российская Федерация
Пасынкова Елена Николаевна	доктор биологических наук, Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» — филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Панфилов Виктор Александрович	доктор технических наук, академик РАН, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация
Петров Андрей Николаевич	доктор технических наук, академик РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт технологии консервирования — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва, Российская Федерация
Подвигина Ольга Анатольевна	доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова, г. Воронеж, Российская Федерация
Ражабов Тошпулот Файзуллоевич	PhD, Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, г. Самарканд, Республика Узбекистан
Савина Ольга Васильевна	доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация
Сагян Ашот Серобович	академик, доктор химических наук, профессор, президент, Национальная Академия наук, Республика Армения
Симоненко Сергей Владимирович	доктор технических наук, Научно-исследовательский институт детского питания — филиал Федерального исследовательского центра питания и биотехнологии, г. Истра, Российская Федерация
Стогниенко Ольга Ивановна	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова, г. Воронеж, Российская Федерация
Титов Евгений Иванович	доктор технических наук, академик РАН, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация
Тихомирова Наталья Александровна	доктор технических наук, профессор, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация
Тужилкин Вячеслав Иванович	доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация
Тутельян Виктор Александрович	доктор медицинских наук, академик РАН, профессор, Федеральный исследовательский центр питания и биотехнологии, г. Москва, Российская Федерация
Ульрих Наташа Поклар	PhD (биохимия), профессор, Университет Любляны, г. Любляна, Словения
Уша Борис Вениаминович	доктор ветеринарных наук, академик РАН, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), г. Москва, Российская Федерация
Храмцов Андрей Георгиевич	доктор технических наук, академик РАН, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация
Шингисов Азрет Утебаевич	доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии естественных наук РФ, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан

EDITOR-IN-CHIEF

TATIANA N. DANILCHUK – Doctor of Science (Engineering), Director of the Institute of Applied Biotechnology named after academician I.A. Rogov, Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russian Federation

Members of the Editorial Board:

Tarek Gamal Abedelmaksoud	PhD of Food Science, Associate Professor, Food Science Department, Faculty of Agriculture, Cairo University, Giza, Egypt
Larisa M. Aksyonova	Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbatov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Alexander V. Akulich	Doctor of Science (Engineering), Honoured Inventor of the Republic of Belarus, Professor, Belarusian State University of Food and Chemical Technologies, Mogilev, Republic of Belarus
Lina Alnaddaf	PhD in Biotechnology and Molecular Biology, Albaath University, Homs, Syrian Arab Republic
Nikolay R. Andreev	Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Starch – branch of the Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbatov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Arif Nur Muhammad Ansori	Doctor, Doctor in Veterinary Sciences, Researcher, Universitas Airlangga, Surabaya, Indonesia
Oleg L. Akhremchik	Doctor of Science (Engineering), Professor, Tver State Technical University, Tver, Russian Federation
Ivan V. Baskakov	Doctor of Science (Agriculture), Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russian Federation
Vitaliy K. Bitjukov	Doctor of Science (Engineering), Professor, Honored Science Worker of the Russian Federation, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation
Oleg K. Borontov	Doctor of Science (Agriculture), Leading Researcher, A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, Voronezh, Russian Federation
Murat S. Gins	Doctor of Science (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre for Vegetable Growing, Moscow Region, Russian Federation
Ivan F. Gorlov	Doctor of Science (Agriculture), Academician of the Russian Academy of Sciences, Povolzhskiy Research Institute of Production and Processing of Meat and Dairy Products, Volgograd, Russian Federation
Vladimir A. Gudkovskiy	Doctor of Science (Agriculture), Academician of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre named after I.V. Michurin, Michurinsk, Russian Federation
Viktor F. Dobrovoilskiy	Doctor of Science (Engineering), Research Institute of Food Concentrates Industry and Special Food Technology - branch of the Federal Research Centre for Nutrition and Biotechnology, Moscow, Russian Federation
Irina M. Donnik	Doctor of Science (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, National Research Institute "Kurchatov Institut", Moscow, Russian Federation
Irina A. Ilina	Doctor of Science (Engineering), North Caucasian Federal Research Centre of Horticulture, Viticulture, Winemaking, Krasnodar, Russian Federation
Elena A. Kalashnikova	Doctor of Science (Biology), Professor, Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation
Vera M. Kodentsova	Doctor of Science (Biology), Professor, Leading Researcher, Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation
Mikhail M. Kopus	Doctor of Science (Biology), Leading Researcher, Agrarian Research Centre "Donskoy", Centre for Fundamental Scientific Research, Zernograd, Russian Federation
Igor A. Korotkiy	Doctor of Science (Engineering), Professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation
Anatoliy P. Kosovan	Doctor of Science (Economics), Academician of the Russian Academy of Sciences, State Research Institute of Baking Industry, Moscow, Russian Federation
Olga N. Krasulya	Doctor of Science (Engineering), Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation
Nadezhda G. Kulneva	Doctor of Science (Engineering), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russian Federation
Alexander G. Levshin	Doctor of Science (Engineering), Professor, Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

Aleksander N. Lisitsyn	Doctor of Science (Engineering), All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russian Federation
Andrey B. Lisitsyn	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbатов of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation
Elena P. Meleshkina	Doctor of Science (Engineering), All-Russian Research Institute of Grain and Products of Its Processing – branch of the Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbатов, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation
Eugeny N. Neverov	Doctor of Science (Engineering), professor, Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation
Dmitry B. Nikityuk	Doctor of Medicine, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Centre for Nutrition and Biotechnology, Moscow, Russian Federation
Aleksey L. Nikiforov-Nikishin	Doctor of Science (Biology), Professor, Razumovsky Moscow State University of Food Production, Russian Federation
Lev A. Oganesyants	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Brewing, Beverage and Wine Industries – branch of the Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbатов, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Viktor N. Ozherelev	Doctor of Science (Agriculture), Professor of Bryansk State Agricultural University, Bryansk, Russian Federation
Vladimir I. Orbinsky	Doctor of Science (Agriculture), Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russian Federation
Elena N. Pasyunkova	Doctor of Science (Biology), Federal Research Centre for Potato named after A.I. A.G. Lorkha, branch of the Leningrad Research Institute of Agriculture «Belogork», St. Petersburg, Russian Federation
Viktor A. Panfilov	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation
Andrey N. Petrov	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, All-Russian Research Institute of Technology Canning – branch of the Federal Research Centre of Food Systems named after V.M. Gorbatova, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Olga A. Podvigina	Doctor of Science (Agriculture), Leading Researcher, A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, Voronezh, Russian Federation
Toshpulot F. Rajabov	PhD, Sharof Rashidov Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan
Olga V. Savina	Doctor of Science (Agriculture), Professor, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation
Ashot S. Saghyan	Academician, Doctor of Chemistry, Professor, National Academy of Sciences, Republic of Armenia
Sergey V. Simonenko	Doctor of Science (Engineering), Research Institute of Baby Nutrition – branch of the Federal Research Centre for Nutrition and Biotechnology, Istra, Russian Federation
Olga I. Stognienko	Doctor of Science (Biology), Leading Researcher, A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, Voronezh, Russian Federation
Evgeny I. Titov	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Biotechnological University, Moscow, Russia Russian Federation
Natalia A. Tikhomirova	Doctor of Science (Engineering), Professor, Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation
Vyacheslav I. Tuzhilkin	Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation
Victor A. Tutelyan	Doctor of Medicine, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Centre for Nutrition and Biotechnology, Moscow, Russian Federation
Natasa Poklar Ulrih	PhD, Professor of Biochemistry, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia
Boris V. Usha	Doctor of Science (Veterinary), Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian Biotechnological University, Moscow, Russian Federation
Andrey G. Khramtsov	Doctor of Science (Engineering), Academician of the Russian Academy of Sciences, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
Azret U. Shingisov	Doctor of Engineering, Professor,), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Auezov University, Shymkent, Kazakhstan

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКТОРА

Е. В. Тихонова

От «общего фона» к проверяемости: редакционные требования к библиографии научных статей 8

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

И. А. Бакин, В. Д. Коротков, А. С. Мустафина

Исследование влияния технологических параметров и сравнительная оценка приемов ферментативного гидролиза инулинсодержащего сырья 22

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И ПРОДУКЦИИ АПК

М. В. Беляков

Автоматическая идентификация видов муки по спектрам поглощения 39

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Е. Р. Вольнова, М. С. Каночкина

Селекция технологически ценных штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*: применение биохимических методов, MALDI-TOF MS и оценка пробиотических свойств перспективного образца 55

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

М. Н. Орешина, С. А. Малази

Компьютерное моделирование процесса распылительной сушки молока при конвективно-радиационном энергоподводе 77

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

С. М. Петров, Н. М. Подгорнова, А. В. Шаховской

Автоматизация управления вакуум-аппаратами периодического действия на основе модельной кривой кипения утфеля 91

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ АПК

В. В. Федорова, М. С. Воронина, Е. П. Рящикова

Сравнительный анализ качества и оценка пригодности биозернового сырья в технологии хлебобулочных изделий функционального назначения 112

М. Н. Кутузов, М. А. Белова, О. В. Новиченко, И. А. Никитин, Х. Заруал, Д. Д. Вилкова

Применение гиперспектральной визуализации и искусственного интеллекта для контроля свежести рыбного сырья при холодильном хранении 127

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И НОВЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ

Ю. В. Анохин, О. Ю. Еремина, Е. С. Салина, Н. С. Левгерова, И. А. Сидорова

Оптимизация сушки выжимок черной смородины с использованием метода поверхности отклика 143

CONTENT

EDITORIAL

Elena V. Tikhonova

From “General Background” to Verifiability: Editorial Requirements for the Reference List in Research Articles. 9

PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF FARM RAW MATERIAL PROCESSING

Igor A. Bakin, Vladislav D. Korotkov, Anna S. Mustafina

Research on the Influence of Technological Parameters and Comparative Evaluation of Methods for Enzymatic Hydrolysis of Inulin-containing Raw Materials. 23

RESEARCH ON TRAITS OF SUBSTANCES AND AGRIBUSINESS PRODUCTS

Mikhail V. Belyakov

Automatic Identification of Flour Types by Absorption Spectra 40

BIOTECHNOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASPECTS

Ekaterina R. Volnova, Maria S. Kanochkina

The Isolation of Technogenic Strains of *Lactococcus lactis* Subspecies *lactis*: Using Biological Techniques, Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (MALDI-TOF MS) and Assessment of the Probiotic Potential of a Promising Strain 56

DESIGNING AND MODELLING THE NEW GENERATION FOODS

Marina N. Oreshina, Samuel A. Malazi

Computer Modeling of Milk Spray Drying under Combined Convective and Radiative Heating 78

TECHNOLOGICAL PROCESSES, MACHINES AND EQUIPMENT

Sergey M. Petrov, Nadezhda M. Podgornova, Andrey V. Shakhovskoy

Automation of Batch Vacuum Pan Control Based on the Modeled Boiling Curve of Massecuite 92

CONTROL OVER QUALITY AND SAFETY OF AGRIBUSINESS PRODUCTS

Victoria V. Fedorova, Marianna S. Voronina, Elizaveta P. Ryashchikova

Comparative Analysis of the Quality and Assessment of the Suitability of Organic Grain Raw Materials in the Technology of Functional Bakery Products. 113

Mikhail N. Kutuzov, Maria A. Belova, Olga V. Novichenko, Igor A. Nikitin, Hicham Zaroual, Daria D. Vilkova

Application of Hyperspectral Imaging and Artificial Intelligence for Freshness Assessment of Fish Raw Material during Refrigerated Storage. 128

USING SECONDARY RESOURCES AND NEW TYPES OF RAW MATERIALS

Yuri V. Anokhin, Olga Yu. Eremina, Elena S. Salina, Nadezhda S. Levgerova, Irina A. Sidorova

Optimization of Drying Parameters for Blackcurrant Pomace Using Response Surface Methodology 144

От «общего фона» к проверяемости: редакционные требования к библиографии научных статей

МГИМО Университет,
г. Москва, Российская Федерация

Е. В. Тихонова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Елена Викторовна Тихонова
E-mail: etihonova@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Тихонова, Е. В. (2025). От «общего фона» к проверяемости: редакционные требования к библиографии научных статей. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 8-21.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.699>

ПОСТУПИЛА: 15.10.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: В научных исследованиях библиография выполняет не вспомогательную, а доказательную функцию: именно через ссылки на предыдущие исследования проверяются основания для выбора дизайна исследования, методик анализа, нормативных критериев безопасности и интерпретаций результатов. Разрыв между тезисом статьи и источником, вследствие использования нерелевантных ссылок и искусственного «раздувания» списка литературы, подрывает воспроизводимость исследования и доверие к научному знанию.

Цель: Представить авторам научных статей практико-ориентированный стандарт работы с научными источниками, обеспечивающий прослеживаемость аргументации и верифицируемость ключевых утверждений исследования.

Результаты: Статья обобщает международные требования публикационной этики и редакционные рекомендации к точности цитирования и ответственности авторов за соответствие ссылок содержанию источников. Формулируются прикладные правила и процедуры самопроверки функциональности и релевантности цитируемых источников, адаптированные к типовым риторическим узлам технологической рукописи (постановка задачи, обоснование методологии, интерпретация результатов, выводы и практические рекомендации). Предложен принцип «каждое сильное утверждение должно опираться на проверяемый источник» и его операционализация для технологических статей: (1) функциональная привязка ссылок к утверждениям, влияющим на воспроизводимость (режимы, параметры процессов, методы анализа, критерии безопасности и качества); (2) разграничение допустимых обзорных ссылок для фиксации консенсуса и обязательных первоисточников для численных режимов, методик и нормативных требований; (3) перечень типовых проблем цитирования источников для работ по хранению и переработке сырья (подмена первоисточника обзором, перенос параметров между несопоставимыми матрицами, ссылки на нормативы без актуальной редакции, цитирование методик «по цепочке»); (4) протокол ревизии библиографии перед подачей рукописи, включающий проверку факта чтения источника, смыслового соответствия «тезис-источник» и функциональной необходимости ссылки; (5) рекомендации по постпубликационной корректировке выявленных ошибок через обращение в редакцию.

Заключение: Рекомендуемая рамка переводит работу с источниками из формального этапа «оформления» в процедуру контроля качества исследования. Ее применение снижает риск нерелевантного цитирования и библиографической небрежности, повышает прозрачность технологических решений и укрепляет воспроизводимость результатов, что критично для прикладных исследований в области хранения и переработки сельхозсырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

библиография; точность цитирования; проверяемость источника; релевантность источников; прослеживаемость аргументации

From “General Background” to Verifiability: Editorial Requirements for the Reference List in Research Articles

MGIMO University,
Moscow, Russian Federation

Elena V. Tikhonova

CORRESPONDENCE:

Elena V. Tikhonova

E-mail: etihonova@gmail.com

FOR CITATIONS:

Tikhonova, E. V. (2025). From “general background” to verifiability: Editorial requirements for the reference list in research articles. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 8–21. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.699>

RECEIVED: 15.10.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: In scholarly research, the reference list serves not an auxiliary but an evidential function: citations to prior studies are the primary means by which readers can verify the grounds for a study design, analytical procedures, regulatory safety criteria, and the interpretation of results. A disconnect between an article’s claims and its cited sources, caused by irrelevant citations and the artificial inflation of reference lists, undermines both research reproducibility and trust in scientific knowledge.

Purpose: To provide authors with a practice-oriented standard for working with scholarly sources that ensures the traceability of argumentation and the verifiability of key research claims.

Results: The article synthesizes international publication-ethics requirements and editorial guidance on citation accuracy and authors’ accountability for ensuring that references substantively support the statements to which they are attached. It proposes applied rules and self-check procedures for assessing the functionality and relevance of cited sources, aligned with the typical rhetorical nodes of a technological manuscript (problem framing, methodological justification, results interpretation, conclusions, and practical recommendations). The paper advances the principle that every strong claim must be supported by a verifiable source and operationalizes it for technology-oriented articles through: (1) functional linking of citations to claims that determine reproducibility (processing regimes, process parameters, analytical methods, and safety/quality criteria); (2) a clear distinction between acceptable review citations used to document consensus and mandatory primary sources for numerical regimes, methods, and regulatory requirements; (3) a list of typical citation problems in studies on storage and processing of raw agricultural materials (substituting a primary source with a review, transferring parameters across non-comparable matrices, citing regulations without the current version, and “chain-citing” methods); (4) a pre-submission reference-audit protocol that verifies whether the source has been read, whether the claim–source match is semantically accurate, and whether the citation is functionally necessary; and (5) recommendations for post-publication correction of identified bibliographic errors through contacting the editorial office.

Conclusion: The proposed framework shifts source work from a formal “formatting” step to a research quality-control procedure. Its application reduces the risk of irrelevant citations and bibliographic negligence, increases the transparency of technological decisions, and strengthens the reproducibility of results as an essential requirement for applied research in the storage and processing of raw agricultural materials.

KEYWORDS

reference list; citation accuracy; source verifiability; source relevance; traceability of argumentation

ВВЕДЕНИЕ

В 2010-е годы в международной дискуссии о публикационной этике отчетливо прозвучала проблема, которую ранее не воспринимали в качестве системной: цитирование в рукописи научной статьи зачастую используется авторами не как инструмент проверки и прослеживаемости аргумента, а как ресурс управления видимостью публикаций и метрик. Так, масштабный опрос, охвативший более 12 000 исследователей из восемнадцати дисциплин, зафиксировал не только сознательные практики ряда авторов по «уплотнению» списков литературы избыточными цитированиями с целью повышения вероятности принятия статьи к публикации, но и распространенность практик, в контексте которых редакторы побуждали авторов добавлять в рукописи ссылки, не являющиеся необходимыми для аргументации, вследствие стремления улучшить метрики журнала (Fong & Wilhite, 2017). Сходные проблемы зафиксировало и более раннее исследование Wilhite & Fong (2012).

Вопрос о качестве библиографического аппарата перестал быть формальным с того момента, когда наукометрические базы превратились из справочного инструмента в механизм оценки научной результативности (Кириллова & Тихонова, 2022; Wilhite & Fong, 2012; Aksnes et al., 2019). Внимание к наукометрическим показателям (Индекс Хирша, импакт-факторы журналов, подсчет цитирований) превратило ссылки в валюту академического мира, однако их содержательная ценность при этом нередко обесценивается. Редакторы ведущих журналов все чаще сталкиваются с рукописями, в которых списки литературы являются скорее декоративным элементом: внушительный по объему, но не выдерживающий проверки на релевантность (и речь идет не о фейковых ссылках). Данная ситуация сигнализирует не только о нарушениях научно-исследовательской и публикационной этики, но и указывает на более глубокий сдвиг: библиография начинает обслуживать не верификацию знания, а репутационную экономику (Тихонова & Кириллова, 2022).

Одной из дополнительных проблем современной академической культуры является постепенная деинтеллектуализация практики цитирования. В условиях давления метрик производительности и философии «publish or perish» цитирование воспринимается не как осмысленный интеллектуаль-

ный акт: демонстрация преемственности идей, укрепление аргументации и интеграция работы в существующий корпус знаний, а как формальный инструмент повышения видимости текста (Fong & Wilhite, 2017). В частности, когда рецензенты или редакторы формулируют рекомендацию «расширить библиографию» или «добавить больше ссылок», молодые исследователи (особенно на ранних этапах карьеры) нередко интерпретируют этот запрос буквально и количественно: как необходимость увеличить общее число источников, а не как приглашение к углубленному анализу литературы, уточнению доказательной базы или переосмыслению логики аргументации. В результате в список литературы добавляются ссылки, которые лишь номинально присутствуют в тексте, без реального вклада в концептуальное развитие работы. Такое механистическое отношение к цитированию способствует инфляции ссылок (citation inflation), размывает их сигнальную ценность и усиливает общий сдвиг от качества к количеству в оценке научного вклада (Mutti, 2023).

Библиографическое описание источника может деградировать не только из-за недобросовестного отношения авторов, но и вследствие их систематических ошибок при составлении списка источников (Barroga, 2014). Исследования точности цитирования и корректности ссылок свидетельствуют, что ошибки в библиографических описаниях и несоответствия между цитируемым источником и утверждением в тексте встречаются регулярно и в ряде областей достигают значимых долей, затрудняя проверку и воспроизводимость исследования (например, de Lacey et al., 1985; Baethge et al., 2025; Mogull, 2017). Эмпирические исследования точности библиографических ссылок демонстрируют устойчиво высокий уровень ошибок: от 11 % до 41 % в зависимости от дисциплины и методологии верификации (Zhang & Abernethy, 2024), а анализ точности библиографических данных (имена авторов, годы публикации, номера страниц) выявляет ошибки в 25–54 % случаев (Rivkin, 2020).

Значительный вклад в эту проблему вносит феномен «копируемых ссылок». Анализ повторяющихся опечаток в цитированиях высокоцитируемых работ продемонстрировал воспроизводимость идентичных ошибок в независимых публикациях, что практически возможно лишь при переносе ссылок из вторичных списков литературы, а не при обра-

щении к оригиналу (Simkin & Roychowdhury, 2003). Опираясь на стохастическую модель распространения цитирований, авторы предложили оценку, согласно которой лишь около 20% цитирующих авторов обращались к оригиналу, тогда как значительная часть ссылок, вероятно, воспроизводилась по чужим библиографиям; в этом смысле их работа поставила под сомнение представление о ссылке как о прозрачном и надежном механизме верификации знания.

Когда связь между тезисом и источником оказывается непрозрачной, нерелевантной или ошибочной, нарушается процедура формирования научного знания, позволяющая независимо читателю реконструировать основания для утверждений. В таком случае библиография перестает выполнять функцию верификации и превращается в ритуальный атрибут текста, а накопление публикаций начинает увеличивать информационный шум быстрее, чем знание. Именно поэтому настоящая редакционная статья ставит целью предложить авторам практический стандарт: рассматривать ссылки как часть доказательства, требовать проверяемой привязки каждого опорного тезиса к соответствующему источнику и включать ревизию библиографии как обязательный этап в исследовательскую работу, а не относить ее к финальной стадии «оформления».

В исследованиях по хранению и переработке сельхозсырья цена неточности ссылок высока, поскольку значительная часть утверждений, выводимых из исследования, имеет технологический, режимный и нормативно-прикладной характер. Речь идет о параметрах, от которых зависит воспроизводимость эксперимента и корректность технологических рекомендаций. Если такие утверждения поддержаны не первоисточником, а косвенной или нерелевантной ссылкой, читатель не может проверить основание технологического выбора, а научный текст теряет ключевую функцию прикладной дисциплины — быть надежной инструкцией для воспроизводимого знания. Практическая задача настоящей редакционной статьи состоит в том, чтобы дать автору ясный, воспроизводимый алгоритм работы с источниками в рукописи технологического профиля. Такая процедура не усложняет подготовку статьи, а снижает вероятность критических замечаний рецензентов, ускоряет редакционный цикл и повышает доверие к результатам.

Фантомные источники

Небрежное цитирование способно не просто снижать точность отдельных формулировок, но и порождать устойчивые «научные легенды», которые десятилетиями воспроизводятся в уважаемых научных изданиях и создают иллюзию доказанности там, где ее нет. Этот механизм детально описан на примере так называемой «легенды о шпинате»: широко распространенного утверждения о том, что якобы завышенное содержание железа в шпинате объясняется ошибкой с десятичной запятой, допущенной немецкими химиками в 1930-х годах (Rekdal, 2014). Проследив происхождение этого сюжета, Rekdal показывает типичную динамику ссылочной цепочки: в 1981 г. гематолог Теренс Хэмблин опубликовал соответствующее утверждение в *British Medical Journal*, не приводя первоисточника, а последующие авторы начали цитировать Хэмблина и друг друга, постепенно формируя эффект «множественного независимого подтверждения» (Rekdal, 2014). Однако попытка восстановить первичную опору привела к обратному результату: выяснилось, что исторического «источника ошибки» не существует, а сама история о десятичной запятой является мифом, закрепившимся именно потому, что каждый следующий автор доверял библиографическим ссылкам предшественников и не возвращался к оригиналам. В редакционной перспективе это означает, что библиография не может рассматриваться как декоративный элемент научного текста: если ссылки не обеспечивают проверяемость, они начинают производить правдоподобие вместо доказательности и разрушают прослеживаемость знания.

Этот случай иллюстрирует три типичные формы нарушения целостности цитирования, которые систематизировал Rekdal (2014):

- (1) Цитирование без ссылки: автор представляет утверждение, которое не является общепризнанным знанием, но не предоставляет опоры на валидирующий его источник. Читатели вынуждены либо принять утверждение на веру, либо самостоятельно искать подтверждение в научной литературе.
- (2) Цитирование вторичного источника как первичного: автор указывает оригинальную работу, которую он не читал, заимствуя ссылку из другой процитировавшей ее публикации.

Такой шаг создает ложное впечатление прямого знакомства с источником и искажает цепочку передачи знания.

- (3) Множественное цитирование для создания видимости консенсуса: автор приводит несколько источников для поддержки одного утверждения, не проверив, все ли они действительно поддерживают данный тезис и являются независимыми.

Последствия таких практик выходят за рамки локальных искажений. Когда ошибка воспроизводится в достаточном количестве публикаций, она приобретает статус «установленного факта», который «все знают» и на который «все ссылаются». Коррекция такой ошибки требует не просто публикации опровержения, но системного пересмотра зависимых работ, что практически невозможно в условиях экспоненциального роста научной литературы.

Разрыв между тезисом и источником

Ключевая функция библиографической ссылки состоит в установлении проверяемой связи между утверждением автора и подтверждающим его источником. Демонстрация этой цепочки не просто вопрос интеллектуальной честности, но условие воспроизводимости научного рассуждения: читатель должен иметь возможность проследить ход аргументации, обратившись к цитируемым работам, и убедиться, что интерпретация источника автором корректна. Когда эта связь нарушается, возникает эпистемологический разрыв: утверждение в тексте формально подкреплено ссылкой, но при обращении к источнику обнаруживается, что: (1) источник не содержит утверждаемого автором (ошибка атрибуции); (2) источник содержит утверждение, но в ином контексте или с существенными оговорками, которые автор опустил (контекстное искажение); (3) источник делает утверждение на основании данных или аргументов, которые оспариваются или опровергнуты более поздними исследованиями, о чем автор не упоминает (игнорирование критики); (4) ссылка указывает на работу неверно (библиографическая ошибка), так что источник невозможно идентифицировать.

Ошибки цитирования и библиографического описания встречаются регулярно даже в публикаци-

ях высокого уровня, и это означает, что проблема выходит далеко за рамки единичных случаев недобросовестности. Метаанализ исследований точности «цитируемых утверждений» зафиксировал, что в среднем около 16,9% цитат в научных статьях воспроизводят содержание источника неверно (примерно половина из них относится к существенным ошибкам, когда источник не подтверждает заявленное утверждение или ему противоречит) (Baethge et al., 2025). Аналогичную уязвимость отметили и Pavlovic с коллегами: как минимум одна неточная передача содержания источника выявлялась в 11–15% статей в проверочных выборках, а наиболее распространенным типом ошибок было цитирование несуществующих выводов (Pavlovic et al., 2021). Параллельно исследования корректности самого библиографического описания показывают, что значительная часть ссылок содержит технические дефекты, затрудняющие идентификацию и проверку источника: наиболее частыми являются ошибки в номерах страниц (44,8%) и в написании имени автора (20,2%), то есть именно те элементы, которые читатель использует для быстрого нахождения первоисточника (Karabulut et al., 2017). В редакционной перспективе эти ошибки оказываются системно значимыми: когда исследователь не может восстановить утверждение до проверяемого источника из-за дефектов в ссылке или обнаруживает, что источник не подтверждает процитированную интерпретацию, подрывается доверие не только к отдельной рукописи, но и к механизму прослеживаемости знания как таковому.

Императивы качественного цитирования: от осознания к практике

Решение проблемы не может быть только технологическим: инструменты управления библиографией (EndNote, Zotero, Mendeley) помогают избежать опечаток, но не способны проверить релевантность источника утверждению или выявить, что автор не читал цитируемую работу. Требуется изменение культуры цитирования, то есть возвращение к пониманию библиографии как интеллектуальной, а не бюрократической процедуры.

Каждое сильное утверждение требует опоры на источник

Принцип, согласно которому каждое ключевое утверждение должно быть подкреплено проверяемым источником, предполагает, что библиография выполняет в рукописи не декоративную и не фоновую функцию, а является элементом ее доказательной структуры, обеспечивающим прослеживаемость аргументации и возможность независимой верификации заявленных положений. Под сильными утверждениями в редакционной логике понимаются те положения, на которых держится основная аргументация статьи: причинные объяснения, обобщения, количественные оценки, заявления о том, что «известно» или «доказано», а также формулировки пробела, вклада и практических выводов. Такие утверждения должны опираться на конкретные, релевантные источники, а в тех случаях, когда текст ссылается на определенный фрагмент аргумента или на частный результат, ссылка должна быть настолько точной, насколько это возможно в выбранном стиле оформления, включая указание страниц, разделов или параграфов. Это требование — не формализм, а условие проверяемости: сильное утверждение должно быть сопоставимо с реальным содержанием источника.

Если утверждение отражает устойчивый консенсус в области, нет необходимости искусственно «раздувать» ссылочный блок. Достаточно одной-двух репрезентативных ссылок, предпочтительно на авторитетные обзоры, учебники или программные работы, которые аккуратно фиксируют общий результат и его границы. Напротив, если автор оспаривает принятый взгляд, предлагает новую интерпретацию или перестраивает объяснение, документирование должно быть особенно тщательным. В таких ситуациях недостаточно формулы «*В отличие от предыдущих исследований*»: необходимо явным образом показать, с какими именно позициями ведется полемика, где проходит линия расхождения, какие данные или аргументы в предшествующих работах интерпретируются иначе и почему предлагаемое прочтение более обосновано. Критерий верификации в такой ситуации предельно прост: читатель, обратившийся к указанному источнику, должен обнаружить в нем именно то, на что ссылается автор, без необходимости додумывать контекст, реконструировать смысл или «достраивать» доказательство за автора. Имен-

но эта прозрачность связывает ссылку с тезисом и превращает цитирование в механизм научной надежности, а не в ритуальный атрибут текста.

Чтобы правило о проверяемости источника стало операциональным, важно различать типы утверждений, наиболее типичные для рукописей в конкретной предметной области (например, по хранению и переработке сельхозсырья), и заранее задавать для них ожидаемый тип источника. *Утверждения о режимах и параметрах процессов* (температура, время, активность воды, состав атмосферы, дозировки, концентрации, условия упаковки и транспортирования) должны опираться преимущественно на первичные экспериментальные публикации или на нормативно-методические документы, если автор формулирует рекомендацию как стандарт или регламент. *Утверждения о методах анализа* (например, протоколы определения показателей качества, микробиологические процедуры, расчетные модели и метрики) корректно подкреплять либо первоисточником метода, либо стандартом/руководством, либо публикацией, где метод валидирован и описан с достаточной прозрачностью, чтобы читатель мог воспроизвести процедуру.

Отдельную категорию составляют *нормативные утверждения*: допустимые уровни контаминантов, требования к маркировке, пределы безопасности и санитарные критерии. Такие положения должны ссылаться на первичные нормативные источники в актуальной редакции, а не на вторичные пересказы в статьях. Наконец, *заявления о «состоянии поля»* (консенсус/спорность, доказанность эффекта, типичность механизма порчи, известные закономерности деградации качества) уместно подкреплять обзорными работами и программными публикациями, которые фиксируют позицию дисциплины и её ограничения. Такая типологизация дисциплинирует библиографию: источник выбирается не по теме, а по функции, которую он должен выполнить в доказательной конструкции текста.

Недопустимость фоновых ссылок в ключевых узлах рукописи

Обобщающие формулы типа «*Как показывают многочисленные исследования...*», «*Согласно современным данным...*», «*Большинство авторов полагают...*» допустимы лишь в тех случаях, когда в предмет-

ной области действительно сформировался устойчивый консенсус, и даже тогда они должны быть подкреплены несколькими репрезентативными источниками, предпочтительно обзорными или программными, которые фиксируют соответствующую позицию и ее границы. В противном случае подобные обороты выполняют риторическую, а не доказательную функцию, создавая иллюзию подтвержденности там, где фактически требуется точная атрибуция аргумента.

В ключевых узлах рукописи, включая постановку исследовательского вопроса, обоснование методологических решений и интерпретацию результатов, каждая ссылка должна нести отчетливую функциональную нагрузку. Она либо подтверждает конкретное утверждение, либо обозначает альтернативную интерпретацию, либо уточняет условия применимости, либо задает необходимый контекст, без которого вывод теряет корректность. Иными словами, цитирование в этих фрагментах должно работать как элемент доказательной архитектуры текста, а не как маркер «информированности» автора.

Практически полезным является простой тест на функциональность ссылки. Если при удалении ссылки убедительность и содержательная определенность утверждения не меняются, то ссылка, вероятнее всего, избыточна и может быть исключена без ущерба для аргументации. Если же отсутствие ссылки делает утверждение спорным или недостаточно обоснованным, то ссылка должна быть проверена на точное соответствие источнику, то есть на наличие в нем именно того содержания, которое автор приписывает цитируемой работе.

Ревизия списка литературы как этап подготовки рукописи

Перед подачей рукописи в журнал автору целесообразно провести целенаправленную ревизию ссылочного аппарата, последовательно проходя по каждой позиции и задавая себе три контрольных вопроса (Приложение 1, Приложение 2). Во-первых, обращался ли автор к данной работе непосредственно. Если ответ отрицательный, уместны два корректных решения: либо прочесть первоисточник и сослаться на него как на прочитанный, либо явно обозначить опосредованный характер обращения, оформив ссылку как вторичную (например: «Smith, 2010, цит. по: Jones, 2015»).

Во-вторых, подтверждает ли источник именно то утверждение, которое он призван поддержать в тексте. Цитирование по памяти или по пересказу из другой публикации особенно рискованно в узловых местах аргументации, поскольку способно привести к смысловым смещениям, некорректным обобщениям и непреднамеренной подмене тезиса. Поэтому при малейшем сомнении необходимо возвращаться к оригиналу и проверять точность интерпретации, включая контекст, ограничения и условия применимости результатов.

В-третьих, является ли данная ссылка функционально необходимой. В библиографических списках нередко накапливаются работы, включенные «для полноты картины» или добавленные в ответ на замечания рецензентов, но не выполняющие доказательной роли. В таких случаях ссылка должна быть либо содержательно интегрирована в аргументацию, либо исключена, чтобы не создавать иллюзию доказательности и не размывать ответственность автора за опорные утверждения.

Разумеется, подобная ревизия трудоемка, особенно в крупных обзорных рукописях и монографиях с сотнями источников. Однако она допускает дифференциацию по уровню значимости. Работы, на которых держится центральная линия аргументации, требуют первичного чтения и тщательной проверки соответствия «тезис-источник»; вспомогательные материалы в ряде случаев могут быть известны через авторитетные обзоры или реферативные ресурсы, при условии что автор честно фиксирует характер своего обращения к ним и не выдает опосредованное знание за непосредственное. В конечном счете речь идет не о формальной «полноте» библиографии, а о научной добросовестности как о дисциплине верификации: ссылка должна быть либо прочитанным основанием, либо явно обозначенным вторичным указателем, либо отсутствовать.

В условиях ограниченного времени возможно применение ускоренной ревизии (хотя она не может гарантировать «чистоты» отсылок к источникам), сосредоточенной на опорных звеньях аргументации. Перед подачей рукописи автору может выделить в тексте десять — пятнадцать утверждений, которые несут основную нагрузку: параметры режимов и условий, методические решения, нормативные пределы, ключевые интерпретации и итоговые выводы. Далее для каждого такого

утверждения необходимо верифицировать указанный источник, проверив два условия: источник действительно содержит приписываемый ему тезис и он релевантен именно в том смысле, в каком ссылка используется в тексте (по объекту, условиям, метрике, уровню обобщения). После этого следует выполнить «очистку» списка литературы: удалить ссылки, которые не меняют доказательности утверждений, и заменить вторичные или обзорные источники первоисточниками там, где приводятся численные параметры или методические протоколы. Такой короткий цикл проверки снижает риск критических замечаний по верифицируемости и, как правило, повышает прозрачность рукописи без расширения ее объема.

Библиография как интеллектуальный контракт

Библиография не является периферийным приложением к рукописи и не сводится к формальному атрибуту, обеспечивающему прохождение рецензирования. В структуре научного текста она выполняет двойную функцию. С одной стороны, представляет собой реконструируемую карту интеллектуальной траектории автора, позволяющую проследить, какие концептуальные рамки, эмпирические результаты и методологические решения легли в основание аргумента. С другой стороны, библиография выступает нормативным обязательством по отношению к читателю, фиксируя принципиальную проверяемость утверждений: каждое ключевое положение должно иметь идентифицируемое основание, каждая интерпретация должна быть соотнесена с первоисточником, а вклад предшествующих исследований — корректно атрибутирован.

Нарушение этого обязательства, независимо от его причин, ведет к системным издержкам для научной коммуникации. В случае небрежности или смысловых смещений страдают авторы первичных работ, чьи идеи могут быть представлены неточно или ошибочно приписаны другим. Читатели утрачивают возможность проследить аргументацию к источникам и, следовательно, оценить обоснованность выводов. Будущие исследователи вынуждены строить новые исследования на основании литературы, в которой нарушена прослеживаемость доказательств и искажены основания утверждений

(Тихонова & Кириллова, 2022). В конечном счете подрывается институциональная легитимность науки, поскольку она опирается на воспроизводимость чтения и на принцип верифицируемости знания как фундаментальный критерий научного статуса.

Эмпирические наблюдения последних десятилетий подтверждают, что проблема не ограничивается единичными ошибками и не нивелируется «естественным отбором» публикаций. Анализ воспроизводящихся опечаток в списках литературы указывает на широкое распространение практик вторичного копирования ссылок без обращения к первоисточнику (Simkin & Roychowdhury, 2003). В свою очередь, данные о распространённости коэрцитивного цитирования и о сознательном «уплотнении» библиографий демонстрируют, что на практики цитирования все сильнее воздействуют стимулы оценочных режимов, ориентированных на количественные показатели (Wilhite & Fong, 2012; Fong & Wilhite, 2017). В этой перспективе библиографическая небрежность и библиографическая манипуляция оказываются не маргинальными отклонениями, а симптомами структурного смещения, при котором ссылки начинают обслуживать не верификацию знания, а метрик-ориентированную конкуренцию.

Если научный текст должен сохранять статус пространства, в котором утверждения подлежат проверке, библиографии необходимо вернуть ее исходную эпистемическую роль. Она должна функционировать не как средство накопления символического капитала, а как инструмент интеллектуальной добросовестности и методологической строгости. Между тезисом и источником не должно возникать «пустого пространства», заполняемого доверительными формулами или риторическими заменителями доказательства, необходима связка, обеспечивающая воспроизводимость чтения; ответственность за ее качество и прочность лежит прежде всего на авторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тщательная работа с источниками должна рассматриваться авторами не как этап «оформления» рукописи, а как часть исследовательской ответственности, напрямую связанная с проверяемостью выводов и корректностью научной записи. До подачи статьи в журнал автору необходимо

удостовериться, что ключевые тезисы опираются на релевантные первоисточники, что интерпретации не подменяют смысл цитируемых работ, а библиографические сведения позволяют читателю без усилий идентифицировать публикацию и обратиться к ней. Не менее важно с самого начала ориентироваться на редакционную политику конкретного журнала: требования к стилю ссылок, полноте описания, допустимости вторичных ссылок, использованию DOI и электронных идентификаторов, а также на правила в отношении избыточного и нерелевантного цитирования. Следование этим регламентам не является бюрократической уступкой, поскольку единообразие и точность ссылочного аппарата обеспечивают сопоставимость рукописей, снижают нагрузку на рецензирование и защищают читателя от «разрывов» между тезисом и источником.

Отдельного акцента заслуживает постпубликационная ответственность. Если после выхода статьи автор обнаруживает ошибки в библиографии, неправильную атрибуцию, некорректное цитирование или иные дефекты ссылочного аппарата, корректным профессиональным действием является обращение в редакцию с просьбой о внесении

исправлений в установленном журналом порядке. Такая практика не должна восприниматься как репутационный риск: напротив, своевременная коррекция поддерживает доверие к работе, сохраняет целостность научной записи и предотвращает распространение ошибок в последующих исследованиях. В современной публикационной среде, где скорость подготовки рукописей высока, а массив литературы растет, добросовестная позиция автора проявляется не в декларации безошибочности, а в готовности обеспечивать точность источников на всех этапах жизненного цикла публикации.

Наконец, редакция со своей стороны вправе ожидать, что авторы будут относиться к библиографии как к элементу доказательной архитектуры статьи. Точность и релевантность ссылок, прозрачность источниковой базы и готовность к исправлению ошибок являются не факультативными добродетелями, а минимальными условиями кумулятивности знания. Именно через такие «технические» нормы дисциплина защищает себя от накопления шумов и сохраняет возможность воспроизводимого чтения, без которого научная аргументация теряет опору.

ЛИТЕРАТУРА

- Кириллова, О. В., Тихонова, Е. В. Критерии качества научного журнала: измерение и значимость. *Научный редактор и издатель*. 2022;7(1):12–27. <https://doi.org/10.24069/SEP-22-39>
- Тихонова Е.В., Кириллова О.В. Культура цитирования: поведение цитирующих авторов vs доверие к результатам научных исследований. *Научный редактор и издатель*. 2022;7(2):166–181. <https://doi.org/10.24069/SEP-22-58>
- Aksnes, D. W., Langfeldt, L., & Wouters, P. (2019). Citations, citation indicators, and research quality: An overview of basic concepts and theories. *Sage Open*, 9(1). <https://doi.org/10.1177/2158244019829575>
- Fong, E. A., & Wilhite, A. W. (2017). Authorship and citation manipulation in academic research. *PLOS ONE*, 12(12), e0187394. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187394>
- Mutti, A. (2023). Pride and concern for bibliometric achievements: Deserved results or result of cites inflation? *La Medicina del lavoro*, 114(4), e2023034. <https://doi.org/10.23749/mdl.v114i4.14990>
- Barroga, E. F. (2014). Reference accuracy: Authors', reviewers', editors', and publishers' contributions. *Journal of Korean Medical Science*, 29(12), 1587–1589. <https://doi.org/10.3346/jkms.2014.29.12.1587>
- Baethge, C., & Jergas, H. (2025). Systematic review and meta-analysis of quotation inaccuracy in medicine. *Research Integrity and Peer Review*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s41073-025-00173-z>
- Mogull, S.A. (2017) Accuracy of cited “facts” in medical research articles: A review of study methodology and recalculation of quotation error rate. *PLoS ONE*, 12(9), e0184727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184727>
- Rivkin A. (2020). Manuscript referencing errors and their impact on shaping current evidence. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 84(7), ajpe7846. <https://doi.org/10.5688/ajpe7846>
- Pavlovic, A., Yurac, R., Orrego, A., et al. (2021). Quotation errors related to the wound management of open lower limb fractures (WOLFF) randomised clinical trial. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 31, 1505–1510.
- Rekdal, O. B. (2014). Academic urban legends. *Social Studies of Science*, 44(4), 638–654. <https://doi.org/10.1177/0306312714535679>
- Karabulut, N. (2017). Inaccurate citations in biomedical journalism: Effect on the impact factor of the American Journal of Roentgenology. *American Journal of Roentgenology*, 208(3), 472–474. <https://doi.org/10.2214/AJR.16.16984>
- Simkin, M. V., & Roychowdhury, V. P. (2003). Read before you cite! *Complex Systems*, 14(3), 269–274. <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.14.3.269>
- Steel, C. M. (1996). Read before you cite. *Lancet*, 348(9020), 144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)64792-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)64792-7)
- Wilhite, A. W., & Fong, E. A. (2012). Coercive citation in academic publishing. *Science*, 335(6068), 542–543.
- Zhang, T. M., & Abernethy, N. F. (2024). Detecting reference errors in scientific literature with large language models. *arXiv:2411.06101*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.06101>

REFERENCES

- Kirillova, O.V., & Tikhonova, E.V. (2022). Journal quality criteria: Measurement and significance. *Science Editor and Publisher*, 7(1), 12–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.24069/SEP-22-39>
- Tikhonova, E.V., & Kirillova, O.V. (2022). Citation culture: Citing authors behaviour vs trust in research results. *Science Editor and Publisher*, 7(2), 166–181. (In Russ.) <https://doi.org/10.24069/SEP-22-58>
- Aksnes, D. W., Langfeldt, L., & Wouters, P. (2019). Citations, citation indicators, and research quality: An overview of basic concepts and theories. *Sage Open*, 9(1). <https://doi.org/10.1177/2158244019829575>
- Fong, E. A., & Wilhite, A. W. (2017). Authorship and citation manipulation in academic research. *PLOS ONE*, 12(12), e0187394. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187394>

- Mutti, A. (2023). Pride and concern for bibliometric achievements: deserved results or result of cites inflation? *La Medicina del Lavoro*, 114(4), e2023034. <https://doi.org/10.23749/mdl.v114i4.14990>
- Barroga, E. F. (2014). Reference accuracy: Authors', reviewers', editors', and publishers' contributions. *Journal of Korean Medical Science*, 29(12), 1587–1589. <https://doi.org/10.3346/jkms.2014.29.12.1587>
- Baethge, C., & Jergas, H. (2025). Systematic review and meta-analysis of quotation inaccuracy in medicine. *Research Integrity and Peer Review*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s41073-025-00173-z>
- Mogull, S.A. (2017) Accuracy of cited “facts” in medical research articles: A review of study methodology and recalculation of quotation error rate. *PLoS ONE*, 12(9), e0184727. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184727>
- Rivkin A. (2020). Manuscript referencing errors and their impact on shaping current evidence. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 84(7), ajpe7846. <https://doi.org/10.5688/ajpe7846>
- Pavlovic, A., Yurac, R., Orrego, A., et al. (2021). Quotation errors related to the wound management of open lower limb fractures (WOLLF) randomised clinical trial. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, 31, 1505–1510.
- Rekdal, O. B. (2014). Academic urban legends. *Social Studies of Science*, 44(4), 638–654. <https://doi.org/10.1177/0306312714535679>
- Karabulut, N. (2017). Inaccurate citations in biomedical journalism: Effect on the impact factor of the American Journal of Roentgenology. *American Journal of Roentgenology*, 208(3), 472–474. <https://doi.org/10.2214/AJR.16.16984>
- Simkin, M. V., & Roychowdhury, V. P. (2003). Read before you cite! *Complex Systems*, 14(3), 269–274. <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.14.3.269>
- Steel, C. M. (1996). Read before you cite. *Lancet*, 348(9020), 144. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)64792-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)64792-7)
- Wilhite, A. W., & Fong, E. A. (2012). Coercive citation in academic publishing. *Science*, 335(6068), 542–543.
- Zhang, T. M., & Abernethy, N. F. (2024). Detecting reference errors in scientific literature with large language models. *arXiv:2411.06101*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.06101>

ОБ АВТОРЕ

Тихонова Елена Викторовна, кандидат исторических наук, доцент, доцент МГИМО МИД России (119454, Российская Федерация, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 76), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8252-6150>, Scopus ID: 57208387246, Researcher ID: B-1951-2015, SPIN-код: 6460-4083, etihonova@gmail.com

ABOUT THE AUTHOR

Elena V. Tikhonova, Cand.Sci. (History), Associate Professor, MGIMO University (76 Prospekt Vernadskogo, Moscow 119454, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8252-6150>, Scopus ID: 57208387246, Researcher ID: B-1951-2015, SPIN-code: 6460-4083, etihonova@gmail.com

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРОТОКОЛ РЕВИЗИИ БИБЛИОГРАФИИ ПЕРЕД ПОДАЧЕЙ РУКОПИСИ В РЕДАКЦИЮ

(1) Подготовка: выделите «опорные» утверждения

Сначала отметьте в тексте все утверждения, от которых зависит доказательная конструкция статьи. Как правило, это: формулировка исследовательского вопроса и пробела; обоснование выбора режимов и условий исследования; описание методик анализа; нормативные и пороговые значения; ключевые интерпретации результатов; итоговые выводы и практические рекомендации. Именно эти фрагменты должны проходить проверку в первую очередь, поскольку ошибки в их подтверждении напрямую подрывают воспроизводимость и проверяемость исследования.

(2) Ревизия по опорным утверждениям

Для каждого опорного утверждения выполните три последовательные проверки.

Проверка факта чтения источника

Зафиксируйте, обращались ли вы к работе непосредственно. Если источник не прочитан, выберите один из двух корректных вариантов: (а) прочитать первоисточник и после этого оставлять ссылку; (б) если обращение было опосредованным, а доступа к источнику нет, оформить вторичное цитирование явно (например, «X, год, цит. по: Y, год») и избегать приписывания первоисточнику точных формулировок, чисел и выводов, которые вы видели только в пересказе. Для утверждений, несущих центральную нагрузку (режимы, протоколы, нормативные пределы), вторичное цитирование неприемлемо.

Проверка смыслового соответствия «тезис-источник»

В источнике найдите фрагмент, на который опирается ваш тезис. Сопоставьте три элемента: (а) что именно утверждает источник; (б) в каких условиях и с какими ограничениями; (с) что именно утверждаете Вы, опираясь на этот источник. Если

в источнике отсутствует приписываемое ему Вами содержание, если вывод возможен лишь при дополнительных допущениях, или если условия исследования несопоставимы с Вашими (объект, матрица, метод, метрика, диапазон режимов), ссылку следует либо заменить, либо переформулировать тезис так, чтобы он точно отражал источник. В ситуации упоминания численных параметров (температура, время, концентрации, пороги) необходима максимальная точность, поэтому в такой ситуации избегайте ссылок «по теме в целом».

Проверка функциональной необходимости ссылки

Определите, какую роль ссылка играет в вашем тексте. Она должна выполнять хотя бы одну конкретную функцию: подтверждать тезис, задавать определение, описывать метод, фиксировать нормативное требование, обозначать альтернативу, ограничивать область применимости, обеспечивать контекст для интерпретации. Если при удалении ссылки убедительность утверждения не меняется или ее роль не может быть сформулирована однозначно, ссылка считается избыточной и подлежит удалению либо содержательной интеграции (с пояснением, что именно из источника используется).

(3) Ревизия по списку литературы

После валидации опорных утверждений просмотрите весь список литературы и выполните тот же тройной контроль, но с упрощенной логикой.

Удалите или перераспределите дублирующие ссылки

Если несколько ссылок выполняют одну и ту же функцию без добавления новых оснований (например, пять работ вместо одной качественной обзорной), сократите список до самых репрезентативных источников.

Разведите источники по типу использования

Удобно мысленно классифицировать ссылки на: (a) опорные (держат центральные тезисы); (b) методические (описание процедур, протоколов, инструментов); (c) контекстные (фон, история вопроса, общие обзоры); (d) нормативные (стандарты и регламенты). Такой подход помогает увидеть, где нужна точность первоисточника, а где допустим обзор.

Проверьте корректность вторичных ссылок

Если вы оставляете вторичное цитирование, убедитесь, что оно оформлено прозрачно и не используется для подтверждения ключевых численных параметров или строгих выводов.

(4) Контроль качества оформления

После содержательной ревизии выполните короткую техническую проверку: корректность ФИО

авторов, года, названия, выходных данных, DOI/идентификаторов (если применимо), единообразии оформления в соответствии с требованиями журнала. Технические ошибки не меняют смысл, но они делают проверку источника трудной или невозможной, а значит, снижают качество научной записи.

(5) Финальная проверка целостности

В завершение повторно вычитайте: (a) формулировку проблемы и цели; (b) описание методологии; (c) ключевые интерпретации и выводы. Убедитесь, что именно в этих узлах нет ссылок «для общего фона», нет ссылок, которые не поддерживают утверждение, и нет мест, где читателю пришлось бы «достраивать» связь между тезисом и источником.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТИПОВЫЕ ПРИЗНАКИ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО РИСКА В РУКОПИСЯХ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ ПО ХРАНЕНИЮ И ПЕРЕРАБОТКЕ СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

В рукописях прикладного профиля рецензенты и редакторы особенно внимательно читают те фрагменты, в которых автор переводит данные в технологические выводы. В подобных рукописях ошибки ссылочного аппарата становятся не стилистической погрешностью, а индикатором ненадежности: если читатель не может восстановить основание выбора режима, методики или нормативного критерия, то под вопросом оказывается воспроизводимость и обоснованность практических рекомендаций. Типовые маркеры, которые чаще всего сигнализируют о разрыве между тезисом и источником, требуют обязательной коррекции до подачи рукописи.

- (1) Подмена первоисточника обзором или вторичной работой там, где приводятся численные параметры и условия процессов. В технологической статье ссылки на обзоры уместны, когда автор фиксирует общий статус поля, типичные механизмы порчи или широкий консенсус. Однако когда речь идет о конкретных режимах хранения и обработки, пороговых значениях, кинетических параметрах, дозировках или методических настройках, обзор редко является корректным основанием: он пересказывает результаты в агрегированном виде и часто опускает контекстные ограничения. Корректный выход состоит в том, чтобы заменить обзор первоисточником, на который он опирает-

ся, или как минимум уточнить формулировку, чтобы она строго соответствовала тому, что действительно утверждает обзор, без приписывания ему параметров, полученных в отдельных экспериментах.

- (2) При переносе технологических параметров между несопоставимыми матрицами сырья или продуктами без источников обоснования типичная ошибка выглядит так: режим или порог, корректный для одной сырьевой матрицы, объявляется применимым к другой, хотя физико-химические свойства, микробиологическая экология и механизмы деградации качества могут существенно различаться. В результате ссылка формально «на тему» присутствует, но не подтверждает применимость именно к заявленному объекту и условиям. Чтобы снять этот риск, автор должен либо привести источники, где режим проверен на сопоставимой матрице и в сопоставимых условиях, либо явно артикулировать границы переноса, указав, какие характеристики матрицы и механизма делают экстраполяцию оправданной, а какие условия требуют отдельного стресс-теста или валидации.
- (3) Ссылки на нормативные документы без указания актуальной редакции и идентифицирующих реквизитов для утверждений о допустимых уровнях контаминантов, санитарных критериях, требованиях к маркировке, предельных значениях показателей безопасности, замена таких ссылок на «обобщенные» ссылки на стандарт или регламент снижают валидность исследования. Читатель должен иметь возможность однозначно идентифицировать документ и проверить, что в указанной редакции действительно содержится соответствующее положение. Поэтому нормативные источники нужно оформлять так, чтобы были указаны номер документа, год

принятия, при необходимости сведения о редакции или изменениях, а из текста рукописи должно быть ясно, какую именно норму автор использует и в каком месте документа она закреплена. В противном случае ссылка перестает быть проверяемой, а технологические выводы оказываются потенциально опирающимися на устаревшие требования.

- (4) «Цепочное» цитирование методик, когда автор ссылается не на первоисточник метода или стандарт, а на статью, в которой метод уже применен и пересказан, способно скомпрометировать весь дизайн исследования. Такая практика особенно рискованна в аналитической части технологических исследований, где небольшие отличия протокола и настроек прибора могут приводить к несопоставимости результатов. Необходимо, во-первых, указывать первоисточник методики или стандарт, на котором она основана, во-вторых, отдельно ссылаться на публикации, в которых метод валидирован для сопоставимой матрицы, если это критично для интерпретации, и, в-третьих, явно описывать любые модификации протокола. Тогда ссылка выполняет доказательную функцию: читатель понимает, какой метод использован, где он описан изначально и почему он применим к данному объекту.

Все перечисленные проблемы объединяет общий принцип: в прикладной технологической рукописи ссылка должна обеспечивать прослеживаемость решений автора. Предварительная самооценка рукописи на наличие этих признаков существенно снижает риск замечаний со стороны редакторов и рецензентов по воспроизводимости и укрепляет доверие к статье как к научному, а не риторическому продукту.

Исследование влияния технологических параметров и сравнительная оценка приемов ферментативного гидролиза инулинсодержащего сырья

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

И. А. Бакин, В. Д. Коротков, А. С. Мустафина

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Игорь Алексеевич Бакин
E-mail: bakin@rgau-msha.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бакин, И. А., Коротков, В. Д., & Мустафина, А. С. (2025). Исследование влияния технологических параметров и сравнительная оценка приемов ферментативного гидролиза инулинсодержащего сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 22-38. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.691>

ПОСТУПИЛА: 01.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Пребиотические олигосахариды представляют значительный интерес для пищевой промышленности благодаря их функциональным свойствам. В Российской Федерации основным сырьем для промышленного получения инулина является топинамбур (*Helianthus tuberosus L.*), однако его переработка осложняется особенностями химического состава, в том числе высоким содержанием белка. В связи с этим выбор ферментативного препарата и параметров предварительной обработки имеет принципиальное значение для эффективности экстракции инулина из растительного сырья.

Цель: Оценить влияние ферментативных препаратов различного действия на углеводный состав экстрактов топинамбура и определить рациональные параметры предварительной обработки инулинсодержащего сырья.

Материалы и методы: Исследовали водные экстракты, полученные из высушенных и измельченных клубней топинамбура сорта Омский белый после предварительной ферментативной обработки. В качестве референтных ферментных комплексов использовали Пектолюкс и ЦеллоЛюкс БГК, в качестве альтернативного препарата – Биозим Plus. Определяли массовую долю сухих веществ, проводили рефрактометрический анализ и анализ углеводного состава методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием стандартной смеси углеводов для калибровки. Качество экстрактов оценивали по органолептическим показателям: цвету, прозрачности и опалесценции. Кинетику экстракции изучали при варьировании дозировки ферментного препарата, гидромодуля, температуры в диапазоне 40–80 °С и продолжительности процесса 20–60 мин.

Результаты: Установлено, что ферментативная обработка существенно влияет на физико-химические характеристики экстрактов и содержание инулина. Экстракты, полученные с применением ЦеллоЛюкс БГК и Биозим Plus, характеризовались большей опалесценцией и более светлым желтоватым оттенком. После обработки препаратом Пектолюкс экстракт отличался соломенной окраской и высокой прозрачностью. Использование Пектолюкса увеличивало объем экстракта в 2 раза, а ЦеллоЛюкс БГК – в 1,6 раза по сравнению с контролем. При повышении температуры до 50 °С содержание инулина в экстракте возрастало линейно; дальнейшее повышение температуры не обеспечивало выраженного прироста, тогда как при температурах выше 70 °С наблюдался гидролиз инулина с образованием ди- и моносахаридов.

Выводы: Ферментативная обработка топинамбура повышает эффективность экстракции и обеспечивает получение экстрактов с высоким содержанием инулина – 78–79%. Наиболее выраженные различия между исследованными препаратами проявляются в выходе экстракта и его органолептических характеристиках. Полученные результаты могут быть использованы при выборе ферментных препаратов и технологических режимов предварительной обработки инулинсодержащего растительного сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

топинамбур; инулинсодержащее сырье; ферментативный гидролиз; инулин; углеводный состав

Research on the Influence of Technological Parameters and Comparative Evaluation of Methods for Enzymatic Hydrolysis of Inulin-containing Raw Materials

Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural
Academy, Moscow, Russian Federation

Igor A. Bakin, Vladislav D. Korotkov, Anna S. Mustafina

CORRESPONDENCE:

Igor A. Bakin

E-mail: bakin@rgau-msha.ru

FOR CITATIONS:

Bakin, I., Korotkov, V., & Mustafina, A. (2025). Research on the Influence of technological parameters and comparative evaluation of methods for enzymatic hydrolysis of inulin-containing raw materials. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 22-38. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.691>

RECEIVED: 01.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Prebiotic oligosaccharides are of considerable interest to the food industry because of their functional properties. In the Russian Federation, Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) is the principal raw material for industrial inulin production; however, its processing is complicated by the compositional features of the tubers, including their relatively high protein content. Accordingly, the selection of an enzyme preparation and pretreatment conditions is a critical factor in improving the efficiency of inulin extraction from plant-derived raw material.

Purpose: To evaluate the effects of enzyme preparations with different modes of action on the carbohydrate composition of Jerusalem artichoke extracts and to determine rational pretreatment parameters for inulin-containing raw material.

Materials and Methods: Aqueous extracts obtained from dried and milled tubers of Jerusalem artichoke cv. Omskiy Belyi after enzymatic pretreatment were used as the study material. Pectolux and CelloLux BGK enzyme complexes were employed as reference preparations, while Biozyme Plus was assessed as an alternative preparation. Total solids content and refractometric characteristics were determined, and carbohydrate composition was analysed by high-performance liquid chromatography using a standard carbohydrate mixture for calibration. Extract quality was assessed organoleptically in terms of colour, clarity, and opalescence. Extraction kinetics were studied by varying enzyme dosage, hydromodule, temperature in the range of 40–80 °C, and treatment time from 20 to 60 min.

Results: Enzymatic pretreatment was found to significantly affect the physicochemical characteristics of the extracts and their inulin content. Extracts produced using CelloLux BGK and Biozyme Plus exhibited greater opalescence and a lighter yellowish hue. The extract obtained after Pectolux treatment was characterized by a straw colour and high clarity. Pectolux increased extract volume twofold, whereas CelloLux BGK produced a 1.6-fold increase relative to the control. As the temperature increased to 50 °C, the inulin content of the extract rose linearly. Further temperature elevation did not result in a substantial increase, whereas temperatures above 70 °C induced inulin hydrolysis with the formation of di- and monosaccharides.

Conclusion: Enzymatic pretreatment of Jerusalem artichoke improves extraction efficiency and enables the production of extracts with a high inulin content of 78–79%. The most pronounced differences among the tested preparations were observed in extract yield and organoleptic properties. The findings may be applied to the selection of enzyme preparations and pretreatment regimes for the processing of inulin-containing plant raw materials.

KEYWORDS

Helianthus tuberosus L.; inulin-containing raw materials; enzymatic hydrolysis; inulin; carbohydrate composition

ВВЕДЕНИЕ

Пребиотические олигосахариды рассматриваются в современной науке как функциональные ингредиенты с доказанным положительным влиянием на состояние кишечной микробиоты, метаболические процессы и иммунный статус человека. Инулин, являющийся фруктоолигосахаридом с различной степенью полимеризации, демонстрирует выраженные пребиотические свойства и широко применяется в пищевой и фармацевтической промышленности при разработке функциональных продуктов питания (Байдалинова & Мельникова, 2016; Быкова & Калинина, 2022; Петров и др., 2022; Alonso-Allende et al., 2024; Sheng et al., 2023; Teferra, 2021; Visuthranukul et al., 2024). Наряду с этим современный рацион населения характеризуется сниженным потреблением пищевых волокон, что усиливает интерес к технологически доступным источникам инулина и фруктоолигосахаридов (Коденцова и др., 2022; Крутихина и др., 2023; Atta et al., 2025).

В Российской Федерации основным промышленным источником инулина является клубненосный подсолнечник (*Helianthus tuberosus L.*), отличающийся высокой урожайностью и значительным содержанием фруктоолигосахаридов (Кутейникова и др., 2024; Chauhan et al., 2025). Однако переработка данного сырья осложняется высоким содержанием белковых и пектиновых компонентов, которые снижают эффективность экстракции и ухудшают качество получаемых экстрактов (Бызов и др., 2023а; Бызов и др., 2024; Коннова & Максименко, 2025). В связи с этим актуальной задачей является поиск технологических решений, направленных на повышение выхода инулина и улучшение характеристик экстрактов при сохранении структуры полисахаридов.

Одним из наиболее перспективных подходов считается применение ферментативного гидролиза, позволяющего эффективно разрушать пектиновые и целлюлозные структуры растительного сырья и снижать содержание сопутствующих примесей (Леонтьев и др., 2014; Redondo-Cuenca et al., 2021; Мунгуннараран и др., 2022). Ряд исследований демонстрирует эффективность использования мультиферментных комплексов, включающих пектиназы, целлюлазы и инулиназы, однако при этом отмечается риск деполимеризации инулина и увеличения

доли моно- и дисахаридов в экстрактах (Рожкова и др., 2023; Шаненко и др., 2023). Следовательно, сохраняется научный и технологический пробел, связанный с выбором оптимального типа ферментативного препарата и параметров процесса, обеспечивающих максимальный выход инулина при минимальной степени его деструкции.

Таким образом, несмотря на значительное количество исследований, посвященных переработке инулинсодержащего сырья, проблема комплексной оптимизации параметров ферментативного гидролиза с учетом углеводного профиля экстрактов остается недостаточно систематизированной и требует дальнейшего экспериментального обоснования (Бакин, 2023; Нугманов и др., 2024; Пучкова и др., 2021; Бызов и др., 2023b). Целью настоящего исследования являлось изучение эффективности применения ферментативных препаратов различных типов для модификации углеводного состава экстрактов инулинсодержащего сырья и определение оптимальных параметров предварительной обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Ферментные препараты Пектолюкс, Целлолюкс БГК, Биозим Plus

Ферментные препараты Пектолюкс и Целлолюкс БГК изготовлены предприятием ООО ПО «Сиббиофарм» (Новосибирская область, г. Бердск, 2025 г.). Ферментный препарат Биозим Plus изготовлен компанией ТЕХВЕТ® (Москва, 2025 г.). Характеристика ферментных препаратов представлена в Таблице 1.

Крупка из топинамбура

Для процесса ферментации использовалась высушенная и измельченная крупка, выработанная из свежих клубней топинамбура (*Helianthus tuberosus L.*) сорта Омский белый, предоставленная ООО «ИстАгроДон». Сорт относится к среднеспелым. Топинамбур выращен в 2024 г. на территории агропромышленного комплекса «ИстАгроДон» Данковского района Липецкой области. Органолептические и физико-химические параметры крупки представлены в Таблицах 2 и 3.

Таблица 1

Краткая характеристика ферментативных препаратов

Table 1

Brief Characteristics of Enzymatic Preparations

Наименование ферментных препаратов, (воздействие)	Активность, ед/г(см ³)	Дозировка препарата, допустимое отклонение	Условия гидролиза
Пектолюкс (расщепляет пектин)	пектинлиазная – 35000	100–200 г/т допустимое отклонение ±10 %	pH – 4,7–5,0; T = 40–45 °С; продолжительность – 30 мин
ЦеллоЛюкс БГК (полисахариды: гемицеллюлозы и пентозаны)	ксилазная – 6 000; β-глюканазная – 2 000	0,15–0,3 л/т допустимое отклонение ±5 %	pH – 4,0–6,0; T = 45–50 °С; продолжительность – 30 мин, до 1,5 ч.
Биозим Plus (некрахмалистые полисахариды и пентозаны: пектин; белки)	ксилазная – 2450; β-глюканазная – 540; пектиназная – 2700; амилазная – 220; пектин-лиазная – 480	200–400 г/т допустимое отклонение ±5 %	pH – 4,7; T = 40–50 °С; продолжительность – 30 мин

Таблица 2

Органолептические свойства крупки из топинамбура

Table 2

Organoleptic Properties of Jerusalem Artichoke Groats

Наименование показателя	Характеристика показателя
Внешний вид	Крупка
Цвет	Свойственный цвету сырья, из которого изготовлен продукт с желтым или коричневым оттенком
Вкус и запах	Свойственные топинамбуру без постороннего привкуса и запаха
Консистенция	Сыпучая, допускается наличие неплотно слежавшихся комочков, легко рассыпающихся при слабом механическом воздействии
Наличие посторонних примесей	Не допускается

Таблица 3

Физико-химические показатели крупки из топинамбура

Table 3

Physicochemical Properties of Jerusalem Artichoke Groats

Наименование показателя	Характеристика показателя
Массовая доля сухих веществ,%, не менее	90
Массовая доля влаги,%, не более	10
Содержание инулина (фруктоолигосахариды, инулиологосахариды) в пересчете на сухие вещества, %	55–70
Степень полимеризации инулина (DP)	2–25
Содержание глюкозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	2
Содержание фруктозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	5
Содержание сахарозы в пересчете на сухие вещества,%, не более	12
Массовая доля золы в пересчете на сухие вещества,%, не более	5
Массовая доля металлических примесей (частиц не более 0,3 мм в наибольшем линейном измерении),%, не более	0,0003
Массовая доля минеральных примесей (песка),%, не более	0,01
Крупность частиц, мкм	от 0,5 до 2 мм в диаметре

Примечание. По данным производителя.

Note. According to the Manufacturer.

Оборудование

Исследования проводились с использованием рефрактометра ИРФ-454Б2М («Казанский оптико-механический завод», Россия, год производства — 2006, предел допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,05\%$); весового влагомера марки MF-50 (AND, Япония, год производства — 2014, предел допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,05\%$); жидкостного хроматографа углеводов с рефрактометрическим датчиком (Gilson, Россия, год производства — 2010, предел допустимой погрешности измерений $\pm 0,3\%$).

Методы

Сравнительный анализ проводился путем сопоставления показателей эффективности различных ферментных препаратов (Пектолюкс, ЦеллоЛюкс БГК, Биозим Plus) с контрольным образцом (без обработки препаратом) при одинаковых условиях.

Экспериментальный анализ охватывал три направления: кинетическое исследование влияния различных температурных режимов (в диапазоне $40\div 80^\circ\text{C}$) на процесс экстракции; исследование кинетики процесса с оценкой воздействия продолжительности экстракции (в диапазоне $20\div 60$ мин) на результаты процесса; анализ показателей качества с акцентом на оценку органолептических характеристик полученных экстрактов (цвет, прозрачность, опалесценция).

Экспериментально-статистический анализ, включающий многократные измерения (в трехкратной повторности). Погрешности измерений (допустимых отклонений для всех параметров) контролировали. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Microsoft Excel. Вычислительные процедуры для оценки влияния основных факторов предварительной обработки сырья и выявления оптимальных параметров реализованы с помощью программного обеспечения Statistica for Windows (StatSoft) с применением модуля дисперсионного анализа (ANOVA).

Исследование построено на системном подходе, где гипотеза состояла в том, что все параметры взаимосвязаны. Для подтверждения гипотезы осуществлялись: контроль условий экспериментов,

фиксация всех значимых показателей; комплексный анализ полученных результатов.

Достоверность и воспроизводимость результатов подтверждалась многократными измерениями и контролем погрешностей.

Физико-химический анализ включал: определение массовой доли сухих веществ; рефрактометрический анализ экстрактов; хроматографическое исследование углеводного состава экстрактов.

Для определения концентрации растворимых сухих веществ в экстракте клубней топинамбура использовалась общепринятая методика рефрактометрического анализа, соответствующая требованиям ГОСТ ISO 2173-2013 «Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ».

Анализ углеводного состава (% на 100% углеводов в экстракте) для определения содержания углеводов, таких как инулин, дисахариды, глюкоза и фруктоза, проводился методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на жидкостном хроматографе углеводов с рефрактометрическим детектором компании Gilson (Россия). В процессе разделения использовалась колонка Rezex RCM-Monosaccharide Ca^{2+} (8%) от компании Phenomenex (США) размером $300 \times 7,8$ миллиметров, снабженная соответствующей предколонкой. В качестве подвижной фазы применялась бидистиллированная вода, предварительно дегазированная ультразвуком. Элюирование осуществлялось в изокритическом режиме при температуре колонки 85°C . Скорость потока элюента составляла $0,6$ миллилитра в минуту, а объем вводимой пробы — 20 микролитров. Детектирование происходило при температуре детектора 60°C . Идентификация и количественная оценка пиков производились методом внешнего стандарта на основе времени удерживания. Для калибровки использовались стандартные растворы чистых веществ, таких как глюкоза, фруктоза, сахароза и инулин с известной степенью полимеризации. Калибровочные кривые создавались в диапазоне концентраций от $0,1$ до $5,0$ миллиграмм на миллилитр. Коэффициент детерминации (R^2) для всех анализируемых веществ был не менее $0,999$. Предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ) для углеводов были равны $0,01$ и $0,03$ мг/мл

соответственно. Отношение пиков и расчет концентраций оценивались по стандартному образцу, содержащему смесь анализируемых углеводов (глюкоза, фруктоза, сахароза) в концентрации, эквивалентной 100 % углеводов экстракта.

Процедура исследования

Для выявления оптимального температурного режима первичной обработки сырья проводилась экстракция четырех образцов крупки топинамбура с гидромодулем (далее ГМ) 1 : 3 (50 г крупки на 150 мл воды). В ходе реализации центрального ротационного композиционного плана эксперимента диапазон температурных режимов варьировался от 40 °С до 80 °С с шагом в 10 °С. Продолжительность экстракции образцов составила 30 мин.

Для установления оптимальной продолжительности экстракции инулина были подготовлены четыре образца водных экстрактов из крупки клубней топинамбура с ГМ 1 : 3. Продолжительность экстракции варьировалась в диапазоне от 20 до 60 мин с шагом в 10 мин. Температура проведения экстракции — 40 °С.

Расчет дозировки ферментативного препарата проводился по рекомендации производителя. Для обработки 50 г крупки и 150 мл воды применяли следующие дозировки: Пектолюкс — 0,075 г ± 0,0075 г, ЦеллоЛюкс — 0,1 мл (разведение 1 : 50) ± 0,005 мл, Биозим Plus — 0,003 г ± 0,00015 г.

Экспериментальное исследование экстракции олигосахаридов с использованием ферментных препаратов реализовано при условии первоначального смешивания крупки топинамбура и подготовленной воды (ГМ 1 : 3), с последующим добавлением в смесь ферментативного препарата. Гидролиз проводился при температуре 40 °С в течение 30 мин, далее смесь нагревалась до 50 °С в течение 3–10 мин и проводилось экстрагирование при 50 °С в течение 30 мин. Общая продолжительность процесса экстрагирования и ферментативного гидролиза составляла 70 мин при постоянном перемешивании. Полученный экстракт отделялся центрифугированием в течение 30 мин (частота вращения ротора 5000 об/мин). С целью инактивации ферментных препаратов после центрифугирования экстракт нагревался в течение 5–10 мин до темпе-

ратуры 60–70 °С и далее фильтровался. В качестве контроля проводился эксперимент без использования ферментного препарата при аналогичных контролируемых условиях.

Контроль температурного режима в процессе водной диффузии реализовывался с применением термопар, размещенных в варочных емкостях. Сигналы, поступающие от датчиков, регистрировались с интервалом в одну минуту до достижения стабилизации температурного режима, при котором значения температуры оставались неизменными на протяжении пятнадцати мин. Погрешность при измерении температуры составила ±0,5 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние температурного режима на процесс экстрагирования углеводов из крупки топинамбура

Экспериментальные данные о влиянии температурного режима на выход углеводов из крупки топинамбура представлены на Рисунке 1 и в Таблице 4.

Таблица 4

Углеводный состав экстракта крупки топинамбура при различном температурном режиме, г/100 г экстракта

Table 4

Carbohydrate Composition of Jerusalem Artichoke Extract at Different Temperature Conditions, g/100 g of Extract

Температурный режим, °С	Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
40	53,21	16,21	0	5,49
50	60,76	16,25	0	5,54
60	60,44	16,31	0	5,52
70	52,15	19,29	1,25	9,59
80	40,34	21,32	2,43	10,6

Примечание. Погрешность измерения углеводного состава ±0,3

Note. The Error in Measuring Carbohydrate Composition is ±0.3 %

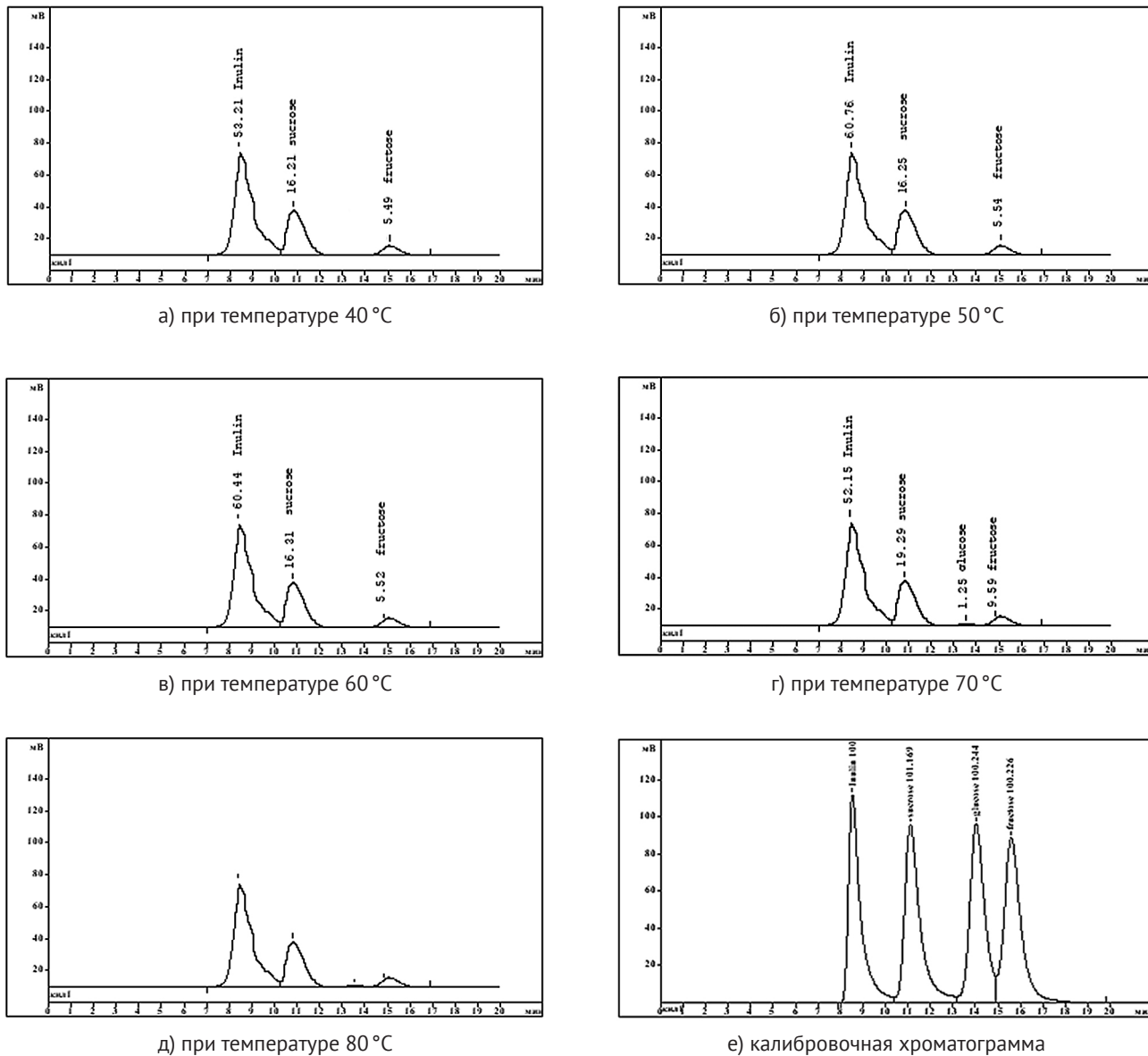
Как показал анализ результатов исследования, содержание в экстракте инулина увеличивается, достигая максимального значения при температурном режиме 50 °С, после чего параметры выхо-

Рисунок 1

ВЭЖХ-хроматограмма извлечений из крупки топинамбура в зависимости от температурного режима

Figure 1

HPLC Chromatogram of Jerusalem Artichoke Extracts



да процесса стабилизируются на плато и практически не изменяются, вплоть до температурного режима 70°C, при котором содержание инулина в экстракте начинает стремительно падать. Дисперсионный анализ (ANOVA) процесса экстракции показал значимое влияние ($\pm 95\%$ доверительный интервал) фактора температуры на выход олигосахаридов. Это можно объяснить, на наш взгляд, тем, что при температуре 70°C и выше происходит гидролиз инулина с последующим распадом до ди- и моносахаридов, о чем свидетельствует

повышение содержания последних в углеводном составе экстракта. На основе данных наблюдений и имеющихся рекомендаций по необходимой температуре протекания ферментативного гидролиза до 50°C предложен оптимальный температурный режим ферментации 40°C с последующим нагревом до 50°C.

Полученные данные о температурной стабильности инулина хорошо согласуются с результатами других исследований. Наблюдаемое нами резкое сни-

жение содержания инулина в экстракте при температурах выше 70 °С и соответствующее увеличение доли моносахаридов (фруктозы) обусловлено термическим гидролизом β -(2→1)-гликозидных связей в молекуле полифруктозана (Redondo-Cuenca et al., 2021). Найденный нами оптимальный диапазон (40–50 °С) соответствует условиям, обеспечивающим максимальный выход нативного инулина без его существенной деградации, что согласуется с литературными данными по экстракции из различных растительных источников (Mungunwaran et al., 2022).

Выявление оптимальной продолжительности диффузии

Для выявления оптимальной продолжительности процесса диффузии проведена серия опытов, в которых продолжительность процесса диффузии, при найденных ранее оптимальных температурных режимах, варьировалась в интервале от 20 до 60 мин с шагом изменения 10 мин. Результаты измерений, полученные в ходе опытов, представлены на Рисунке 2 и в Таблице 5.

Рисунок 2

ВЭЖХ-хроматограмма извлечений из крупки топинамбура в зависимости от продолжительности экстракции

Figure 2

HPLC Chromatogram of Extracts from Jerusalem Artichoke Grains Depending on the Duration of Extraction

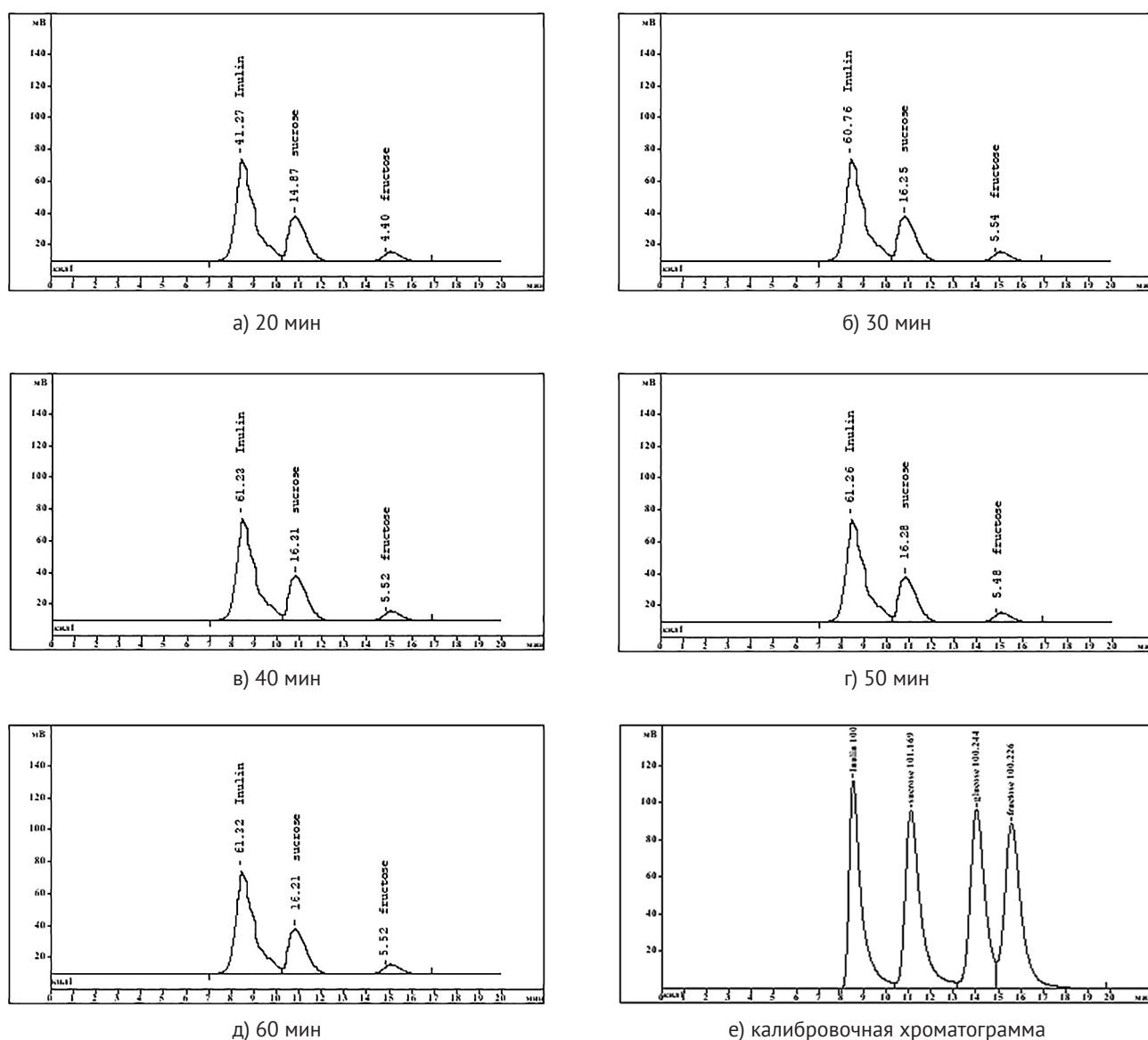


Таблица 5

Углеводный состав экстракта крупки топинамбура при различной продолжительности экстракции, г/100 г экстракта

Table 5

Carbohydrate composition of Jerusalem Artichoke Extract at Different Extraction Times, g/100 g of Extract

Продолжительность экстракции, мин	Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
20	41,27	14,87	0	4,4
30	60,76	16,25	0	5,54
40	61,23	16,31	0	5,52
50	61,26	16,28	0	5,48
60	61,32	16,21	0	5,52

Примечание. Погрешность измерения углеводного состава $\pm 0,3\%$

Note. The Error in Measuring the Carbohydrate Content is $\pm 0.3\%$

Из полученных данных следует, что в процессе экстракции концентрация инулина увеличивается в течение 30 мин, после чего практически не изменяется. Концентрация же ди- и моносахаридов не изменяется на протяжении всего опыта, что может быть объяснено большей растворимостью ди- и моносахаридов, по сравнению с полисахаридом инулином.

Исходя из анализа полученных эмпирических данных сделано предположение, что оптимальная продолжительность гидролиза составляет 30 мин. В сочетании с полученными данными по температурным режимам ферментации рекомендованы оп-

тимальные параметры ферментативного гидролиза: первый период — 30 мин при температуре 40°C, второй период — 30 мин при температуре 50°C.

Сравнительный анализ углеводного состава полученных экстрактов

Результаты комплексного анализа физико-химических характеристик контрольного и изучаемых экстрактов (и их углеводного состава), полученных в ходе эксперимента процесса экстракции, представлены в Таблице 6.

Статистическая обработка переменных отклика, проведенная с использованием процедуры дисперсионного анализа показала значимое влияние вида препарата для обработки на изменение углеводного комплекса (при уровне $p > 0,05$). Сравнение характеристик экстрактов показывает отличие не только их количественного состава, но и органолептических показателей. В контрольном образце (без обработки ферментными препаратами) наблюдался осадок, образование которого можно объяснить формированием преимущественно нерастворимых клеточных остатков, комплексов белка с полифенолами и высокомолекулярных нативных пектинов. Ферментативная обработка, в частности комплексными препаратами, содержащими протеазную активность (например, Биозим PLUS), способствует не только разрушению клеточных стенок, но и частичному гидролизу белков. Установленное явление позволяет предотвратить образование нерастворимых белково-пектиновых комплексов и способствовать более чистому раз-

Таблица 6

Характеристика полученных экстрактов из крупки топинамбура

Table 6

Characteristics of the Extracts Obtained from Jerusalem Artichoke Grains

Наименование ферментного препарата	Характеристика экстракта		Углеводный состав экстракта (на 100 % углеводов), %			
	сухие вещества, %	объем, мл	инулин	дисахариды	глюкоза	фруктоза
Контроль	12,1 \pm 0,006	60	60,97 \pm 0,235	16,28 \pm 0,051	—	5,53 \pm 0,014
Пектолюкс	12,2 \pm 0,006	120	78,98 \pm 0,237	17,71 \pm 0,053	—	3,31 \pm 0,010
ЦеллоЛюкс БГК	13,0 \pm 0,007	95	79,47 \pm 0,238	17,96 \pm 0,054	—	2,58 \pm 0,008
Биозим PLUS	12,6 \pm 0,006	100	78,61 \pm 0,236	17,34 \pm 0,052	—	4,05 \pm 0,012

делению фаз при центрифугировании. Это предположение подтверждается органолептическими показателями экстрактов, имеющих наиболее выраженный эффект осветления, достигаемый за счет целенаправленного гидролиза пектина. В ходе эксперимента полученный при оптимизированных условиях контрольный образец экстракта отличался высокой степенью опалесценции и светло-коричневым цветом.

Образцы, для которых при ферментативном гидролизе использовались препараты ЦеллоЛюкс БГК и Биозим Plus, также отличались значительной степенью опалесценции, но имели более светлый, желтоватый оттенок. Образец, обработанный Пектолюксом, имел соломенный цвет и высокую степень прозрачности. В целом выявленное значительное содержание инулина в образцах при низком уровне моносахаридов свидетельствует о повышении эффективности разрушения диффузионных барьеров клеточного сырья при взаимодействии ферментов с биомассой.

В результате проведенного анализа углеводного состава экстрактов установлено, что ферментативные препараты, использованные в процессе экстрагирования, не оказали существенного влияния на изменение углеводного профиля. Препарат Пектолюкс, традиционно используемый для гидролиза пектиновых соединений, показал незначительное повышение содержания сухих веществ в экстракте, что может быть объяснено образованием продуктов распада пектина (олигосахариды с ненасыщенной связью на невосстанавливаемом конце (4-дезоксид- α -D-галакт-4-энуранозильные группы); фрагменты с измененной структурой, более растворимые). Однако при этом отмечается значительное увеличение объема экстракта до 120 мл, по сравнению с контрольным образцом, который составил 60 мл.

Использование препарата ЦеллоЛюкс БГК, предназначенного для гидролиза целлюлозных и гемицеллюлозных компонентов, аналогичным образом привело к увеличению объема экстракта до 95 мл. Увеличение содержания сухих веществ в экстракте (на 0,9 %) при использовании препарата ЦеллоЛюкс БГК может быть объяснено образованием в экстракте продуктов распада β -глюканов и ксиланов. Кроме того, стоит отметить, что среди используемых ферментных препаратов ЦеллоЛюкс БГК показал наилучший результат по части изменения углево-

дного состава, так как в результате его воздействия концентрация инулина была максимальной.

Препарат Биозим PLUS, представляющий собой ферментный комплекс для гидролиза широкого спектра компонентов (целлюлозных, гемицеллюлозных и пектиновых соединений), показал промежуточные результаты. Препарат превзошел ЦеллоЛюкс БГК по увеличению объема (100 мл) и Пектолюкс по содержанию сухих веществ в экстракте (12,6 %).

Эффект увеличения объема и прозрачности экстракта под действием ферментных препаратов, в первую очередь Пектолюкса, имеет логичное объяснение с точки зрения их субстратной специфичности. Пектиназы и целлюлазы гидролизуют структурные полисахариды клеточной стенки (пектины, гемицеллюлозы) и разрушают гелеобразную пектиновую матрицу. Это приводит к снижению вязкости среды, более эффективному разрушению клеточных структур при экстракции и, как следствие, к увеличению выхода жидкой фазы. Одновременно происходит деполимеризация высокомолекулярных пектинов, которые являются основными коллоидными компонентами, вызывающими помутнение и образование стабильных взвесей, что также отражено в исследованиях Рожковой А. М. и соавторов (Рожкова и др., 2023). Применение пектиназ без выраженной инулиназной активности было направлено не на гидролиз инулина, а на очистку экстракта от сопутствующих балластных веществ, что успешно достигнуто и подтверждается ростом объема и прозрачности при сохранении высокого содержания целевого полисахарида. Таким образом, повышенная прозрачность экстракта после обработки Пектолюксом является прямым следствием гидролиза именно пектиновых веществ, что снижает количество частиц, рассеивающих свет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что температурно-временные параметры и тип ферментативного препарата оказывают определяющее влияние на выход инулина и качественные характеристики экстрактов клубней топинамбура. Установлено, что оптимальным температурным диапазоном для сохранения структуры инулина является интервал 40–50 °С, при кото-

ром достигается максимальное содержание инулина без выраженной деполимеризации до ди- и моносахаридов. Данный результат согласуется с выводами Леонтьева и соавторов (2014), а также Redondo-Cuenca et al. (2021), указывающих на термочувствительность инулина и его склонность к гидролизу при температурах выше 60–70 °С.

Анализ влияния продолжительности экстракции показал, что увеличение времени гидролиза свыше 30 мин не приводит к статистически значимому росту концентрации инулина, что свидетельствует о достижении равновесного состояния между скоростью диффузии и растворимостью полисахарида. Подобная кинетическая зависимость ранее отмечалась в работах Мунгуннарана и соавторов (2022) при экстракции полисахаридов из растительного сырья, что подтверждает универсальность выявленного закономерного характера процесса.

Сравнительный анализ применения ферментных препаратов показал, что используемые комплексы не приводят к принципиальному изменению углеводного профиля экстрактов, однако существенно влияют на объем получаемого экстракта и его органолептические характеристики. Наиболее выраженный эффект увеличения объема и прозрачности экстракта наблюдался при применении препарата Пектолюкс, что может быть объяснено эффективным гидролизом пектиновых соединений клеточных стенок. Аналогичные эффекты повышения выхода экстракта при разрушении пектинового матрикса растительных тканей описаны в исследованиях Рожковой и соавторов (2023) и Шаненко и соавторов (2023).

Препарат ЦеллоЛюкс БГК продемонстрировал наибольшее содержание инулина в экстракте, что, вероятно, связано с более полным разрушением гемицеллюлозных структур и облегчением диффузии полисахаридов в водную фазу. Данный результат подтверждает положения Бызова и соавторов (2023b, 2024), согласно которым биохимическая доступность инулина во многом определяется структурной организацией клеточных стенок клубней топинамбура.

Применение комплексного препарата Биозим PLUS обеспечило промежуточные результаты, что свидетельствует о том, что универсальные ферментные комплексы не всегда демонстрируют максималь-

ную эффективность при решении узкоспециализированных технологических задач. Подобный вывод согласуется с рекомендациями Пучковой и соавторов (2021) и Нугманова и соавторов (2024), подчеркивающих необходимость подбора ферментных систем с учетом целевой направленности процесса переработки инулинсодержащего сырья.

Отсутствие существенных различий в углеводном составе экстрактов между вариантами обработки подтверждает, что используемые ферментные препараты преимущественно влияют на физическую доступность инулина, а не на его химическую трансформацию. Это принципиально важно с точки зрения сохранения пребиотических свойств инулина, поскольку, как показано в работах Alonso-Allende et al. (2024), Sheng et al. (2023) и Teferra (2021), степень полимеризации напрямую связана с функциональной активностью инулина в организме человека.

В то же время установлено, что превышение температурного порога 70 °С приводит к выраженной деполимеризации инулина с ростом доли моно- и дисахаридов, что может снижать пребиотическую ценность конечного продукта. Данный эффект ранее отмечался также в обзорах Vyzov (2022) и Kuteynikova et al. (2024), что подтверждает необходимость строгого контроля температурных режимов при промышленной переработке инулинсодержащего сырья.

Следует отметить, что настоящее исследование проводилось в лабораторных условиях, это ограничивает возможность прямой экстраполяции полученных данных на промышленный масштаб. Кроме того, в работе не рассматривались комбинированные схемы применения ферментных препаратов и их возможные синергетические эффекты, что может быть предметом дальнейших исследований.

В прикладном аспекте полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность использования ферментативных препаратов для оптимизации процессов переработки топинамбура с целью получения инулина высокой степени чистоты. Это соответствует современным тенденциям развития функциональных пищевых ингредиентов и расширяет возможности промышленного внедрения инулина в продукты питания и нутрицевтики, что подчеркивается в работах Petrov et al. (2022), Atta et al. (2025) и Chauhan et al. (2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования установлено, что применение ферментативных препаратов при экстракции инулина из клубней топинамбура позволяет существенно повысить эффективность технологического процесса за счет увеличения выхода экстракта и улучшения его физико-химических и органолептических характеристик при сохранении стабильного углеводного профиля. Экспериментально подтверждено, что оптимальными параметрами ферментативного гидролиза, обеспечивающими максимальное содержание инулина без выраженной деполимеризации, являются температурный режим 40–50 °С и продолжительность процесса 30 мин на каждом этапе.

Показано, что использование ферментативных препаратов значительно влияет на выход олигосахаридов в экстракт, при этом в зависимости от вида препарата существенно изменяется объем экстрагируемого продукта и содержание в нем нерастворимых примесей. Наиболее выраженный технологический эффект по совокупности показателей продемонстрировал препарат Пектолукс, обеспечивший максимальный объем экстракта и наилучшие показатели прозрачности. Препарат ЦеллоЛюкс БГК обеспечил наибольшее содержание инулина в экстракте, тогда как Биозим PLUS занял промежуточное положение по всем исследуемым параметрам.

Полученные результаты подтверждают, что основное технологическое преимущество ферментативной обработки заключается не в модификации углеводного профиля, а в повышении доступности инулина за счет разрушения пектиновых и целлюлозных структур клеточных стенок сыра. Это позволяет рассматривать ферментативный гидролиз как эффективный инструмент предварительной подготовки инулинсодержащего сырья к экстракции без риска снижения пребиотической ценности конечного продукта.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных параметров процесса при разработке и оптими-

зации технологий промышленной переработки топинамбура для получения инулина и фруктоолигосахаридных экстрактов функционального назначения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании биотехнологических линий переработки, а также при обосновании выбора ферментных препаратов для конкретных технологических задач.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением комбинированного применения ферментных препаратов, оптимизацией их дозировок, масштабированием процесса, а также с оценкой экономической эффективности предложенных технологических решений. Дополнительным направлением является исследование влияния ферментативной обработки на функциональные свойства инулина в составе готовых пищевых и нутрицевтических продуктов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Бакин Игорь Алексеевич: разработка концепции; методология исследований; валидация результатов; создание рукописи.

Коротков Владислав Дмитриевич: проведение исследования; эмпирические исследования; визуализация данных; написание черновика рукописи.

Мустафина Анна Сабирдзяновна: верификация данных; написание рукописи, рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Igor A. Bakin: concept development; research methodology; results validation; manuscript drafting.

Vladislav D. Korotkov: study execution; empirical research; data visualization; manuscript drafting.

Anna S. Mustafina: data verification; manuscript drafting — review and editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Байдалинова, Л.С., & Мельникова, В.А. (2016). Использование топинамбура для производства порошкообразного заменителя кофе. *Вестник Международной академии холода*, 1, 13–18. <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-15-1-13-18>
- Бакин, И.А., Макарова, А.А., & Гаспарян, Ш.В. (2023). Анализ устойчивости технологии очистки клубней топинамбура. *Ползуновский вестник*, 3, 21–33. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.003>
- Бызов, В.А. (2022). Системный анализ состояния и перспективы развития производства инулина (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 23(6), 757–776. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.757-776>
- Бызов, В.А., Пучкова, Т.С., & Пихало, Д.М. (2023а). Оценка показателей качества клубней топинамбура для переработки на инулин и его производные. *Пищевая промышленность*, 4, 58–62. <https://doi.org/10.52653/ppi.2023.4.4.010>
- Бызов, В.А., Пучкова, Т.С., & Пихало, Д.М. (2024). Влияние биохимических свойств топинамбура на качество и свойства получаемого из него инулина. *Пищевая промышленность*, 12, 60–66. <https://doi.org/10.52653/ppi.2024.12.12.012>
- Бызов, В.А., Шилов, В.В., Старовойтов, В.И., & Литвяк, В.В. (2023b). Предпосылки создания технологии выращивания и переработки топинамбура, влияющей на степень полимеризации олисахаридов в клубнях. *Вестник рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*, 15(3), 92–103. <https://doi.org/10.36508/rsatu.2023.47.22.013>
- Быкова, С.Т., & Калинина, Т.Г. (2022). Инулин и олигофруктоза — перспективные ингредиенты для обогащения функциональных продуктов детского питания. *Пищевая промышленность*, 8, 8–11. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.8.8.001>
- Василев, Д., Джержевич, В., Карабасил, Н., Димитриевич, М., Петрович, З., Велебит, Б., & Теодорович, В. (2017). Инулин как пребиотик и заменитель жира в мясных продуктах. *Теория и практика переработки мяса*, 2(2), 4–13. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-2-4-13>
- Коденцова, В.М., Леоненко, С.Н., Бекетова, Н.А., Кошелева, О.В., Вржесинская, О.А., Сокольников, А.А., Шевякова, Л.В., & Рисник, Д.В. (2022). Инулин как компонент обогащенных пищевых продуктов: влияние на микронутриентный статус организма. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*, 25(3), 34–42. <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-03-05>
- Коннова, О.И., & Максименко, Ю. А. (2025). Технология получения инулина из клубней топинамбура. *Индустрия питания*, 10(1), 23–29. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-1-3>
- Крутихина, С.Б., Геппе, Н.А., Яблокова, Е.А., & Кудряшова, М.А. (2023). Функциональные запоры у детей раннего возраста: современные возможности использования про- и пребиотиков. *Лечащий Врач*, 26(1), 1–14. <https://doi.org/10.51793/os.2023.26.1.002>
- Кутейникова, Е., Дьякова, Н., & Банова, М. (2024). Инулин: источники и методы получения (обзор). *Биофармацевтический журнал*, 16 (1), 3–11. <https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-3-11>
- Леонтьев, В.Н., Титок, В.В., Дубарь, Д.А., Игнатовец, О.С., Лугин, В.Г., & Феськова, Е.В. (2014). Инулин из топинамбура: биосинтез, структура, свойства, применение. *Труды Белорусского государственного университета. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*, 9(1), 180–185. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/121907>
- Мунгуннаран, Д., Мунхгерел, Л., Одончимэг, М., Регдел, Д. & Намжил, Э. (2022). Оптимизация процесса экстракции полисахаридов из природного сырья. *Вестник Института химии и химической технологии*, 10(10), 17–23. <https://doi.org/10.5564/bicct.v10i10.18044>
- Нугманов, А.Х.Х., Бакин, И.А., Мустафина, А.С., & Шаповалова, П.Н. (2024). Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus L.*). *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 33–44. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.597>

- Нуридуллаева, К.Н., Кариева, Ё.С., & Халилов, Р. М. (2023). Разработка промышленной технологии производства инулина из корней одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg.). *Химико-фармацевтический журнал*, 57(8), 67–72. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2023-57-8-67-72>
- Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., & Григорьев, Д. А. (2022). Инулин как перспективный натуральный пребиотик многоцелевого использования. *Пищевая промышленность*, 7, 66–74. <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.7.7.012>
- Пучкова, Т.С., Бызов, В.А., Пихало, Д.М., & Карасева, О.М. (2021). Технологическая оценка и требования к качественным показателям топинамбура и цикория для переработки на инулин и его производные. *Пищевая промышленность*, 10, 86–91. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.012>
- Рожкова, А.М., Денисенко, Ю.А., Милова, Е.С., Зоров, И.Н., Сеницына, О.А., Ярошенко, Е.В., & Сеницын, А.П. (2023). Новый комплексный ферментный препарат экзо-инулиназы и пектинлиазы для использования в технологии переработки топинамбура. *Биотехнология*, 39(5), 33–43. <https://doi.org/10.56304/S0234275823050101>
- Типсина, Н.Н., Демиденко, Г.А., & Кох, Д.А. (2023). Технология получения и применения полуфабрикатов из топинамбура для обогащения хлебобулочных изделий. *Ползуновский вестник*, 4, 140–145. <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.04.018>
- Шаненко, Е.Ф., Мухамеджанова, Т.Г., Скородумов, А.С., & Нестеров, Е.Д. (2023). Получение концентрата фруктоолигосахаридов из клубней топинамбура для функциональных продуктов. *Пиво и напитки*, 4, 20–25. <https://doi.org/10.52653/pin.2023.04.007>
- Alonso-Allende, J., Milagro, F.I., & Aranaz, P. (2024). Health effects and mechanisms of inulin action in human metabolism. *Nutrients*, 16(17), 2935. <https://doi.org/10.3390/nu16172935>
- Atta, A., Sharif, S., Haroon, K., Rasheed, M., Menon, S.V., Balaji, J., Jain, B., Jameel, Q.Y., & Shah, M.A. (2025). A comprehensive review on health benefits of fructooligosaccharides. *eFood*, 6, e70041. <https://doi.org/10.1002/efd2.70041>
- Chauhan, D. S., Vashisht, P., Bebartta, R. P., Thakur, D., & Chaudhary, V. (2025). Jerusalem artichoke: A comprehensive review of nutritional composition, health benefits and emerging trends in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70114. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70114>
- Melilli, M. G., Buzzanca, C., & di Stefano, V. (2024). Quality characteristics of cereal-based foods enriched with different degree of polymerization inulin: A review. *Carbohydr Polym*, 332, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121918>
- Mitchell, C. M., Davy, B. M., Ponder, M. A., McMillan, R. P., Hughes, M. D., Hulver, M. W., Neilson, A.P., & Davy, K. P. (2021). Prebiotic inulin supplementation and peripheral insulin sensitivity in adults at elevated risk for type 2 diabetes: A pilot randomized controlled trial. *Nutrients*, 13(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/nu13093235>
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops & Products*, 170, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Sheng, W., Ji, G., & Zhang, L. (2023). Immunomodulatory effects of inulin and its intestinal metabolites. *Frontiers in Immunology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1224092>
- Teferra, T.F. (2021). Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers*, 2, (4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/fft2.92>
- Visuthranukul, C., Sriswasdi, S., Tapaamorndech, S., Chamni, S., Leelahavanichkul, A., Joyjinda, Y., Aksornkitti, V., & Chomtho, S. (2024). Enhancing gut microbiota and microbial function with inulin supplementation in children with obesity. *International Journal of Obesity*, 48(12), 1696–1704. <https://doi.org/10.1038/s41366-024-01590-8>
- Zhou, Z., Zhang, L., Liu, T., Hu, G., Hu, H., Aziz, T., Zhang, M., Wu, J., Naseeb, J., Yang, Z., Yang, Z., & Albekairi, T. H. (2024). Physicochemical properties of yoghurt supplemented with polymerized whey protein and inulin. *LWT*, 210, 116888. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116888>

REFERENCES

- Baidalinova, L.S., & Melnikova, V.A. (2016). Use of Jerusalem artichoke for the production of powdered coffee substitute. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*, (1), 13–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.21047/1606-4313-2016-15-1-13-18>
- Bakin, I.A., Makarova, A.A., & Gasparyan, Sh.V. (2023). Analysis of the sustainability of Jerusalem artichoke tuber cleaning technology. *Polzunovsky Vestnik*, (3), 21–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.003>
- Byzov, V. A. (2022). Systems analysis of the state and prospects for the development of inulin production (review). *Agrarian Science of Euro-North-East*, 23(6), 757–776. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.757-776>
- Byzov, V.A., Puchkova, T.S., & Pikhalo, D.M. (2023). Evaluation of quality indicators of Jerusalem artichoke tubers for processing into inulin and its derivatives. *Food Industry*, 4, 58–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/ppi.2023.4.4.010>
- Byzov, V.A., Puchkova, T.S., & Pikhalo, D.M. (2024). The influence of biochemical properties of Jerusalem artichoke on the quality and properties of inulin obtained from it. *Food Industry*, 12, 60–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/ppi.2024.12.12.012>
- Byzov, V.A., Shilov, V.V., Starovoytov, V.I., & Litvyak, V.V. (2023). Prerequisites for the creation of Jerusalem artichoke cultivation and processing technology affecting the degree of polymerization of polysaccharides in tubers. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, 15(3), 92–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.36508/rsatu.2023.47.22.013>
- Bykova, S.T., & Kalinina, T.G. (2022). Inulin and oligofructose — promising ingredients for the fortification of functional baby foods. *Food Industry*, (8), 8–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.8.8.001>
- Vasilev, D., Djordjevic, V., Karabasil, N., Dimitrijevic, M., Petrovich, Z., Velebit, B., & Teodorovich, V. (2017). Inulin as a prebiotic and fat substitute in meat products. *Theory and Practice of Meat Processing*, 2(2), 4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2017-2-2-4-13>
- Kodentsova, V.M., Leonenko, S.N., Beketova, N.A., Kosheleva, O.V., Vrzhesinskaya, O.A., Sokolnikov, A.A., Shevyakova, L.V., & Risnik, D.V. (2022). Inulin as a component of fortified food products: Effect on the micronutrient status of the body. *Issues of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 25(3), 34–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-03-05>
- Konnova, O.I., & Maksimenko, Yu.A. (2025). Technology of inulin production from Jerusalem artichoke tubers. *Food Industry*, 10(1), 23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-1-3>
- Krutikhina, S.B., Geppe, N.A., Yablokova, E.A., & Kudryashova, M.A. (2023). Functional constipation in young children: current possibilities of using pro- and prebiotics. *Lechashchy Vrach*, 26(1), 1–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.51793/os.2023.26.1.002>
- Kuteynikova, E., Dyakova, N., & Banova, M. (2024). Inulin: Sources and methods of production (review). *Biopharmaceutical Journal*, 16(1), 3–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/2073-8099-2024-16-1-3-11>
- Leontyev, V.N., Titok, V.V., Dubar, D.A., Ignatovets, O.S., Lugin, V.G., & Feskova, E.V. (2014). Inulin from Jerusalem artichoke: biosynthesis, structure, properties, and application. *Transactions of the Belarusian State University. Physiological, Biochemical, and Molecular Foundations of Biosystems Functioning*, 9(1), 180–185. (In Russ.). <https://elib.bsu.by/handle/123456789/121907>
- Mungunnaran, D., Munkhgerel, L., Odonchimeg, M., Regdel, D., & Namzhil, E. (2022). Optimization of the polysaccharide extraction process from natural raw materials. *Bulletin of the Institute of Chemistry and Chemical Technology*, 10(10), 17–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.5564/bicct.v10i10.18044>
- Nugmanov, A.Kh.Kh., Bakin, I.A., Mustafina, A.S., & Shapovalova, P.N. (2024). Study of technological methods for inulin extraction from common chicory (*Cichorium intybus L.*)

- roots. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 33–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.597>
- Nuridullaeva, K.N., Kariyeva, E.S., & Khalilov, R.M. (2023). Development of industrial technology for the production of inulin from dandelion roots (*Taraxacum officinale* Wigg.). *Chemical-Pharmaceutical Journal*, 57 (8), 67–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2023-57-8-67-72>
- Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Grigoriev, D. A. (2022). Inulin as a Promising Natural Prebiotic with Multipurpose Use. *Food Industry*, (7), 66–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/ppi.2022.7.7.012>
- Puchkova, T. S., Byzov, V. A., Pikhalo, D. M., & Karaseva, O. M. (2021). Technological evaluation and requirements for quality indicators of jerusalem artichoke and chicory for processing into inulin and its derivatives. *Food Industry*, (10), 86–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.012>
- Rozhkova, A. M., Denisenko, Yu. A., Milova, E. S., Zorov, I. N., Sinitsyna, O. A., Yaroshenko, E. V., & Sinitsyn, A. P. (2023) A new complex enzyme preparation of exo-inulinase and pectin lyase for use in Jerusalem artichoke processing technology. *Biotechnology*, 39(5), 33–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0234275823050101>
- Tipsina, N.N., Demidenko, G.A., & Koch, D.A. (2023). Technology of obtaining and using Jerusalem artichoke semi-finished products for the enrichment of bakery products. *Polzunovsky Vestnik*, (4), 140–145. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2023.04.018>
- Shanenko, E.F., Mukhamedzhanova, T.G., Skorodumov, A.S., & Nesterov, E.D. (2023). Obtaining a fructooligosaccharide concentrate from Jerusalem artichoke tubers for functional foods. *Beer and Drinks*, (4), 20–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/pin.2023.04.007>
- Alonso-Allende, J., Milagro, F.I., & Aranaz, P. (2024). Health Effects and Mechanisms of Inulin Action in Human Metabolism. *Nutrients*, 16(17), 2935. <https://doi.org/10.3390/nu16172935>
- Atta, A., Sharif, S., Haroon, K., Rasheed, M., Menon, S.V., Balaji, J., Jain, B., Jameel, Q.Y., & Shah, M.A. (2025). A comprehensive review on health benefits of fructooligosaccharides. *eFood*, 6, e70041. <https://doi.org/10.1002/efd2.70041>
- Chauhan, D. S., Vashisht, P., Bebartta, R. P., Thakur, D., & Chaudhary, V. (2025). Jerusalem artichoke: A comprehensive review of nutritional composition, health benefits and emerging trends in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70114. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70114>
- Melilli, M. G., Buzzanca, C., & di Stefano, V. (2024). Quality characteristics of cereal-based foods enriched with different degree of polymerization inulin: A review. *Carbohydr Polym*, 332, 121918. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121918>
- Mitchell, C. M., Davy, B. M., Ponder, M. A., McMillan, R. P., Hughes, M. D., Hulver, M. W., Neilson, A.P., & Davy, K. P. (2021). Prebiotic inulin supplementation and peripheral insulin sensitivity in adults at elevated risk for type 2 diabetes: A pilot randomized controlled trial. *Nutrients*, 13(9), 3235. <https://doi.org/10.3390/nu13093235>
- Redondo-Cuenca, A., Herrera-Vázquez, S. E., Condezo-Hoyos, L., Gómez-Ordóñez, E., & Rupérez, P. (2021). Inulin extraction from common inulin-containing plant sources. *Industrial Crops & Products*, 170, 113726. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113726>
- Sheng, W., Ji, G., & Zhang, L. (2023). Immunomodulatory effects of inulin and its intestinal metabolites. *Frontiers in Immunology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1224092>
- Teferra, T.F. (2021). Possible actions of inulin as prebiotic polysaccharide: A review. *Food Frontiers* 2(4), 1–10. <https://doi.org/10.1002/fft2.92>
- Visuthranukul, C., Sriswasdi, S., Tapaamorndech, S., Chamni, S., Leelahavanichkul, A., Joyjinda, Y., Aksornkitti, V., & Chomtho, S. (2024). Enhancing gut microbiota and microbial function with inulin supplementation in children with obesity. *International Journal of Obesity*, 48(12), 1696–1704. <https://doi.org/10.1038/s41366-024-01590-8>
- Zhou, Z., Zhang, L., Liu, T., Hu, G., Hu, H., Aziz, T., Zhang, M., Wu, J., Naseeb, J., Yang, Z., Yang, Z., & Albekairi, T.H. (2024). Physicochemical properties of yoghurt supplemented with polymerized whey protein and inulin. *LWT*, 210, 116888. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116888>

ОБ АВТОРАХ

Игорь Алексеевич Бакин, заведующий кафедрой процессов и аппаратов перерабатывающих производств Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>, Scopus ID: 8549026700, Researcher ID: D-3253-2018, SPIN-код: 7771-9017, bakin@rgau-msha.ru

Владислав Дмитриевич Коротков, магистрант Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-3616>, SPIN-код: 2350-2522, Linkinstein2001@ya.ru

Анна Сабирдзяновна Мустафина, доцент кафедры технологии хранения и переработки плодовоовощной и растениеводческой продукции Технологического института Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-7226>, Scopus ID: 7221949926, Researcher ID: A-5582-2019, SPIN-код: 2794-4074, mustafina@rgau-msha.ru

ABOUT THE AUTHORS

Igor Alekseevich Bakin, Head of the Department of Processes and Apparatus for Processing Industries, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-1975>, Scopus ID: 8549026700, Researcher ID: D-3253-2018, SPIN-code: 7771-9017, bakin@rgau-msha.ru

Vladislav Dmitrievich Korotkov, Master's student at the Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-3616>, SPIN: 2350-2522, Linkinstein2001@ya.ru

Anna Sabirdzyanovna Mustafina, Associate Professor, Department of Storage and Processing Technology of Fruit and Vegetable and Plant Products, Technological Institute of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4895-7226>, Scopus ID: 7221949926, Researcher ID: A-5582-2019, SPIN: 2794-4074, mustafina@rgau-msha.ru

Автоматическая идентификация видов муки по спектрам поглощения

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация

М. В. Беляков

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Михаил Владимирович Беляков
E-mail: bmw20100@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Беляков, М.В. (2025). Автоматическая идентификация видов муки по спектрам поглощения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 39–54. <https://doi.org/10.36107/fme.2025.4.684>

ПОСТУПИЛА: 12.06.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Необходимость системы комплексной оценки качества муки, включая выявление примесей, добавок, улучшителей, предполагает использование машинного зрения и машинного обучения, являющихся передовыми направлениями искусственного интеллекта. Важным источником данных для анализа служат оптические спектральные методы.

Цель: изучение оптических фотолюминесцентных свойств различных видов муки для разработки методов автоматической идентификации состава смесей в процессах хранения и производства хлебобулочных изделий.

Материалы и методы: Для спектральных измерений использовались образцы муки из пшеницы, ржи, овса, риса, гороха, гречки и нута. Оптические спектральные измерения полученных образцов муки проводили в расширенном спектральном диапазоне 200–500 нм на дифракционном спектрофлуориметре СМ-2203.

Результаты: Все спектральные характеристики содержат максимумы на длинах волн: 272 нм, 286 нм, 290 нм, 362 нм, а также слабый максимум при 424 нм. Наиболее сильное возбуждение наблюдается у рисовой муки, а наименьшее – у гречневой. Для нутовой муки имеет место сильное поглощение в коротковолновой (260–290 нм) и длинноволновой (420 нм и более) областях. У остальных исследованных видов муки характеристики примерно схожие. Интегральные параметры H во всей исследуемой области 220–500 нм определяются с погрешностью до 10,9% (для овсяной муки), для всех остальных исследованных видов муки значения этих параметров различаются до 4,3 раз. Однако для проектирования систем машинного зрения целесообразно проводить идентификацию видов муки по интегральным параметрам в более узких областях λ_1 – λ_2 и по их соотношениям. На основе отобранных признаков построены модели классификации, показавшие точность до 88,9% при тестировании, выявлены проблемные пары классов, такие как гороховая и гречневая мука.

Выводы: Интегральные и статистические параметры спектров обладают высокой разделяющей способностью. Наибольшей комплексной оценкой отличаются отношение $H_{220-500}/H_{470-500}$ (85,3%), эксцесс (84,8%) и математическое ожидание (84,6%), которые рекомендуется использовать в качестве базовых для построения алгоритмов классификации. Практическая проверка на моделях машинного обучения подтвердила возможность автоматической идентификации видов муки с точностью, удовлетворяющей требованиям промышленного контроля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

мука; спектр поглощения; автоматическая классификация; оценка уровня отличия; информативные параметры идентификации

Automatic Identification of Flour Types by Absorption Spectra

Federal Scientific Agroengineering
Center VIM, Moscow, Russian Federation

Mikhail V. Belyakov

CORRESPONDENCE:

Mikhail V. Belyakov
E-mail: bmw20100@mail.ru

FOR CITATIONS:

Belyakov, M.V. (2025). Automatic identification of flour types by absorption spectra. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 39-54. <https://doi.org/10.36107/fme.2025.4.684>

RECEIVED: 12.06.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The need for a comprehensive flour quality assessment system, including the presence of impurities, additives, and improvers, involves the use of machine vision and machine learning, an advanced field of artificial intelligence. An important area of obtaining data for analysis is the use of optical spectral methods.

Objective: to study the optical photoluminescent properties of various types of flour in order to develop methods for automatic identification of the composition of mixtures during storage and production of bakery products.

Materials and methods: For spectral measurements, flour samples from wheat, rye, oats, rice, peas, buckwheat and chickpeas were used. Optical spectral measurements of the obtained flour samples were carried out in the extended spectral range of 200–500 nm on a CM 2203 diffraction spectrofluorimeter.

Results: All spectral characteristics contain peaks at the following wavelengths: 290 nm, 272 nm, 286 nm, 362 nm, as well as a weak maximum of 424 nm. Rice flour has the strongest excitement, and buckwheat flour has the least. For chickpea flour, strong absorption occurs in the short-wavelength (260–290 nm) and long-wavelength (420 nm or more) regions. The other types of flour studied have approximately similar characteristics. The integral parameters H in the entire studied range of 220–500 nm are determined with an error of up to 10.9 % (for oat flour) and differ by 4.3 times for all the studied types of flour. However, for the design of machine vision systems, it is advisable to identify flour types by integral parameters in the narrower areas of λ_1 - λ_2 and by their ratios. Based on the selected features, classification models were built that showed accuracy of up to 88.9 % during testing, while problematic pairs of classes such as pea and buckwheat flour were identified.

Conclusion: The integral and statistical parameters of the spectra have a high separation ability. The ratio $H_{220-500}/H_{470-500}$ (85.3 %), kurtosis (84.8 %) and mathematical expectation (84.6 %) are the most complex estimates, which are recommended to be used as the basis for constructing classification algorithms. Practical testing on machine learning models has confirmed the possibility of automatic identification of flour types with accuracy that meets the requirements of industrial control.

KEYWORDS

flour; absorption spectrum; automatic classification; estimation of the difference level; informative identification parameters

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из муки традиционно занимают важное место в ежедневном рационе человека, что обуславливает необходимость достоверной информации об их составе и качестве исходных компонентов. Для обеспечения контроля качества, подлинности и безопасности продуктов хлебопечения (представленных на продовольственном рынке и вновь создаваемых) требуется система комплексной оценки качества муки. Для оптимизации технологических и пищевых свойств хлеба используют различного рода обогащающие добавки и улучшители. Такими добавками являются: сорговая мука (Никонорова и соавт., 2021; Серебренникова & Анисимова, 2022), гречневая мука (Вершинина и соавт., 2019; Мирошина & Резниченко, 2025), овсяная мука (Шаболкина и соавт., 2021), рисовая мука (Кунашева & Кодзокова, 2018), мука люпина (Рукшан & Новожилова, 2023), мука из масличных культур (Донская и соавт., 2024), смеси овощных порошков из тыквы, моркови и кабачка (Березина и соавт., 2019).

Для исследования параметров муки используют методы высокоэффективной жидкостной хроматографии, газовой хроматографии, капиллярного электрофореза, амперометрический анализ (Донская и соавт., 2024). Среди оптических методов широкое распространение получили отражательная спектроскопия в ближней инфракрасной области, рамановская и флуоресцентная спектроскопия (Nagel-Held et al., 2022). Также разработан метод измерения содержания влаги в муке с помощью газовой абсорбционной спектроскопии в рассеивающей среде (Guo et al., 2024).

Применяется метод колориметрии (Черных и соавт., 2017; Jenfa et al., 2024), в том числе с использованием анализа цифрового изображения (Штейнберг & Морозова, 2021; Лебедев и соавт., 2019). В работе Почичкой (2022) предложено проводить оценку цветовых характеристик продуктов питания в системе координат RGB (красный–зеленый–голубой), позволяющих прогнозировать цвет получаемого готового изделия для создания новых продуктов с заданными цветовыми и вкусовыми характеристиками. Были установлены закономерности изменения цвета муки и зерна в зависимости от зольности и силы муки изучаемых сортов (Крадецкая и соавт., 2022). Для быстрого обнару-

жения и количественной оценки черных точек, образующихся из-за мучнистых зерен в образцах пшеничной муки, использовался планшетный сканер, с помощью которого были определены параметры цвета муки (Vrabec et al., 2024). Однако реализация требует сложной установки с эталонным освещением и обработкой изображений.

Гиперспектральная визуализация в ближнем инфракрасном диапазоне (865–1711 нм) в сочетании с многомерным анализом была использована для обнаружения примесей и определения подлинности муки грубого помола, в том числе из проса, кукурузы и сои (Shao et al., 2019). В зерноперерабатывающей отрасли компьютерный анализ изображений используется для определения стекловидности зерна пшеницы и гранулометрического состава пшеничной муки (Кладов и соавт., 2022). Данные методы использовали для обнаружения клещей в муке (He et al., 2020), прогнозирования содержания картофельной муки в смеси картофельной и пшеничной муки (Yeu et al., 2023). Методы визуализации также требуют построения высококачественного изображения и применения сложных алгоритмов обработки.

Спектроскопия лазерно-индуцированного пробоя (LIBS) в сочетании с хемометрией используется для классификации образцов муки (Rai et al., 2025). С помощью этого подхода методом дискриминантного анализа частичных наименьших квадратов определяют соотношение сорго и кукурузной муки в смеси. Лазерно-индуцированная спектроскопия позволяет успешно идентифицировать образцы как чистую кукурузу, чистое сорго или смесь кукурузы и сорго (Akin et al., 2021). Существенными недостатками данного метода являются высокая стоимость установки, разрушаемость и отсутствия опыта применения LIBS в этом секторе.

Другими оптическими методами анализа мучных смесей являются инфракрасная Фурье-спектроскопия (Жазыкбаева, 2022; Pompeu et al., 2021) и фотоакустика (Hernández-Aguilar et al., 2019).

Ограничениями вышеописанных методов идентификации муки являются их разрушаемость, необходимость химических реактивов, сравнительно высокая стоимость оборудования и требование к привлечению высококвалифицированного пер-

сонала. Оптические методы, в частности, требуют построения четких изображений. Получение люминесцентного сигнала не требует построения изображений и может быть сравнительно просто реализовано в системах автоматического контроля качества с использованием систем машинного зрения. Таким образом, на основе фотолюминесцентной спектроскопии возможно разработать неразрушающий, экспрессный, объективный и сравнительно недорогой метод, в котором могут быть применены алгоритмы машинного обучения для классификации состава смесей.

Целью данного исследования является изучение оптических фотолюминесцентных свойств различных видов муки для разработки методов автоматической идентификации состава смесей в процессах хранения и производства хлебобулочных изделий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для спектральных измерений использовались образцы муки из пшеницы, ржи, овса, риса, гороха, гречки и нута стандартной влажности (не более 15%). Средний диаметр измельченных частиц составлял не более 150 мкм.

Оборудование

На автоматизированном дифракционном спектрофлуориметре СМ-2203 (Солар, Белоруссия) проводили оптические спектральные измерения полученных образцов муки в расширенном спектральном диапазоне 200–500 нм.

Инструменты

Все спектры были скорректированы на инструментальные искажения с помощью встроенных программных пакетов. Математическая обработка выполнялась в Microsoft Excel, Origin 8 Pro.

Методы

Образцы (50–100 г) с помощью лабораторного измельчителя измельчили до состояния однородного порошка и просеяли через сито с ячейками 150 мкм. В расширенном спектральном диапазоне 200–500 нм измерили спектры возбуждения (поглощения) $\eta(\lambda)$ при синхронном сканировании монохроматоров возбуждения и регистрации. Спектральный сдвиг данных монохроматоров составил 80 нм, шаг сканирования — 1 нм. Чувствительность приемника излучения — высокая. Повторность измерений — десятикратная. Первичная обработка спектров осуществлялась с использованием фирменного программного обеспечения компании Solar.

Анализ данных

Для полученных спектров вычисляли интегральные параметры: интегральные поглощательные способности $H_{\lambda_1-\lambda_2}$ в спектральных диапазонах $\lambda_1-\lambda_2$ и статистические характеристики, такие как математическое ожидание M_λ , дисперсия σ^2 , асимметрия As и эксцесс Ex по методике, представленной в работе Белякова (2024).

Интегральная поглощательная способность $H_{\lambda_1-\lambda_2}$, определяется по формуле

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\eta(\lambda)$ — спектральная характеристика возбуждения (поглощения);

$\lambda_1-\lambda_2$ — границы спектрального диапазона.

Математическое ожидание M_λ для непрерывного спектрального распределения определяется интегрированием по плотности распределения

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \eta(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где λ_1, λ_2 — наименьшее и наибольшее значение длин волн спектра возбуждения (поглощения).

Дисперсия σ^2 как статистический показатель, который характеризует разброс значений в выборке или совокупности, находится по формуле

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^2 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статический момент 3-го порядка μ_3

$$\mu_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Более распространенным параметром оценки асимметричности спектрального распределения является асимметрия As , определяемая из соотношения

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (5)$$

Асимметрия может быть правосторонней ($As > 0$) либо левосторонней ($As < 0$).

Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статического момента 4-го порядка μ_4

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Для анализа крутизны используют эксцесс E_λ

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (7)$$

Относительные погрешности ε определения параметров спектров при многократных измерениях ($n = 10$) вычисляли по общепринятым формулам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты спектральных измерений

Для разработки метода автоматической идентификации видов муки были измерены спектральные характеристики поглощения при синхронном сканировании. Спектры синхронного поглощения различных видов муки представлены на Рисунке 1.

Результаты расчета интегральных и статистических параметров муки

Рассчитанные по формулам (1)–(7) интегральные параметры и их соотношения для различных видов муки в различных спектральных областях $\lambda_1 - \lambda_2$ представлены в Таблицах 1 и 2.

Статистические параметры различных видов муки представлены в Таблице 3.

Рисунок 1

Спектры синхронного поглощения различных видов муки

Figure 1

Synchronous Absorption Spectra of Various Types of Flour

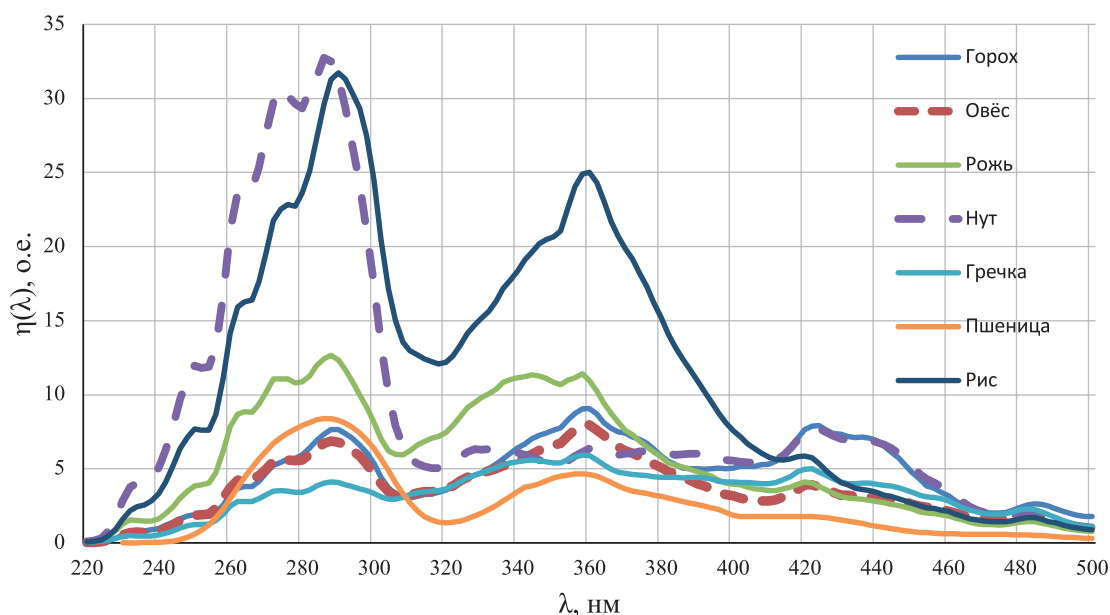


Таблица 1Интегральные параметры различных видов муки в спектральных областях λ_1 – λ_2 **Table 1**Integral Parameters of Various Types of Flour in the Spectral Ranges λ_1 – λ_2

Вид муки	H ± ΔH, о. е., для диапазона, нм				
	220–500	250–310	320–380	410–470	470–500
Гороховая	1055 ± 80	309 ± 31	336 ± 42	216 ± 15	43 ± 4
Овсяная	827 ± 90	285 ± 43	289 ± 32	106 ± 8	28 ± 1
Ржаная	1345 ± 94	543 ± 68	489 ± 40	103 ± 9	22 ± 2
Нутовая	2286 ± 88	1410 ± 77	309 ± 31	229 ± 19	35 ± 2
Гречневая	726 ± 64	175 ± 25	252 ± 24	144 ± 17	36 ± 4
Пшеничная	731 ± 56	359 ± 35	265 ± 21	73 ± 4	21 ± 1
Рисовая	3116 ± 61	1239 ± 63	1150 ± 24	218 ± 7	42 ± 1

Таблица 2

Соотношения интегральных параметров различных видов муки в спектральных областях

Table 2

Ratios of Integral Parameters of Different Types of Flour in Spectral Regions

Вид муки	$\frac{H_{220-500}}{H_{250-310}}$	$\frac{H_{220-500}}{H_{320-380}}$	$\frac{H_{220-500}}{H_{410-470}}$	$\frac{H_{220-500}}{H_{470-500}}$	$\frac{H_{250-310}}{H_{320-380}}$	$\frac{H_{320-380}}{H_{410-470}}$	$\frac{H_{410-470}}{H_{470-500}}$
Гороховая	3,41 ± 0,61	3,14 ± 0,64	4,88 ± 0,71	24,5 ± 4,2	0,92 ± 0,21	1,56 ± 0,30	5,02 ± 0,82
Овсяная	2,90 ± 0,77	2,86 ± 0,64	7,80 ± 1,45	29,5 ± 4,3	0,99 ± 0,26	2,73 ± 0,51	3,79 ± 0,42
Ржаная	2,48 ± 0,49	2,75 ± 0,42	13,06 ± 2,07	61,1 ± 9,9	1,11 ± 0,23	4,75 ± 0,81	4,68 ± 0,84
Нутовая	1,62 ± 0,15	7,40 ± 1,04	9,98 ± 1,22	65,3 ± 6,3	4,56 ± 0,71	1,35 ± 0,25	6,54 ± 0,92
Гречневая	4,15 ± 0,98	2,88 ± 0,53	5,04 ± 1,05	20,2 ± 4,1	0,69 ± 0,17	1,75 ± 0,38	4,00 ± 0,93
Пшеничная	2,04 ± 0,36	2,76 ± 0,43	10,01 ± 1,32	34,8 ± 4,3	1,35 ± 0,24	3,63 ± 0,49	3,48 ± 0,36
Рисовая	2,51 ± 0,18	2,71 ± 0,11	14,29 ± 0,74	74,2 ± 3,2	1,08 ± 0,08	5,28 ± 0,28	5,19 ± 0,29

Таблица 3

Статистические параметры различных видов муки

Table 3

Statistical Parameters of Different Types of Flour

Вид муки	M_λ , нм	σ^2	As	Ex
Гороховая	373 ± 10	3723 ± 127	-0,061 ± 0,015	-0,785 ± 0,026
Овсяная	360 ± 8	3693 ± 110	0,220 ± 0,039	-0,659 ± 0,096
Ржаная	340 ± 7	3254 ± 60	0,499 ± 0,101	-0,256 ± 0,051
Нутовая	324 ± 6	4360 ± 187	0,818 ± 0,129	-0,514 ± 0,103
Гречневая	371 ± 7	4109 ± 271	-0,050 ± 0,012	-0,826 ± 0,097
Пшеничная	338 ± 5	3983 ± 131	0,934 ± 0,098	-0,320 ± 0,058
Рисовая	332 ± 2	2861 ± 22	0,519 ± 0,032	-0,211 ± 0,023

Анализ признаков с наибольшей разделяющей способностью

В контексте комплексной оценки пригодности спектральных параметров для автоматической классификации была разработана методика, учитывающая абсолютные погрешности измерений и степень перекрытия признаков между различными видами муки.

Расчет Z -оценки для каждого признака:

$$z_{ij} = \frac{|x_{ij} - \mu_j|}{\sigma_{\text{призн}_j}}, \quad (8)$$

где x_{ij} — значение j -го признака для i -го вида муки; μ_j — среднее значение j -го признака по всем видам муки;

$\sigma_{\text{призн}_j}$ — стандартное отклонение j -го признака по всем видам муки.

Экспоненциальное преобразование Z -оценки в вероятность уникальности:

$$P_{ij} = \frac{(1 - e^{-z_{ij}})}{\max(1 - e^{-z_{ij}})} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

Формула для расчета погрешности вероятности уникальности с использованием метода распространения погрешностей:

$$\Delta P_{ij} = e^{-z_{ij}} \cdot \frac{\Delta x_{ij}}{\sigma_{\text{призн}_j}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где Δx_{ij} — абсолютная погрешность измерения j -го признака для i -го вида муки;

$\sigma_{\text{призн}_j}$ — стандартное отклонение j -го признака по всем видам муки.

Для предотвращения необоснованно высоких значений погрешностей, которые могут возникать при очень малых значениях стандартного отклонения $\sigma_{\text{призн}_j}$, значения погрешностей ограничиваются сверху величиной 20%.

Параметр $\sigma_{\text{призн}_j}$, используемый в формулах (8) и (10), представляет собой стандартное отклонение значений j -го признака по различным видам муки, его не следует путать с параметром σ^2 из Таблицы 3, который характеризует дисперсию спектрального распределения для отдельных видов муки.

Для каждой пары видов муки (i, k) и каждого признака j рассчитывается степень перекрытия интервалов

$$O_{ikj} = \frac{\max[0, \min(x_{ij} + \Delta x_{ij}, x_{kj} + \Delta x_{kj}) - \max(x_{ij} - \Delta x_{ij}, x_{kj} - \Delta x_{kj})]}{R_{ikj}} \times 100 \%, \quad (11)$$

где $R_{ikj} = \max(x_{ij} + \Delta x_{ij}, x_{kj} + \Delta x_{kj}) - \min(x_{ij} - \Delta x_{ij}, x_{kj} - \Delta x_{kj})$ — полный диапазон, охватывающий оба интервала значений с учетом погрешностей;

x_{ij}, x_{kj} — значения признака j для видов муки i и k ; $\Delta x_{ij}, \Delta x_{kj}$ — абсолютные погрешности измерения признака j для видов муки A и B .

Тогда разделяющая способность (средний процент отсутствия перекрытия по всем парам видов муки) равняется

$$S_j = \frac{1}{N_{\text{пар}}} \sum_{ik} (1 - O_{ikj}) \cdot 100 \%, \quad (12)$$

где $N_{\text{пар}}$ — количество всех возможных пар видов муки (для 7 видов муки $N_{\text{пар}} = 21$).

В результате комплексная оценка признака имеет следующий вид

$$C_j = \frac{U_j + S_j}{2}, \quad (13)$$

где $U_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ij}$ — средняя уникальность признака j ($N = 7$ — количество видов муки).

Уровень отличия для видов муки рассчитывается следующим образом:

$$D_i = \frac{1}{N_{\text{призн}} \cdot (N_{\text{видов}} - 1)} \times \sum_{j=1}^{N_{\text{призн}}} \sum_{k=1, k \neq i}^{N_{\text{видов}}} (1 - O_{ikj}) \cdot 100 \%, \quad (14)$$

где i — текущий вид муки;

$N_{\text{призн}} = 11$ — количество признаков;

$N_{\text{видов}} = 7$ — количество видов муки;

O_{ikj} — перекрытие признака между видом i и видом k (который не равен виду i).

Тогда комплексная оценка вида муки будет рассчитываться по формуле

$$C_i = \frac{U_i + D_i}{2}, \tag{15}$$

где $U_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_{ij}$ — средняя уникальность вида муки i ($N = 7$ — количество видов муки).

Среднее перекрытие для пар видов муки (i, k) равен следующему

$$O_{ik}^{Avg} = \frac{1}{N_{\text{призн}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{призн}}} O_{ikj}. \tag{16}$$

Среднее разделение для пар видов муки (i, k) рассчитывается по формуле

$$S_{ik}^{Avg} = 100\% - O_{ik}^{Avg}. \tag{17}$$

Количество признаков с хорошим разделением равняется

$$N_{good_{ik}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{призн}}} I(O_{ikj} < 20\%), \tag{18}$$

где I — индикаторная функция (равна 1, если условие выполняется).

В Таблицах 4 и 5 приведены критерии классификации сложности разделения видов муки.

Для объективной интерпретации данных Таблицы 5 и отнесения каждого вида муки к определенному классу сложности были введены критерии, основанные на двух ключевых метриках: средней уникальности вида (U_i) и уровне его отличия от других видов (D_i). Пороговые значения для критериев установлены эмпирически на основе анализа распределения полученных данных и направлены на обеспечение устойчивой классификации:

- (1) «Легко классифицируемый»: $U_i \geq 55\%$ и $D_i \geq 70\%$. Виды с высокой внутренней стабильностью признаков и одновременно высокой степенью отличия от всех других видов.
- (2) «Средне классифицируемый»: $U_i \geq 48\%$ и $D_i \geq 50\%$. Виды с удовлетворительной стабильностью, но со средним или пониженным уровнем отличия, что указывает на частичное перекрытие признаков с некоторыми другими видами.
- (3) «Сложно классифицируемый»: $U_i < 55\%$ или $D_i < 70\%$. К этому классу относятся виды, спектральные признаки которых либо обладают высокой вариабельностью (низкая уникальность), либо сильно перекрываются с признаками других видов (низкий уровень отличия), что существенно затрудняет их надежную автоматическую идентификацию.

Таблица 4

Рейтинг уникальности признаков с учетом разделяющей способности

Table 4

A Rating of the Uniqueness of Features, Taking Into Account the Separating Ability

Место	Признак	$U_j, \%$	$S_j, \%$	$C_j, \%$
1	$H_{220-500}/H_{470-500}$	$77,5 \pm 10,3$	93,2	85,3
2	Ex	$74,4 \pm 10,8$	95,2	84,8
3	M_λ	$78,1 \pm 13,4$	91,1	84,6
4	As	$70,5 \pm 7,6$	94,9	82,7
5	$H_{320-380}/H_{410-470}$	$70,4 \pm 12,1$	91,9	81,1
6	$H_{220-500}/H_{410-470}$	$67,0 \pm 14,2$	89,3	78,1
7	σ^2	$55,9 \pm 13,0$	92,5	74,2
8	$H_{220-500}/H_{250-310}$	$59,2 \pm 17,3$	86,7	73,0
9	$H_{410-470}/H_{470-500}$	$56,6 \pm 17,1$	82,9	69,8
10	$H_{250-310}/H_{320-380}$	$44,7 \pm 10,0$	82,3	63,5
11	$H_{220-500}/H_{320-380}$	$45,4 \pm 14,7$	62,1	53,8

Таблица 5

Уникальность видов муки с оценкой уровня отличия

Table 5

The Uniqueness of the Types of Flour with an Assessment of the Level of Difference

Место	Вид муки	$U_j, \%$	$D_j, \%$	$C_j, \%$	Класс сложности
1	Нутовая	78,4 ± 10,5	81,8	80,1	Легко классифицируемый
2	Рисовая	69,5 ± 6,4	66,7	68,1	Средне классифицируемый
3	Гречневая	78,3 ± 12,3	60,6	69,5	Средне классифицируемый
4	Пшеничная	55,5 ± 15,0	60,6	58,0	Средне классифицируемый
5	Ржаная	54,1 ± 16,2	57,6	55,8	Средне классифицируемый
6	Гороховая	65,0 ± 11,8	56,1	60,5	Средне классифицируемый
7	Овсяная	44,4 ± 17,0	56,1	50,2	Сложно классифицируемый

По Таблице 4 можно сделать вывод, что наибольшей комплексной оценкой обладают признаки $N_{220-500}/N_{470-500}$ (85,3%), E_x (84,8%) и M_λ (84,6%), что делает их наиболее перспективными для использования в алгоритмах классификации. Статистические параметры E_x , M_λ и A_s демонстрируют высокую разделяющую способность (>90%), что указывает на их устойчивость к перекрытию из-за погрешностей измерений. Наименее информативным признаком является $N_{220-500}/N_{320-380}$ с комплексной оценкой 53,8%.

Анализ данных, представленных в Таблице 5, позволяет выявить существенные различия в степени пригодности отдельных видов муки для автоматической классификации на основе спектральных характеристик. Наиболее благоприятные условия для автоматической идентификации наблюдаются для нутовой муки, которая является единственным представителем категории «легко классифицируемых» образцов. Высокое значение её комплексной оценки ($C_j = 80,1\%$) обусловлено сочетанием значительных показателей уникальности (78,4%) и уровня отличия (81,8%). Такое соотношение параметров свидетельствует о стабильности и отчетливой выраженности спектральных признаков, что обеспечивает их надежную дифференциацию в процессе автоматической классификации.

В противоположность этому, наибольшие сложности при классификации демонстрирует овсяная мука, отнесенная к категории «сложно классифицируемых» объектов. Несмотря на умеренный уровень отличия (56,1%), показатель уникальности для данного вида является сравнительно низким

(44,4%). Подобная комбинация параметров указывает на значительную вариабельность спектральных характеристик внутри исследуемой группы, что снижает степень их воспроизводимости и, как следствие, затрудняет процедуру автоматической идентификации.

Для подтверждения практической значимости выделенных спектральных параметров проведена серия экспериментов по автоматическому распознаванию видов муки. Исходные экспериментальные данные (Таблицы 2, 3) стали основой для формирования расширенной выборки, учитывающей типичные производственные вариации: межпартийные колебания ($\pm 15\%$), изменение условий хранения ($\pm 10\%$), вариабельность влажности ($\pm 8\%$) и степени помола ($\pm 7\%$). В результате сгенерирован массив из 210 синтетических образцов, соответствующих трем технологическим партиям каждого вида муки. В классификации задействованы шесть наиболее значимых признаков согласно Таблице 4. Проведено сравнение четырех алгоритмов: случайный лес, метод опорных векторов с радиально-базисным (RBF) и линейным ядрами, а также k -ближайших соседей ($k = 5$).

Для оценки данные предварительно разделили на две выборки: обучающую (70%) и тестовую (30%), обеспечив сохранение баланса классов. На обучающей выборке выполнялась пятикратная кросс-валидация. Итоговая оценка выполнялась на тестовой выборке с расчетом метрик accuracy, precision, recall и F1-score. Результаты (Таблица 6) показали, что все модели обеспечивают точность на тестовой выборке от 84,1% до 88,9%. Макси-

Таблица 6

Результаты классификации видов муки

Table 6

The Results of the Classification of Flour Types

Модель	Точность (кросс-валидация), %	Точность (тест), %	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
Случайный лес	83,6 ± 9,2	85,5	85,8	85,5	85,6
SVM (RBF ядро)	80,2 ± 7,1	85,5	85,8	85,5	85,6
k-NN (k = 5)	85,0 ± 4,6	84,1	85,4	84,1	83,9
SVM (линейное ядро)	84,9 ± 9,9	88,9	89,5	88,9	88,8

Таблица 7

Матрица ошибок модели Random Forest

Table 7

The Error Matrix of the Random Forest Model

Истинный \ Предсказанный	Горох	Гречка	Нут	Овес	Пшеница	Рожь	Рис	Всего образцов
Горох	8	1	0	0	0	0	0	9
Гречка	2	7	0	0	0	0	0	9
Нут	0	0	9	0	0	0	0	9
Овес	0	0	0	9	0	0	0	9
Пшеница	0	0	0	0	9	0	0	9
Рожь	0	0	0	0	0	8	1	9
Рис	0	0	0	0	0	1	8	9
Всего предсказаний	10	8	9	9	9	9	9	63

мальные показатели (accuracy = 88,9%, F1-score = 88,8%) достигнуты методом опорных векторов с линейным ядром, что свидетельствует о хорошей линейной разделимости классов в пространстве выбранных признаков.

Детальный анализ ошибочных классификаций выполнен по матрице ошибок модели случайного леса (Таблица 7). Общая точность составила 92,1% (58 из 63). Нутовая, овсяная и пшеничная мука были идентифицированы безошибочно. Основные ошибки пришлись на пары «гороховая–гречневая» (3 ошибки) и «ржаная–рисовая» (2 ошибки), что коррелирует с данными Таблицы 5, указывающими на низкую степень различия между этими классами.

Проблемные пары, требующие дополнительных измерений, приведены в Таблице 8.

Таблица 8

Проблемные пары классов

Table 8

Problematic Class Pairs

Истинный класс	Ошибочный прогноз	Число ошибок	Процент ошибок
Гречневая	Гороховая	2	22,2
Гороховая	Гречневая	1	11,1
Ржаная	Рисовая	1	11,1
Рисовая	Ржаная	1	11,1

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность автоматической идентификации видов муки по фотолюминесцентным спектрам с точностью до 89%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают перспективность применения фотолюминесцентной спектроскопии для задач автоматической идентификации видов муки и позволяют уточнить спектральные параметры, обладающие наибольшей разделяющей способностью. Анализ спектров синхронного поглощения показал, что для всех исследованных образцов характерно наличие максимумов в области 272–290 нм, а также выраженного сигнала в области около 362 нм и слабого максимума вблизи 424 нм. Эти особенности спектрального отклика отражают совокупное влияние органических компонентов муки и согласуются с ранее полученными данными о применимости оптических методов спектроскопии для анализа пищевых продуктов. В частности, использование спектральных характеристик различных диапазонов излучения рассматривается как эффективный инструмент оценки качества зернового сырья и продуктов его переработки (Nagel-Held et al., 2022).

Существенным результатом исследования является установление того, что наибольшей информативностью обладают не абсолютные значения интегральных спектральных параметров, а их соотношения и статистические характеристики формы спектра. Наибольшая комплексная оценка разделяющей способности была получена для признака $H_{220-500}/H_{470-500}$, а также для статистических параметров распределения — эксцесса и математического ожидания. Данные признаки характеризуют структуру спектрального распределения и позволяют более устойчиво различать виды муки даже при наличии погрешностей измерения. Подобный подход соответствует современным тенденциям применения хемометрических методов, при которых для классификации образцов используются производные параметры спектральных кривых, а не только исходные спектральные интенсивности. Например, аналогичные методы многомерного анализа применяются при использовании гиперспектральной визуализации и спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона для выявления примесей и определения подлинности муки (Shao et al., 2019; Pompeu et al., 2021).

Разработанная в работе методика комплексной оценки признаков позволила определить их относительную информативность и выявить раз-

личия в степени пригодности отдельных видов муки для автоматической классификации. Наиболее благоприятные условия для автоматической идентификации установлены для нутовой муки, для которой наблюдается одновременно высокая уникальность признаков и значительный уровень отличия от остальных видов. Это свидетельствует о стабильности спектральных характеристик данного продукта и его хорошей дифференцируемости в спектральном пространстве. В то же время овсяная мука продемонстрировала наименьшую уникальность признаков, что может быть связано с более высокой вариабельностью химического состава и технологических характеристик зерна овса. Известно, что биохимические свойства зерна овса и продуктов его переработки могут значительно изменяться в зависимости от сорта, условий выращивания и технологических параметров переработки (Шаболкина и соавт., 2021).

Дополнительное подтверждение полученных результатов дает анализ эффективности алгоритмов машинного обучения. Использование нескольких моделей классификации показало, что точность автоматической идентификации достигает 88,9%, причем наилучшие результаты получены при применении метода опорных векторов с линейным ядром. Высокая эффективность линейной модели указывает на относительно хорошую линейную разделимость классов в пространстве выбранных признаков. Анализ матрицы ошибок показал, что основная часть ошибок возникает при различении пар «гороховая–гречневая» и «ржаная–рисовая» мука. Это согласуется с результатами спектрального анализа, которые демонстрируют близость ряда интегральных параметров для этих видов муки. Подобные трудности классификации характерны и для других методов спектрального анализа. Так, при использовании гиперспектральной визуализации также отмечается перекрытие признаков между близкими по составу образцами зернового сырья, что требует применения дополнительных алгоритмов обработки данных (Shao et al., 2019).

Следует отметить, что предложенный в работе подход имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными методами контроля качества муки. Многие существующие методы анализа, включая хроматографические и химические методы, требуют использования реактивов и сложного лабо-

раторного оборудования (Донская и соавт., 2024). Методы визуализации и компьютерного анализа изображений также предъявляют высокие требования к условиям освещения и качеству изображения (Штейнберг & Морозова, 2021; Vrabec et al., 2024). В отличие от них фотолюминесцентная спектроскопия может быть реализована в системах автоматического контроля без необходимости получения высококачественного изображения и без разрушения образца. Кроме того, она потенциально может быть интегрирована в системы машинного зрения, используемые в пищевой промышленности для автоматизированного мониторинга сырья и продуктов переработки.

В то же время необходимо отметить и ограничения проведенного исследования. Экспериментальная база включала ограниченное число образцов, что может не полностью отражать естественную вариабельность сырья, обусловленную различиями сортов зерна, условиями выращивания и технологическими параметрами переработки. Кроме того, в работе рассматривались преимущественно чистые виды муки, тогда как в реальных условиях производства часто используются сложные смеси различных компонентов. В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение базы экспериментальных данных, изучение спектральных характеристик многокомпонентных смесей и разработку специализированных алгоритмов для повышения точности классификации близких по свойствам образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были изучены фотолюминесцентные спектральные характеристики семи видов муки в диапазоне 200–500 нм и разработана методика комплексной оценки информативности спектральных параметров

для задач автоматической классификации. Показано, что интегральные и статистические характеристики спектров обладают высокой разделяющей способностью и могут использоваться в качестве признаков для построения алгоритмов автоматической идентификации.

Установлено, что наибольшей информативностью обладают параметры, основанные на соотношениях интегральных поглощательных способностей и статистических характеристиках спектрального распределения. Наиболее высокую комплексную оценку показали признаки $H_{220-500}/H_{470-500}$, эксцесс спектрального распределения и математическое ожидание, что позволяет рассматривать их в качестве базовых параметров для построения алгоритмов классификации.

Практическая проверка предложенного подхода с использованием методов машинного обучения показала возможность автоматической идентификации видов муки с точностью до 88,9%. Наиболее высокую эффективность продемонстрировал метод опорных векторов с линейным ядром, что свидетельствует о достаточной разделимости классов в пространстве выбранных признаков. Анализ ошибок классификации позволил выявить проблемные пары видов муки, для которых требуется дополнительная оптимизация алгоритмов и расширение набора спектральных параметров.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения фотолюминесцентной спектроскопии в системах автоматического контроля качества муки и открывают возможности для создания неразрушающих экспресс-методов идентификации состава мучных смесей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение экспериментальной базы, анализ многокомпонентных смесей и интеграцию разработанных методов в автоматизированные системы мониторинга сырья и продуктов переработки зерна.

ЛИТЕРАТУРА

- Березина, Н. А., Хмелева, Е. В., Артемова, Е. Н., Осипова, Г. А., & Шведова, М. Н. (2019). Моделирование поликомпонентной смеси для хлебобулочных изделий. *Ползуновский вестник*, 1, 11–16.
- Вершинина, О. Л., Гончар, В. В., Росляков, Ю. Ф., & Тычина, А. В. (2019). Использование безглютеновой гречневой муки в производстве хлеба из смеси ржаной и пшеничной муки. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 5–6(371–372), 35–38. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.5-6.8>
- Донская, Г. А., Бычкова, Т. С., & Юрова, Е. А. (2024). Исследование радиопротекторного потенциала муки из масличных культур. *Ползуновский вестник*, 4, 86–92. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.013>
- Жазыкбаева, Г. М. (2022). Современный метод контроля качества муки с помощью “ИНФРАНЕО”. *Инновационная техника и технология*, 9(4), 17–21.
- Кладов, Е. А., Есин, С. Б., & Егорова, Е. Ю. (2022). Компьютерная обработка изображений и их интерпретация в анализе гранулометрического состава масличной муки. *Ползуновский вестник*, 4(1), 48–56. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.006>
- Крадецкая, О. О., Чилимова, И. В., Дашкевич, С. М., Утебаев, М. О., & Каиржанов, Е. К. (2022). Взаимосвязь цветовых различий муки и зерна с зольностью и силой муки различных сортов мягкой пшеницы. *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*, 2-1(113), 24–34. [https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2\(113\).951](https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2(113).951)
- Кунашева, Ж. М., & Кодзокова, М. Х. (2018). Применение дробленой муки из риса в пищевых технологиях. *Новые технологии*, 4, 62–67.
- Лебедев, Д. В., Рожков, Е. А., Леонов, В. А., & Мальнев, И. Д. (2019). Применение электротехнологических оптико-электронных способов в хлебопекарном производстве для определения качества пшеничной муки и концентрации мучной пыли в воздухе. *АгроЭкоИнфо*, 4(38), 35.
- Мирошина, Т. А., & Резниченко, И. Ю. (2025). Потенциал гречневой муки в производстве безглютеновых хлебобулочных, макаронных и кондитерских изделий. *Вестник КрасГАУ*, 8(221), 204–216. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-8-204-216>
- Никонорова, Ю. Ю., Волкова, А. В., & Макушин, А. Н. (2021). Исследование реологических свойств теста и хлеба из смеси муки пшеничной высшего сорта и сорговой муки. *Вестник КрасГАУ*, 4(169), 155–160. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-155-160>
- Почицкая, И. М. (2022). Научно-практические основы разработки системы комплексной оценки качества пищевых продуктов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет.
- Рукшан, Л. В., & Новожилова, Е. С. (2023). Исследование технологических свойств муки, полученной из обработанных разными способами семян люпина. *Пищевая промышленность*, 6, 30–32. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.009>
- Серебренникова, Е. С., & Анисимова, Л. В. (2022). Качество муки из зерна сорго и реологические свойства теста из смеси пшеничной и сорговой муки. *Ползуновский вестник*, 3, 71–80. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.010>
- Черных, В. Я., Сарбашев, К. А., Шуленин, А. В., & Жирнова, Е. В. (2017). Определение цветовых характеристик пшеничной муки при производстве хлебобулочных и макаронных изделий. *Хлебпродукты*, 2, 44–47.
- Шаболкина, Е. Н., Шевченко, С. Н., & Анисимкина, Н. В. (2021). Результаты изучения биохимических свойств зерна овса голозерного и физических свойств теста смесей с пшеничной мукой. *Зерновое хозяйство России*, 4(76), 61–65. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-76-4-61-65>
- Штейнберг, Т. С., & Морозова, О. В. (2021). Оценка метрологических характеристик сканирующего анализатора муки при определении оптических свойств

- компонентов методом анализа цифрового изображения. *Хлебопродукты*, 7, 36–38. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2021-30-7-36-38>
- Akın, P.A., Sezer, B., Bean, S.R., Peiris, K., Tilley, M., Apaydın, H. & Boyacı, İ.H. (2021). Analysis of corn and sorghum flour mixtures using laser-induced breakdown spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 1076–1084. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10717>
- Brabec, D., Grothe, S., Perez-Fajardo, M., Pordesimo, L., & Yeater, K. (2024). Potential of a flatbed scanner for evaluation of flour samples for dark specks and flour color. *Cereal Chemistry*, 101, 508–517. <https://doi.org/10.1002/cche.10758>
- Guo, X., Meng, X., Li, L., Qiu, X., Li, C., Guo, G., Sun, X., Gong, T., & Tian, Y. (2024). A moisture detection sensor for flour based on the gas in scattering media absorption spectroscopy. *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34011. doi:10.1002/mop.34011
- He, P., Wu, Y., Wang, J., Ren, Y., Ahmad, W., Liu, R., Ouyang, Q., Jiang, H., & Chen, Q. (2020). Detection of mites *Tyrophagus putrescentiae* and *Cheyletus eruditus* in flour using hyperspectral imaging system coupled with chemometrics. *Journal of Food Process Engineering*, 43, e13386. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13386>
- Hernández-Aguilar, C., Domínguez-Pacheco, A., Cruz-Orea, A., & Ivanov, R. (2019). Photoacoustic spectroscopy in the optical characterization of foodstuff: A review. *Journal of Spectroscopy*, 5920948. <https://doi.org/10.1155/2019/5920948>
- Jenfa, M.D., Adelusi, O.A., Aderinoye, A., Coker, O.J., Martins, I.E., & Obadina, O.A. (2024). Physicochemical compositions, nutritional and functional properties, and color qualities of sorghum–orange-fleshed sweet potato composite flour. *Food Science & Nutrition*, 12, 2364–2378. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3922>
- Nagel-Held, J., Kaiser, L., Longin, C. F. H., & Hitzmann, B. (2022). Prediction of wheat quality parameters combining Raman, fluorescence, and near-infrared spectroscopy (NIRS). *Cereal Chemistry*, 99, 830–842. <https://doi.org/10.1002/cche.10540>
- Pompeu, D.R., Souza, J.N.S. & Pena, R.S. (2021), Fast and non-destructive determination of simultaneous physicochemical parameters of *Manihot esculenta* flour using FT-NIR spectroscopy and multivariate analysis. *International Journal of Food Science & Technology*, 56, 3826–3833. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14998>
- Rai, D., Rai, A.K., Rai, A.K., Singh D. B., & Yadav A. K. (2025). LIBS—a promising technique for control of food quality. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02436-2>
- Shao, Y., Xuan, G., Hu, Z., & Wang, Y. (2019). Detection of adulterants and authenticity discrimination for coarse grain flours using NIR hyperspectral imaging. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13265. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13265>
- Yue, M., Zhang, S., Zhang, J., Wang, S., Yu, X., Li, H., Yin, X. & Ma, C. (2023). Potato flour content determination of potato–wheat flour mixture based on hyperspectral imaging. *International Journal of Food Science & Technology*, 58, 4780–4789. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16587>

REFERENCE

- Berezina, N. A., Khmeleva, E. V., Artemova, E. N., Osipova, G. A., & Shvedova, M. N. (2019). Modeling of a polycomposite mixture for bakery products. *Polzunovsky Bulletin*, 1, 11–16. (In Russ.).
- Vershinina, O. L., Gonchar, V. V., Roslyakov, Yu. F., & Tychina, A.V. (2019). The use of gluten-free buckwheat flour in the production of bread from a mixture of rye and wheat flour. *News of higher educational institutions. Food Technology*, 5-6(371-372), 35–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.5-6.8>
- Donskaya, G. A., Bychkova, T. S., & Yurova, E. A. (2024). Investigation of the radioprotective potential of flour from oilseeds. *Polzunovsky Bulletin*, 4, 86–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.013>
- Zhazykbaeva, G. M. (2022). A modern method of flour quality control using INFRANEO. *Innovative Engineering and Technology*, 9(4), 17–21. (In Russ.).

- Kladov, E. A., Yesin, S. B., & Egorova, E. Y. (2022). Computer image processing and their interpretation in the analysis of the granulometric composition of oilseed flour. *Polzunovsky Bulletin*, 4(1), 48–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.006>.
- Kradetskaya, O. O., Chilimova, I. V., Dashkevich, S. M., Utebaev, M.O., & Kairzhanov, E.K. (2022). The relationship of the color differences of flour and grain with the ash content and strength of flour of various varieties of soft wheat. *Bulletin of Science of the Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin*, 2-1(113), 24–34. (In Russ.) [https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2\(113\).951](https://doi.org/10.51452/kazatu.2022.2(113).951).
- Kunasheva, J. M., & Kodzokova, M. H. (2018). The use of crushed rice flour in food technology. *New Technologies*, 4, 62–67. (In Russ.).
- Lebedev, D. V., Rozhkov, E. A., Leonov, V. A., & Malnev, I. D. (2019). The use of electrotechnological optoelectronic methods in bakery production to determine the quality of wheat flour and the concentration of flour dust in the air. *AgroEcoInfo*, 4(38), 35. (In Russ.).
- Miroshina, T. A., & Reznichenko, I. Y. (2025). The potential of buckwheat flour in the production of gluten-free bakery, pasta and confectionery products. *Bulletin of KrasGAU*, 8(221), 204–216. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2025-8-204-216>
- Nikonorova, Yu. Yu., Volkova, A.V., & Makushin, A. N. (2021). Investigation of rheological properties of dough and bread made from a mixture of premium wheat flour and sorghum flour. *Bulletin of KrasGAU*, 4(169), 155–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-155-160>
- Pochitskaya, I. M. (2022). Scientific and practical foundations of the development of a comprehensive food quality assessment system [Unpublished doctoral disserttion]. Krasnodar. (In Russ.).
- Rukshan, L. V., & Novozhilova, E. S. (2023). Investigation of the technological properties of flour obtained from lupine seeds processed in various ways. *Food Industry*, 6, 30–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.6.6.009>
- Serebrennikova, E. S., & Anisimova, L. V. (2022). The quality of sorghum flour and the rheological properties of a dough made from a mixture of wheat and sorghum flour. *Polzunovsky Bulletin*, 3, 71–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.010>
- Chernykh, V. Ya., Sarbashev, K. A., Shulenin, A.V., & Zhirnova, E. V. (2017). Determination of the color characteristics of wheat flour in the production of bakery and pasta products. *Bread Products*, 2, 44–47. (In Russ.).
- Shabolkina, E. N., Shevchenko, S. N., & Anisimkina, N. V. (2021). The results of studying the biochemical properties of bare oat grain and the physical properties of dough mixtures with wheat flour. *Grain Industry of Russia*, 4(76), 61–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-76-4-61-65>
- Steinberg, T. S., & Morozova, O. V. (2021). Evaluation of the metrological characteristics of a scanning flour analyzer in determining the optical properties of components by digital image analysis. *Bread products*, 7, 36–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2021-30-7-36-38>
- Akın, P.A., Sezer, B., Bean, S.R., Peiris, K., Tilley, M., Apaydın, H. & Boyacı, İ.H. (2021). Analysis of corn and sorghum flour mixtures using laser-induced breakdown spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101, 1076–1084. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10717>
- Brabec, D., Grothe, S., Perez-Fajardo, M., Pordesimo, L., & Yeater, K. (2024). Potential of a flatbed scanner for evaluation of flour samples for dark specks and flour color. *Cereal Chemistry*, 101, 508–517. <https://doi.org/10.1002/cche.10758>
- Guo, X., Meng, X., Li, L., Qiu, X., Li, C., Guo, G., Sun, X., Gong, T., & Tian, Y. (2024). A moisture detection sensor for flour based on the gas in scattering media absorption spectroscopy. *Microwave and Optical Technology Letters*, 66, e34011. <https://doi.org/10.1002/mop.34011>
- He, P., Wu, Y., Wang, J., Ren, Y., Ahmad, W., Liu, R., Ouyang, Q., Jiang, H., & Chen, Q. (2020). Detection of mites *Tyrophagus putrescentiae* and *Cheyletus eruditus* in flour using hyperspectral

- imaging system coupled with chemometrics. *Journal of Food Process Engineering*, 43, e13386. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13386>
- Hernández-Aguilar, C., Domínguez-Pacheco, A., Cruz-Orea, A., & Ivanov, R. (2019). Photoacoustic Spectroscopy in the Optical Characterization of Foodstuff: A Review. *Journal of Spectroscopy*, 5920948. <https://doi.org/10.1155/2019/5920948>
- Jenfa, M. D., Adelusi, O. A., Aderinoye, A., Coker, O. J., Martins, I. E., & Obadina, O. A. (2024). Physicochemical compositions, nutritional and functional properties, and color qualities of sorghum–orange-fleshed sweet potato composite flour. *Food Science & Nutrition*, 12, 2364–2378. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3922>
- Nagel-Held, J., Kaiser, L., Longin, C. F. H., & Hitzmann, B. (2022). Prediction of wheat quality parameters combining Raman, fluorescence, and near-infrared spectroscopy (NIRS). *Cereal Chemistry*, 99, 830–842. <https://doi.org/10.1002/cche.10540>
- Pompeu, D.R., Souza, J.N.S. & Pena, R.S. (2021), Fast and non-destructive determination of simultaneous physicochemical parameters of *Manihot esculenta* flour using FT-NIR spectroscopy and multivariate analysis. *International Journal of Food Science & Technology*, 56, 3826–3833. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14998>
- Rai, D., Rai, A.K., Rai, A.K., Singh D. B., & Yadav A. K. (2025). LIBS—a promising technique for control of food quality. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02436-2>
- Shao, Y., Xuan, G., Hu, Z., & Wang, Y. (2019). Detection of adulterants and authenticity discrimination for coarse grain flours using NIR hyperspectral imaging. *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13265. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13265>
- Yue, M., Zhang, S., Zhang, J., Wang, S., Yu, X., Li, H., Yin, X. & Ma, C. (2023). Potato flour content determination of potato–wheat flour mixture based on hyperspectral imaging. *International Journal of Food Science & Technology*, 58, 4780–4789. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16587>

ОБ АВТОРЕ

Михаил Владимирович Беляков, главный научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Scopus ID: 6701456418, Researcher ID: W-2746-2018, SPIN-код: 2864-9937, bmw20100@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Mikhail Vladimirovich Belyakov, Chief Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky passage, 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Scopus ID: 6701456418, Researcher ID: W-2746-2018, SPIN code: 2864-9937, bmw20100@mail.ru

Селекция технологически ценных штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*: применение биохимических методов, MALDI-TOF MS и оценка пробиотических свойств перспективного образца

Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

Е. Р. Вольнова, М. С. Каночкина

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Мария Сергеевна Каночкина
E-mail: kanoch@yandex.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вольнова, Е.Р., & Каночкина, М.С. (2025). Селекция технологически ценных штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*: применение биохимических методов, MALDI-TOF MS и оценка пробиотических свойств перспективного образца. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 55–76. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.679>

ПОСТУПИЛА: 07.06.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Несмотря на широкое использование молочнокислых бактерий в пищевой промышленности, остается недостаточно изученным комплексный характеристический профиль отдельных пробиотических штаммов, включая их идентификацию, биохимические свойства и антагонистическую активность.

Цель: Провести селекцию и комплексно охарактеризовать штамм *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 по морфологическим, физиологическим и биохимическим показателям, а также оценить его пробиотический потенциал и устойчивость к стрессовым факторам с целью выявления перспективных штаммов, обладающих оптимальными технологическими свойствами для производства кисломолочных продуктов.

Материалы и методы: Для идентификации штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 использовали метод MALDI-TOF MS, а функциональные свойства оценивали с помощью биохимических тестов API, посредством оценки ферментативной активности, а также исследований антагонистической активности в отношении патогенных микроорганизмов. Устойчивость к стрессам моделировали *in vitro* в средах, имитирующих желудочно-кишечный тракт.

Результаты: Штамм продемонстрировал высокую жизнеспособность, активность ферментов β-галактозидазы и других ключевых гидролитических ферментов, выраженную антагонистическую активность против *Staphylococcus aureus* ВКПМ № 6646 и *Klebsiella aerogenes* ВКПМ № 13214, а также устойчивость к низкому pH и желчным солям.

Выводы: Результаты исследования подтверждают перспективность использования *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 в производстве пробиотических кисломолочных продуктов с улучшенными функциональными и технологическими характеристиками. Полученные данные могут быть применены для разработки инновационных бактериальных заквасок с высоким уровнем безопасности и эффективности в пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

микроорганизмы; пробиотические культуры; масс-спектрометрия; MALDI-TOF; молочнокислые бактерии; идентификация микроорганизмов; пробиотический потенциал; *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*

The Isolation of Technogenic Strains of *Lactococcus lactis* Subspecies *lactis*: Using Biological Techniques, Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (MALDI-TOF MS) and Assessment of the Probiotic Potential of a Promising Strain

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

Ekaterina R. Volnova, Maria S. Kanochkina

CORRESPONDENCE:

Maria S. Kanochkina

E-mail: kanoch@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Volnova, E.R., & Kanochkina, M.S. (2025). The isolation of technogenic strains of *Lactococcus lactis* subspecies *lactis*: Using biological techniques, Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry (MALDI-TOF MS) and assessment of the probiotic potential of a promising strain. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 55-76. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.679>

RECEIVED: 07.06.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Research into lactic acid bacteria, which are widely used in the food industry, has revealed a lack of information regarding the intricate characteristics of individual probiotic strains, including their identification, elucidation of biochemical properties, and evaluation of antagonistic activity.

Purpose: To isolate and comprehensively characterize *Lactococcus lactis* strain No. 15 in terms of its morphological, physiological, and biochemical properties, as well as to assess its probiotic potential and stress tolerance, in order to identify a novel strain with optimal functional characteristics for application in the production of fermented dairy products.

Materials and Methods: To achieve these goals, we used MALDI-MS to identify the strain, then evaluated its functional characteristics through a series of biochemical tests including API testing, enzyme activity assessment, and antagonist activity against pathogenic microorganisms. We also conducted in vitro modeling of stress resistance under simulated gastrointestinal conditions.

Results: The strain demonstrated remarkable viability and exhibited robust beta-galactosidase and other important hydrolytic enzyme activities. Additionally, it showed a strong antagonistic effect against *Staphylococcus aureus* VKPM No. 6646 and *Klebsiella aerogenes* VKMP No. 13214, as well as resistance to low pH and bile salts.

Conclusion: *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 has potential for use in the production of fermented dairy products with enhanced functional and technological properties. The data collected can serve as a basis for the development of new bacterial starters with high safety and efficacy in food production.

KEYWORDS

microorganisms; probiotic cultures; matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry (MALDI-TOF); large-scale identification of microorganisms; probiotics; antibiotics; *Lactococcus lactis* subspecies *lactis*

ВВЕДЕНИЕ

Разработка функциональных и специализированных продуктов питания в настоящее время является актуальным направлением пищевой промышленности (Sun et al., 2022). При этом пробиотические микроорганизмы выступают основным компонентом таких продуктов, обеспечивая не только технологические свойства, но и функциональную направленность готовой продукции (Fenster et al., 2019; Minj et al., 2020; Mafe et al., 2025).

Актуальность исследования обусловлена возрастающей необходимостью использования перспективных пробиотических штаммов молочнокислых бактерий, в частности представителей вида *Lactococcus lactis*, в пищевой и биотехнологической промышленности (Khemariya et al., 2017; Barbosa et al., 2022; Wu et al., 2023). Выбор именно этого вида молочнокислых бактерий критически важен, поскольку штаммы вида *L. lactis* способны обеспечивать не только высокие органолептические и технологические свойства конечного кисломолочного продукта, но и значительно увеличивать сроки хранения за счет образования бактериоцинов при сквашивании молока (Shah et al., 2024; Kondrotiene, et al., 2024). Данные пептиды являются естественными консервантами и выступают ингибиторами роста нежелательной микрофлоры (Venegas-Ortega et al., 2019; Sanca et al., 2023).

Дополнительным фактором, определяющим значимость настоящей работы в контексте национальной безопасности и импортозамещения, является значительная зависимость российского рынка кисломолочных продуктов от импортных заквасочных культур. В настоящее время существует устойчивая потребность в отечественных, высокоэффективных заквасочных препаратах на основе российских штаммов, которые могут обеспечить стабильность производства и конкурентоспособность готовой продукции на внутреннем рынке (Staronenkova et al., 2023).

Современные методы идентификации и характеристики пробиотиков, включая MALDI-TOF MS, позволяют обеспечить точное определение и качество микробных культур для их эффективного применения (Dec et al., 2016; Noun, Akoumeh, & Abbas, 2022; Nagy & Schuetz, 2018). Особое внимание должно быть уделено изучению ферментативного

профиля и антагонистической активности штаммов, что влияет на их биотехнологические свойства и безопасность (De Vuyst & Leroy, 2007; Cotter, Hill, & Ross, 2005).

Несмотря на широкое применение молочнокислых веществ в пробиотических продуктах, комплексная характеристика штаммов с использованием современных методов остается недостаточно изученной: нет комплексных исследований, где одновременно оценены MALDI-TOF-профиль, ферментативная активность, устойчивость к стрессовым условиям ЖКТ и антагонистическая активность штаммов, выделенных именно из отечественных сырьевых источников. В частности, имеются данные о соединении классической микробиологической идентификации с масс-спектрометрией MALDI-TOF MS для штаммов, выделенных из коровьего молока, а также информация о взаимосвязях их ферментативного профиля и антагонистической активности в отношении условно-патогенных микроорганизмов (Angelakis et al., 2011; Hussain et al., 2021).

Научная новизна исследования заключается в том, что оно восполняет выявленный пробел, связанный с отсутствием комплексной характеристики потенциально технологически ценных штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, включающей их точную идентификацию, оценку функционально значимых ферментативных и антагонистических свойств, а также стрессоустойчивость в условиях, имитирующих желудочно-кишечный тракт. На примере штамма *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 в единой методологической рамке сопоставлены данные классических культурно-биохимических методов и MALDI-TOF MS-идентификации с показателями его технологического и пробиотического потенциала, что позволяет предложить данный штамм в качестве перспективного кандидата для создания новых заквасок для ферментированных молочных продуктов с прогнозируемыми функциональными свойствами.

Целью исследования является селекция из природных образцов и всесторонняя характеристика штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 по морфологическим, биохимическим, физиологическим показателям, а также оценка его пробиотического потенциала и безопасности для применения в производстве заквасок для кисломолочных продуктов.

Исследовательские вопросы:

RQ1: Какова степень совпадения результатов классической идентификации и MALDI-TOF MS-анализа для селекции штаммов в рамках подвидов одного вида, перспективного для производства кисломолочных продуктов?

RQ2: Насколько можно опираться на технологические свойства микроорганизмов при проведении селекции?

RQ3: Имеется ли определенная ферментативная активность, биохимические свойства и антагонистические свойства, которые обуславливают пробиотический потенциал отобранного штамма?

RQ4: Каков уровень устойчивости штамма к основным применяемым антибиотикам и стрессовым факторам желудочно-кишечного тракта?

Гипотеза исследования: штамм *L. lactis* subsp. *lactis* 15, селекционированный по технологическим и биохимическим характеристикам, обладает широким ферментативным профилем и высокой антагонистической активностью, что обеспечивает его перспективность для использования в пробиотических кисломолочных продуктах. Выбор комбинированной методологии идентификации (классические микробиологические методики и MALDI-TOF MS) обоснован необходимостью обеспечения достоверности полученных результатов и их воспроизводимости, а также высокой степенью достоверности видовой идентификации в кратчайшие сроки, поскольку классические методики определяют только фенотипический характер штамма. Оценка ферментативной активности, антибиотикорезистентности и устойчивости к стрессовым факторам позволяет комплексно оценить свойства и безопасность штамма для применения в пищевых продуктах.

Результаты исследования обеспечивают получение данных, необходимых для обоснованного внедрения перспективного штамма с пробиотическим потенциалом в состав пробиотических продуктов с целью повышения их надежности, безопасности и биологической эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве источников выделения культуры молочнокислых бактерий (далее — МКБ) использовали коровье молоко двух типов: (1) коммерческое молоко, закупаемое в розничной торговой сети г. Москвы, и (2) молоко от здоровых коров КФХ «Свободный труд».

В качестве источника коммерческого молока использовали 5 партий молока, приобретенных в период 2023–2025 гг. в торговой сети «МЕТРО» и супермаркетах центральной части г. Москвы. Производитель — ООО «Экомилк» (Московская область). Применяли молоко цельное пастеризованное (ГОСТ Р 52054-2003) с массовой долей жира 3,2–4,0%, белка не менее 2,8%, углеводов не менее 4,5%. Каждую партию отбирали в объеме 900 мл в оригинальной упаковке (асептический пакет) с указанием даты производства и срока годности (10 сут при температуре 2–4 °С). Пробы доставляли в лабораторию в сумке-холодильнике при температуре 2–4 °С в течение 1–2 ч после приобретения и анализировали не позднее 4 ч до отбора. Хранение до начала микробиологических процедур осуществлялось при температуре 2–4 °С.

Молоко от коров КФХ «Свободный труд» отбирали согласно схеме: 8 здоровых дойных коров молочного направления, индивидуальный отбор утреннего удоя. Пробы отбирали в стерильные пластиковые контейнеры объемом 250 мл, всего было получено 20 проб. Сезон отбора проб — весна 2023–2025 гг. Интервал между окончанием доения (выполняемого вручную) и началом первичной обработки не превышал 15 мин. Доставку образцов в лабораторию проводили в термоконтейнере при температуре 2–4 °С в течение 1,5–2 ч после отбора. Образцы анализировали в течение 2–3 ч после отбора. Молоко поступило от животных, не получавших антибактериальные и противомастные препараты в течение 30 дней до первого дня отбора.

Материалами исследования также являлись использованные культуры микроорганизмов: (1) вновь выделенный штамм микроорганизма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15, (2) контрольные штаммы микроорганизмов *Staphylococcus*

aureus ВКПМ № 6646, *Escherichia coli* ВКПМ № 6645, *Staphylococcus epidermidis* ВКПМ № 12635, *Klebsiella aerogenes* ВКПМ № 13214, *Candida albicans* ВКПМ № 3108.

На этапе скрининга из двух типов молока (коммерческого и свежего удоя от коров КФХ) было выделено 25 штаммов молочнокислых бактерий по схеме, описанной ниже в используемых методах. У выделенных колоний штаммов перепроверили чистоту повторным посевом на среду MRS и микроскопией, а затем кодировали порядковые номера от 1 до 25 на основе времени выделения. Из 25 выделенных штаммов далее были отобраны 16 наиболее представительных изолятов (обозначены номерами: 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25) для дальнейшей идентификации и характеристик. Этот выбор отражал наибольшее морфолого-биохимическое разнообразие полученного массива и был репрезентативен по источнику происхождения (примерно 50% из коммерческого молока и 50% из молока коров КФХ).

Все контрольные штаммы микроорганизмов были получены из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт генетики и селекции промышленных микроорганизмов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»). Контрольные штаммы хранились в виде лиофилизированных образцов при температуре 2–8 °С в герметично закрытых ампулах в соответствии со стандартами Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Восстановление культуры перед использованием проводили в соответствии с паспортами культур следующим образом: лиофилизат растворяли в физиологическом растворе (NaCl) с последующим переносом на адекватные микроорганизмам питательные агаризованные среды и инкубацией при температуре, оптимальной для роста микроорганизма. После восстановления культуры дополнительно культивировали не менее двух пассажей перед использованием в экспериментах для восстановления активности культуры.

Методы

Выделение отдельных колоний молочнокислых бактерий из смешанной микробной популяции

В ходе первичной микроскопии образцов молока отбирали образцы, не имеющие в фиксированном препарате спорных микроорганизмов, зачастую относящихся к условно-патогенным и патогенным микроорганизмам. Образцы свежего молока, пригодные к исследовательским работам, рассеивали до единичных колоний путем разведений от 10^{-1} до 10^{-10} на питательный агар MRS, имеющий сложный многокомпонентный состав, обеспечивающий оптимальные условия для роста микроорганизмов. Завершение этапа культивирования микроорганизмов оценивали по характерному росту поверхностных колоний на питательной среде¹, а также в бульоне MRS. Через два дня наблюдали рост единичных колоний на поверхности питательной среды. Полученные колонии выделенных бактериальных культур высевали на косяках с агаризованной средой MRS и выращивали в течение 48 ч при температуре 30 °С.

Культурально-морфологические и фенотипические методы

Данный этап включал оценку макро- и микроморфологических характеристик изолятов после культивирования на селективных питательных средах, указанных в Таблице 1. Для предварительной идентификации использовали селективные питательные агаризованные среды MRS и «Лактобакагар» (состав — Таблица 1). В приготовленном виде среда «Лактобакагар» приобретает желтый цвет и прозрачную консистенцию, кислотность составляет $5,7 \pm 0,3$ единицы pH при температуре 25 °С, срок годности составляет 7 сут при хранении в холодильнике (от +2 до +8 °С) или до 5 сут в условиях комнатной температуры.

Оценивали размер, форму, цвет, прозрачность, характер края и поверхность выросших колоний на указанных питательных средах. Морфологию бактериальных клеток (форма, размер, расположение) исследовали с помощью световой микроскопии на световом микроскопе MAGUS Bio (MAGUS by Levenhuk, Китай). Для этого готовили мазки, ко-

¹ Мудрецова-Висс, К. А., Дедюхина, В. П., & Масленникова, Е. В. (2014). Основы микробиологии: учебник (5-е изд., исправленное, пересмотренное и дополненное). Москва: ИНФРА-М.

Таблица 1

Количественный состав питательных сред (г/л)

Table 1

Quantitative Composition of Nutrient Media (g/l)

Компонент среды	Среда MRS	Среда MRS-бульон	«Лактобакагар»	Среда МПА для контрольных штаммов
Источники азота и факторов роста				
Пептон	10,0	10,0	–	10,0
Ферментативный пептон	5,0	5,0	3,0	–
Экстракт пекарских дрожжей	1,0 мл	1,0 мл	1,0 мл	–
Мясной экстракт	20,0	20,0	–	11,0
Углеводы				
Глюкоза	20,0	20,0	–	–
Стабилизаторы и эмульгаторы				
Твин-80	1,0 мл	1,0 мл	1,0 мл	–
Буферные системы и соли				
Натрий фосфорнокислый двузамещенный (Na ₂ HPO ₄)	2,0	2,0	–	–
Натрий уксуснокислый 3-водный (CH ₃ COONa · 3H ₂ O)	5,0	5,0	2,0	–
Аммоний лимоннокислый однозамещенный ((NH ₄)H ₂ C ₆ H ₅ O ₇)	2,0	2,0	–	–
Натрия хлорид (NaCl)	–	–	–	5,0
Микроэлементы				
Магний сернокислый 7-водный (MgSO ₄ · 7H ₂ O)	0,1	0,1	–	–
Марганец хлористый 4-водный (MnCl ₂ · 4H ₂ O)	0,05	0,05	–	–
Стабилизатор среды (Агар)				
Агар микробиологический	12,0	–	–	15,0

торые фиксировали и окрашивали по методу Грама для определения отношения микроорганизмов к грамположительным или грамотрицательным, что является ключевым этапом в таксономической идентификации.

Для изучения фенотипических свойств выделенных бактериальных культур проводили наращивание биомассы культуры микроорганизма в питательном бульоне MRS, количественный состав компонентов которого представлен в Таблице 1. Образцы культивировали в термостате при температуре воздуха 30 °С в течение 72 ч. Завершение культивирования оценивали по характерному росту в пробирке с питательным бульоном или образованием осадка бактериальной массы. Определяли фенотипические свойства бактериальных культур в свежеприготовленном микроскопическом фиксированном препарате.

Культуральные и технологические свойства определяли по времени ферментации обезжиренного молока и образования кисломолочного сгустка при заданной температуре. Исследовали технологические характеристики выделенных штаммов в диапазоне температур от 30 °С до 44 °С, а также количество КОЕ/см⁵ потенциальных пробиотических культур в образовавшемся кисломолочном сгустке.

Биохимические методы с применением тест-систем API

Для углубленной биохимической идентификации и оценки ферментативного профиля использовали коммерческие миниатюрные тест-системы API (bioMérieux, Франция). Данные системы представляют собой пластиковые полоски (стрипы) с микролунками, содержащими лиофилизированные субстраты для определения специфической фер-

ментативной активности и способности утилизировать различные углеводы. Процедура проведения анализа: суспензию чистой культуры бактерий определенной плотности (стандартизированную по мутности) вносили в лунки стрипа в соответствии с инструкцией производителя. Для идентификации микроорганизмов использовали системы, соответствующие предполагаемой таксономической группе (API 50 CHL для лактобацилл и других грамположительных бактерий). Заполненные стрипы инкубировали при оптимальной для данного микроорганизма температуре (например, $37 \pm 1^\circ\text{C}$) в термостате ТСО-1/80 СПУ (АО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия). Результаты учитывали визуально через 24–48 ч по изменению цвета в лунках, вызванному метаболическими реакциями (подкислением, защелачиванием и др.). Для оценки ферментативного профиля отобранного штамма молочнокислых бактерий использовали тест-системы API ZYM, определение вели по схеме, описанной выше. Временные затраты на проведение идентификации с использованием API-систем составляли: подготовка культуры и внесение пробы — до 30 мин, инкубация — от 18 до 24 ч, учет и интерпретация результатов — около 20 мин.

Идентификация микроорганизмов с помощью времяпролетной масс-спектрометрии MALDI TOF MS

Для идентификации микроорганизмов с помощью времяпролетной масс-спектрометрии MALDI TOF MS использовали масс-спектрометр MALDI TOF Microflex PC. Принцип метода матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации с времяпролетной масс-спектрометрией (MALDI TOF MS) основан на анализе уникальных белковых профилей микроорганизмов, преимущественно рибосомальных белков, обладающих высокой степенью консервативности и таксономической значимостью. По данному методу колонии из чашек Петри наносили на специальную мишень, помещали в прибор и проводили исследование. Под действием удара лазера белки подлетали на определенную высоту в зависимости от своей массы, прибор строил в режиме реального времени масс-спектры и сравнивал их со спектрами из базы данных, при наибольшем совпадении выдавался результат идентификации по роду и виду микроорганизма (Noun, Akoumeh, & Abbas, 2022).

Определение антагонистической активности культур микроорганизмов

Антагонистическую активность штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 определяли методом диффузии в агар в соответствии с ОФС.1.2.4.0010.15 (Государственная фармакопея РФ, XIII издание) и ГОСТ 10444.11-89. В качестве тест-штаммов использовались условно-патогенные коллекции из ВКПМ (см. раздел «Материалы»). Исследуемый штамм культивировали в среде MRS при температуре 30°C в течение 18–24 ч без аэрации. После культивирования делали смыв культуры и ресуспендировали до концентрации 10^8 КОЕ/мл. Тест-штаммы восстанавливали из лиофилизированных образцов ВКПМ согласно протоколу, выращивали при 37°C в течение 18–20 ч на мясо-пептонном агаре (МПА). Для *Candida albicans* применяли среду Сабуро при температуре 30°C в течение 24–48 ч. После инкубации культуры смывали стерильным 0,9%-м раствором хлорида натрия и стандартизировали по мутности до 0,5 единицы по шкале МакФарланда (примерно $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл).

Для определения активности МПА охлаждали до $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$, добавляли 10% по объему приготовленной взвеси тест-микроорганизмов, тщательно перемешивали и разливали в чашки Петри диаметром 90 мм, толщиной 4–6 мм. После застывания агара стерильным штампом-пробойником диаметром 6–8 мм вырезали лунки, расположенные на расстоянии 25–30 мм друг от друга и от края чашки. В каждую лунку стерильной пипеткой вносили суспензию исследуемого штамма. Подготовленные чашки помещали в термостат при $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ на 18–24 ч для бактериальных тест-штаммов и при $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ на 24–48 ч для *Candida albicans* ВКПМ 3108. Диаметр зоны ингибирования роста тест-микроорганизмов учитывали при проведении минимум трех параллельных определений. Антагонистическую активность интерпретировали следующим образом: диаметр зоны ≤ 8 мм — слабая активность, 9–15 мм — умеренная активность, 16–20 мм — сильная активность. Схема проведения анализа представлена на Рисунке 1.

Определение антибиотикорезистентности культур микроорганизмов

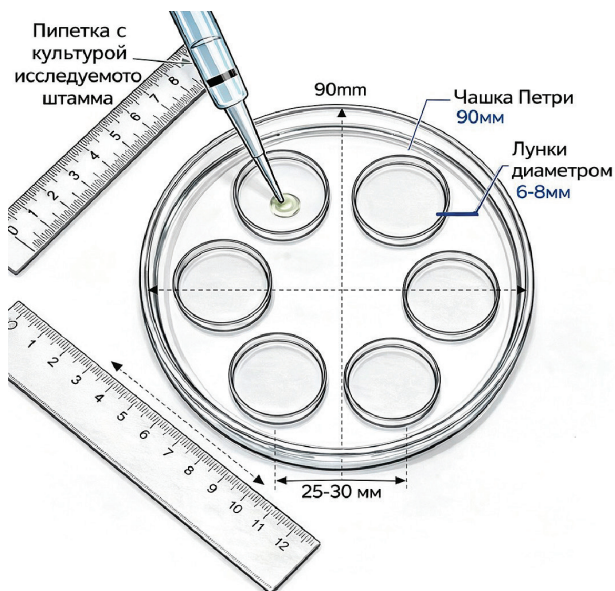
Для определения антибиотикорезистентности отобранного штамма использовали диско-диффузный метод с последующей оценкой в агаризованной

Рисунок 1

Схема проведения анализа

Figure 1

Analysis Flowchart



среде зон ингибирования роста микроорганизмов. Антибиотики применялись в стандартных дозах: тетрацилин — 10 мкг, пенициллин — 10 мкг, клиндамицин — 10 мкг, ампициллин — 25 мкг и ванкомицин — 5 мкг. Культуру наносили на поверхность питательной агаровой среды MRS, инокулируемую равномерно по всей поверхности, после чего размещали бумажные диски с соответствующими антибиотиками. Инкубация проводилась при 30 °C в течение 24 ч. Устойчивость или чувствительность штамма оценивали по диаметру зоны ингибирования в соответствии с рекомендациями CLSI (Clinical and Laboratory Standards Institute, 2022) и ОФС.1.2.4.0010.18 «Определение антимикробной активности антибиотиков методом диффузии в агар».

***In vitro*-определение выживаемости культур микроорганизмов в стрессовых условиях ЖКТ**

Выживаемость отобранного штамма в стрессовых условиях желудочно-кишечного тракта оценивали по методике, предложенной С. Dunne и соавторами (Dunne, & et al., 2001). Методика основана на применении модельных сред, имитирующих кислотообразующую зону желудка, и служит в качестве стандартизованного протокола инкубации пробиотических штаммов в симулированных желудочных

и кишечных условиях для оценки их устойчивости и потенциала выживания в организме человека. Инкубировали клетки в модельных средах, имитирующих кислотную среду желудка и желчные соли кишечника. Методика включает последовательное воздействие на культуру пониженных pH (например, pH 2,0–3,0) и желчных компонентов в концентрациях, характерных для человеческого ЖКТ, с последующим подсчетом жизнеспособных клеток методом определения колониеобразующих единиц (КОЕ) после каждого этапа воздействия.

Анализ данных

Обработка полученных данных проводилась на основе стандартизованных методологических подходов, обеспечивающих надежность и воспроизводимость результатов. Все результаты качественных микробиологических тестов (наличие/отсутствие роста, положительная/отрицательная реакция фермента, радиус зоны ингибирования) кодировались по унифицированной системе и структурированы в таблицы для классификации. Морфологические характеристики колоний измерялись при световой микроскопии (MAGUS Bio, увеличение ×1000), видовая идентификация проводилась по результатам биохимических тестов (API 50 CHL, API ZYM) и масс-спектрометрии MALDI-TOF MS (Microflex PC, Bruker Daltonics). При использовании MALDI-TOF MS результаты идентификации кода определялись с использованием баз данных Bruker Taxonomy с пороговым значением $\geq 1,7$ для уровня вида.

Количественные показатели устойчивости штамма при стрессовых условиях (pH 2,0 и 3,0; наличие желчных солей) определяли методом подсчета колониеобразующих единиц на среде MRS с использованием серийных разведений. Антагонистическую активность фиксировали, измеряя диаметр зоны ингибирования. Процедура выполнялась в соответствии со стандартами CLSI, с интерпретацией результатов по шкале: диаметр ≤ 8 мм — слабая активность, 9–15 мм — умеренная, ≥ 16 мм — сильная. Ферментативная активность анализировалась с помощью системы API ZYM в условных единицах.

Все количественные данные представляют собой среднее арифметическое \pm стандартное отклонение ($M \pm SD$), полученного как минимум из трех научных биологических повторов. Для статистической обра-

ботки применялась однофакторная дисперсионная аналитика (ANOVA). Уровень статистической достоверности установлен на $p < 0,05$. Обработка данных осуществлялась в программе Excel. Штаммы, не соответствующие критериям чистоты или показавшие нестабильные результаты при повторных посевах, были исключены из исследования и не учитывались при подсчете и репрезентации результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Скрининг технологически ценных штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* с использованием биохимических методов и MALDI-TOF MS

Из образцов натурального молока выделено 25 культур микроорганизмов. Фенотипически определена форма клеток микроорганизмов, характерная для кокков. В ходе оценки по морфологическим признакам было отмечено, что выросшие колонии бактериальных культур имеют округлую

гладкую форму белого цвета, небольшого размера, с ровными краями, без характерного постороннего запаха. Результаты оценки фенотипических характеристик культур микроорганизмов приведены на Рисунке 2.

По результатам микроскопирования и определения стандартных культурально-морфологических признаков установлено, что все штаммы формировали характерные колонии и были отнесены к МКБ, вид *L. lactis*.

Лактококкам свойственно не только сбраживать углеводы в питательных субстратах, но и ферментировать обезжиренное молоко. Технологические характеристики выделенных штаммов приведены в Таблице 2.

По результатам оценки органолептических свойств сквашенных кисломолочных сгустков практически все образцы характеризовались колкой структурой. Сгустк сглаженной формы имели единичные комочки, низкую плотность и слабую вязкость, а так-

Рисунок 2

Результаты морфологической и фенотипической оценки культур микроорганизмов

Figure 2

Results of Morphological and Phenotypic Assessment of Microbial Cultures

Фенотипическая оценка колоний	Микроскопия образца	Номер образца
Колонии небольшого размера округлой формы, белого цвета, немного тянущаяся, без характерного запаха	Грамположительные клетки кокковидной формы, средних и больших размеров, напоминающие род стрептококков, расположены в цепочках и больших скоплениях	1, 6, 7, 8, 9, 10, 18, 23, 24, 25
Колонии небольшого размера округлой формы с ровными краями, без характерного запаха, не тянущиеся	Грамположительные клетки, сферической, реже овальной и вытянутой формы, расположенные в монококках и диплококках, реже в небольших извилистых цепочках по 3–7 звеньев и небольших скоплениях, неподвижны, спор и капсул не образуют	2, 3, 4, 5, 20, 21, 22
Колонии небольшого размера округлой формы с ровными краями, без характерного запаха, не тянущиеся	Грамположительные клетки, сферической, реже овальной и вытянутой формы, расположенные в монококках и диплококках, реже в небольших извилистых цепочках по 3–7 звеньев и небольших скоплениях, неподвижны, спор и капсул не образуют	11, 12, 15, 16
Колонии среднего размера, напоминающие зерно, по оттенку от белого до светло-желтого цвета, не тянущиеся	Грамположительные клетки овальной формы, немного вытянутые и впуклые, небольших размеров, ближе к крошечным, расположены в больших скоплениях и реже цепочками	13, 14, 17, 19

Таблица 2

Технологические характеристики выделенных штаммов

Table 2

Technological Characteristics of Selected Strains

№ образца	Ферментативная активность культур через 12 ч культивирования при заданной температуре					
	тскв. = 30 °С		тскв. = 37 °С		тскв. = 44 °С	
	Активная кислотность, ед. рН	Титруемая кислотность, °Т	Активная кислотность, ед. рН	Титруемая кислотность, °Т	Активная кислотность, ед. рН	Титруемая кислотность, °Т
1	–	–	4,80	79	4,50	81
2	4,30	87	–	–	–	–
3	4,30	90	–	–	–	–
4	4,10	97	4,58	70	–	–
5	4,07	98	4,51	73	–	–
6	–	–	4,90	65	–	–
7	–	–	4,57	69	–	–
8	5,45	72	4,90	71	–	–
9	–	–	4,66	66	–	–
10	5,64	80	5,01	79	–	–
11	4,40	69	–	–	–	–
12	4,31	76	4,70	68	–	–
13	–	–	–	–	–	–
14	–	–	–	–	–	–
15	4,99	77	–	–	–	–
16	4,31	80	4,80	67	–	–
17	–	–	–	–	–	–
18	–	–	5,36	77	–	–
19	–	–	–	–	–	–
20	4,22	90	4,90	74	–	–
21	4,76	58	–	–	–	–
22	4,45	72	–	–	–	–
23	–	–	4,60	85	–	–
24	–	–	4,77	88	–	–
25	–	–	5,08	91	–	–

Примечания. «–» – рост культур с характерным сквашиванием субстрата не зафиксирован.

Notes. «–» – no growth of cultures with characteristic fermentation of the substrate was recorded.

же выраженный кисломолочный вкус и аромат. Образец № 5 имеет схожие характеристики со всеми кисломолочными сгустками, но имеет важную особенность — выраженный сметанный вкус, что говорит о сливочности образца. Можно предположить, что по подвиговому соотношению образец № 5 относится к *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*. Также необходимо отметить титр КОЕ в полученных кисломолочных сгустках, максимальные значения

отмечены у штаммов: № 15 — $5,4 \times 10^8$ КОЕ/см³, № 10 — $1,6 \times 10^8$ КОЕ/см³.

Далее использовали только те культуры, которые показывали активный рост при 30 °С и кислотообразование в пределах 58–88 °Т, характерные для лактококков. В Таблице 3 приведены результаты ассимиляции бактериальными культурами различных углеводов.

На основании полученных данных были предположительно определены виды молочнокислых бактерий (см. Таблицу 4). Согласно международной спецификации, все бактерии, относящиеся к виду *Lactococcus lactis*, имеют одинаковые морфологические характеристики, для точной видовой и подвидовой идентификации необходимо использовать усовершенствованные методики протеомного анализа, например, масс-спектрометрию (Nagy, & Schuetz, 2018). Необходимо отметить, что при проведении идентификации пробиотических микроорганизмов методом MALDI TOF MS с высокой вероятностью определяется подвид культуры, а ключевым преимуществом метода является его способность обеспечивать дифференциацию на основе анализа спектральных «отпечатков пальцев», что критически важно для точной характеристики микробного сообщества. Классическая идентификация МКБ, опирающаяся на оценку морфологии колоний,

физиолого-биохимические тесты и анализ профилей ферментации углеводов, характеризуется значительной трудоемкостью, протяженностью во времени (до 5–7 сут) и нередко недостаточной разрешающей способностью для различения близкородственных таксонов, например, видов и подвидов рода *Lactococcus* spp. Подобные данные позволяют включать в дизайн проводимых экспериментов дополнительные узкоспециализированные научно-исследовательские разработки, например, оценку диацетильных свойств штамма № 15 (аромат и газообразование). Отобранные образцы были проанализированы на масс-спектрометре MALDI TOF MS, результаты приведены в Таблице 4.

На Рисунке 3 представлены масс-спектры штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 и полученные для него scores.

Таблица 3

Ассимиляция бактериальными культурами различных источников углеводов

Table 3

Assimilation of Various Carbohydrate Sources by Bacterial Cultures

№ образца	Углеводы, используемые при культивировании образцов микроорганизмов с кокковидной формой													
	Декстрин	Арабиноза	Целлюбиоза	Фруктоза	Галактоза	Глюкоза	Глюконат	Лактоза	Мальтоза	Маннит	Манноза	Раффиноза	Сахароза	Трегалоза
2	–	–	±	+	–	+	–	+	+	–	–	+	+	+
3	–	–	±	+	–	+	+	+	+	–	+	+	+	±
4	+	–	–	+	+	+	–	+	+	±	+	+	+	+
5	–	+	–	+	–	+	–	+	–	–	–	+	+	+
8	±	–	–	+	–	+	–	+	+	–	–	+	+	+
10	–	–	±	+	–	+	+	+	+	±	–	+	+	+
11	–	–	–	+	–	+	–	+	–	+	–	+	+	±
12	–	–	–	+	+	+	–	+	–	–	–	–	+	–
15	–	–	–	+	+	+	–	+	+	+	+	–	+	+
16	–	–	±	+	–	+	–	+	+	–	+	–	+	+
20	–	–	–	+	–	+	–	+	+	+	+	–	+	–
21	–	–	–	+	–	+	+	+	–	–	–	+	+	+
22	–	–	–	+	+	+	–	+	+	+	±	–	+	+

Примечания. «+» – реакция успешна, в процессе культивирования образцов произошло изменение питательного субстрата; «±» – реакция частично успешна, в процессе культивирования образцов произошло незначительное изменение питательного субстрата; «–» – реакция не успешна, в процессе культивирования образцов не произошло изменение питательного субстрата.

Notes. «+» – the reaction is successful, and the nutrient substrate changed during the cultivation of the samples; «±» – the reaction is partially successful, and the nutrient substrate changed slightly during the cultivation of the samples; «–» – the reaction is not successful, and the nutrient substrate did not change during the cultivation of the samples.

Таблица 4

Идентификация вида молочнокислых бактерий на основе фенотипических, биохимических методов и методом масс-спектрометрии MALDI TOF MS

Table 4

Identification of Lactic acid Bacteria Species Based on Phenotypic, Biochemical Methods and MALDI TOF MS Mass Spectrometry

№ образца	Предположительный вид молочнокислых бактерий	Результат идентификации на масс-спектротоме
2	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
3	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
4	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
5	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>
8	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Enterococcus faecium</i>
10	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Enterococcus faecium</i>
11	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>
12	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>
15	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
16	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
20	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
21	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>
22	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>cremoris</i>

Примечания. Синим цветом выделены культуры, у которых не совпал подвид по данным культурально-биохимической оценки и масс-спектрометрии MALDI TOF MS, красным цветом отмечены культуры, у которых не совпал род микроорганизма.

Notes. The blue color indicates cultures whose subspecies did not match according to the data of the cultural-biochemical assessment and MALDI TOF MS mass spectrometry, the red color indicates cultures whose genus of the microorganism did not match.

По результатам идентификации, приведенной в Таблице 4, можно отметить, что из 13 отобранных культур (предположительно лактококков) только 11 штаммов относятся к роду *Lactococcus*, 7

из которых — к подвиду *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, а оставшиеся 4 — к *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*.

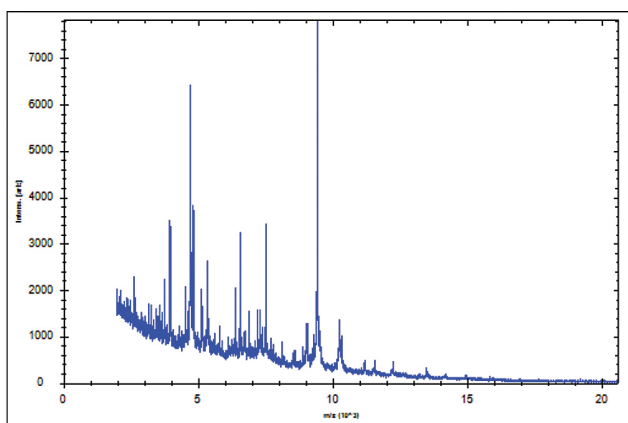
На основании данных по технологическим свойствам, количеству КОЕ потенциальных микроорга-

Рисунок 3

Масс-спектры штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 и полученные для него scores

Figure 3

Mass Spectra of the *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain No. 15 and the Scores Obtained for it



(А) Масс-спектры штамма

Score	Detected Species
2.48	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> DSM 20661 DSM
2.35	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> DSM 20384 DSM
2.20	<i>Lactococcus lactis</i> DSM 4366 DSM
2.18	<i>Lactococcus lactis</i> IBS_MS_6 IBS
2.18	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> DSM 20175 DSM
2.12	<i>Lactococcus lactis</i> DSM 20661 DSM_2
2.10	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> DSM 20481T DSM
1.99	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> DSM 20388 DSM
1.92	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> DSM 20069T DSM
1.89	<i>Lactococcus lactis</i> DSM 30863 DSM

(Б) Полученные scores для штамма

низмов, их способности ассимилировать различные источники углерода для дальнейших исследований пробиотических и биохимических свойств отобран штамм *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15.

Оценка биохимических свойств и морфологии перспективного штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

Lactococcus lactis subsp. *lactis* № 15 достоверно идентифицирован методом масс-спектрометрии, что подтверждает его видовую принадлежность (Рисунок 3). Морфологически бактериальная культура представлена в виде грамположительных кокков, формирующих короткие цепочки или пары (Рисунок 4), клеточная структура неспорообразующая. Морфологический и масс-спектрометрический анализы демонстрируют точное соответствие штамма типичным характеристикам культур *L. lactis*.

Проведен анализ биохимических свойств выделенного штамма с использованием тест-систем API ZYM от французского производителя Biomereix. Результаты представлены в Таблице 5.

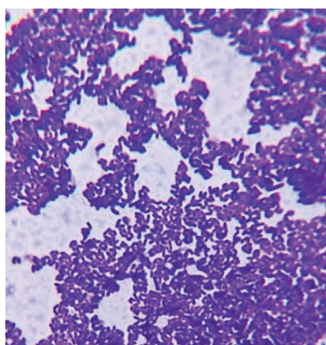
Биохимические тесты выявили активность β -галактозидазы, трипсина, химотрипсина, ацидфосфатазы и валин-амино-пептидазы, а также отсутствие эстеразной (C4) и липазной активности.

Рисунок 4

Морфологическая характеристика *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

Figure 4

Morphological Characteristics of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* No. 15



Грамположительные бактерии представляют собой кокки, которые группируются парами или цепочками. Неспорообразующие

(А) Результат дифференциального окрашивания *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

(Б) Морфологические характеристики клеток

Таблица 5

Ферментативная активность штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

Table 5

Enzymatic Activity of the Strain *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* No. 15

№ п/п	Наименование фермента	<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> № 15
1	Alkaline phosphatase	–
2	Esterase (C4)	–
3	Esterase (C8)	+
4	Lipase (C14)	–
5	Leucine aminopeptidase	–
6	Valine aminopeptidase	+
7	Cysteine aminopeptidase	–
8	Trypsin	+
9	Chymotrypsin	+
10	Acid phosphatase	+
11	Naphthol-AS-BI-phosphohydrolase	–
12	α -galactosidase	–
13	β -galactosidase	+
14	β -lucuronidase	V
15	α -glucosidase	–
16	β -glucosidase	–
17	N-acetyl- β -glucosaminidase	V
18	α -mannosidase	–
19	α -fucosidase	–

Примечание. «+» – обнаружено; «–» – не обнаружено; «V» – неточный результат.

Note. «+» – detected; «–» – not detected; «V» – inaccurate result.

Пробиотический потенциал штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 Антибиотикорезистентность

Антибиотикорезистентность и безопасность пробиотических штаммов являются ключевыми параметрами при их оценке для использования в пищевой и фармацевтической промышленности. Отсутствие устойчивости к большинству клинически значимых антибиотиков свидетельствует о минимальном риске распространения резистентных генов и подтверждает безопасность штамма для человека. Используемый метод диффузии в агар позволяет эффективно оценить фенотипическую антибиотикочувствительность и является обще-

принятым стандартом для микробиологических исследований безопасности пробиотических культур (EFSA, 2022), результаты представлены в Таблице 6. При этом частичная устойчивость к ванкомицину определялась по уменьшенной, но не полностью отсутствующей зоне ингибирования.

Таблица 6

Антибиотикочувствительность штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

Table 6

Antibiotic Sensitivity of the *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain No. 15

Антибиотик	Чувствительность штамма
Тетрациклин (10 мкг)	Присутствует
Пенициллин (10 мкг)	Присутствует
Клиндамицин (10 мкг)	Присутствует
Ампициллин (25 мкг)	Присутствует
Ванкомицин (5 мкг)	Отсутствует полностью

В случае исследуемого штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 наблюдается полная чувствительность к тетрациклину, пенициллину, ампициллину и клиндамицину, что исключает опасность выбора резистентных популяций в кишечнике. Отсутствует чувствительность к ванкомицину.

Устойчивость штамма к стрессовым условиям желудочно-кишечного тракта

Физиологическая устойчивость штамма в различных стрессовых условиях является важным индикатором его способности к выживанию и функциональной активности в желудочно-кишечном тракте человека. Исследования выживаемости показывают значительный диапазон адаптивных возможностей штамма: при стандартных условиях — $5,4 \times 10^8$ КОЕ/г; при кислотном pH — $1,2 \times 10^7$ КОЕ/г; при щелочном pH — $4,3 \times 10^5$ КОЕ/г; при действии желчи — 7×10^7 КОЕ/г.

Антагонистическая активность

Антагонистическая активность пробиотических штаммов является важным показателем их способности подавлять рост патогенных микроорганизмов в кишечной микробиоте, что способствует поддержанию микробиологического баланса и уменьшению риска инфекций. Данные проведенных исследований представлены в Таблице 7.

Таблица 7

Антагонистическая активность штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15

Table 7

Antagonistic Activity of the *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain No. 15

Референсный штамм	Зона задержки роста в мм
<i>Staphylococcus aureus</i> ВКПМ № 6646	16
<i>Escherichia coli</i> ВКПМ № 6645	Отсутствует
<i>Staphylococcus epidermidis</i> ВКПМ № 12635	Отсутствует
<i>Klebsiella aerogenes</i> ВКПМ № 13214	14
<i>Candida albicans</i> ВКПМ № 3108	Отсутствует

В исследуемом штамме *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15 выявлена высокая активность по отношению к *Staphylococcus aureus* ВКПМ № 6646 и умеренная активность по отношению *Klebsiella aerogenes* ВКПМ № 13214

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные подтверждают, что заявленный в работе исследовательский пробел (недостаток комплексных характеристик отдельных пробиотических штаммов *Lactococcus lactis* с точки зрения таксономической идентификации, ферментативного профиля, безопасности и антагонистической активности) действительно может быть существенно сокращен за счет сочетания MALDI-TOF MS и классических биохимических методов (Noun et al., 2022; Nagy & Schuetz, 2018). В текущем исследовании именно использование масс-спектрометрии позволило не ограничиваться фенотипическим отношением культур к «лактококкам», а четко разграничить внутри группы реально пригодные штаммы *L. lactis* и исключить нежелательные таксоны.

Сопоставление данных культурально-морфологической оценки и MALDI-TOF MS показало, что из 13 отобранных культур, предварительно идентифицированных как лактококки, только 11 действительно относятся к роду *Lactococcus*, а 7 — к подвиду *L. lactis* subsp. *lactis*, тогда как часть изолятов была реклассифицирована как *L. lactis* subsp. *cremoris* или *Enterococcus faecium*. Таким образом, уже на первом этапе возможно исключить 15,4% штаммов, не соответствующих целевому роду, и 30,7% штаммов с иной подвидовой принадлеж-

ностью. Эти данные полностью коррелируют с результатами типирования аутохтонной микробиоты молока: при стандартизованных условиях культивирования MALDI-TOF MS демонстрирует высокую воспроизводимость спектров рибосомальных белков и надежно различает близкородственные виды и подвиды молочнокислых бактерий (Куц и соавт., 2021; Nagy & Schuetz, 2018). Полученные результаты показали, что метод идентификации микроорганизмов путем масс-спектрометрии MALDI TOF MS позволяет более точно определить видовую принадлежность штамма, что дает возможность в дальнейшем корректно составить не только технологическую схему культивирования, но и рецептуру композиции многокомпонентных заквасок с целью усиления исследуемых свойств. На этом фоне выбор штамма *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 для углубленной характеристики выглядит методически оправданным, поскольку он объединяет типичный морфотип и благоприятные технологические показатели (Lauková et al., 2024).

Морфологические характеристики штамма № 15 (грамположительные неспорообразующие кокки, формирующие пары и короткие цепочки) полностью соответствуют описанию рода *Lactococcus* в современных систематиках (Hammes & Hertel, 2014) и коррелируют с высокой устойчивостью к механическим воздействиям и стабильностью при ферментации молока. Дополнительно проведенный ферментативный анализ по системе API ZYM, являющийся ключевым биохимическим маркером, определяющим метаболическую активность микроорганизмов, их адаптационные способности и потенциал к применению в биотехнологиях, выявил профиль, который хорошо согласуется с представлениями о функционально значимых заквасочных культурах. Обнаруженная активность β-галактозидазы, валин-аминопептидазы, трипсиноподобных и химотрипсиноподобных ферментов, а также ацидфосфатазы указывает на способность штамма эффективно гидролизовать лактозу, участвовать в протеолизе белковых матриц до свободных аминокислот и формировать вкусоароматический профиль продукта (Гусева и соавт., 2021; Петров и соавт., 2013; Wu et al., 2023). Отсутствие

эстеразной (C4) и липазной активностей можно рассматривать как технологическое преимущество: минимизация интенсивного липолиза снижает риск формирования прогорклых и иных посторонних привкусов и тем самым способствует стабильности органолептических свойств кисломолочных продуктов (Китаевская, 2015). В совокупности эти характеристики хорошо согласуются с укороченным временем сквашивания (около 8 ч) и повышенной ароматообразующей способностью, выявленной на этапе скрининга.

Профиль антибиотикочувствительности штамма № 15 также укладывается в современную концепцию безопасных пробиотических культур. Полная чувствительность к тетрациклину, пенициллину, ампициллину и клиндамицину отвечает рекомендациям EFSA и Европейской комиссии по исключению штаммов, несущих приобретенную устойчивость к клинически значимым антибиотикам². Зафиксированная фенотипически сниженная чувствительность к ванкомицину, интерпретируемая по отсутствию зоны ингибирования при стандартной нагрузке диска, при этом не противоречит критериям безопасности, поскольку для *Lactococcus spp.* описан природный механизм модификации пептидогликана (замена D-Ala-D-Ala на D-Ala-D-Lac), резко уменьшающий сродство ванкомицина к мишени без вовлечения плазмидно-опосредованных генов резистентности³ (Reynolds, 1989; Walsh et al., 1996). Как подчеркивают Mathur & Singh (2005), подобная видоспецифическая толерантность не связана с повышенным риском горизонтального переноса устойчивости, что позволяет рассматривать штамм *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 как безопасный с точки зрения регуляторных требований к производственным пробиотикам².

Отдельного обсуждения заслуживают данные о выживаемости штамма в условиях, моделирующих стрессовые факторы желудочно-кишечного тракта. Использование протокола Dunne и соавт. (2001), широко применяемого при *in vitro*-отборе пробиотиков, обеспечивает сопоставимость наших результатов с зарубежными исследованиями.

² European Commission. (2022). Guidance on the assessment of bacterial resistance to antibiotics of human or veterinary importance. Official Journal of the European Union; Clinical and Laboratory Standards Institute. (2022). Performance standards for antimicrobial susceptibility testing (32nd ed.). CLSI supplement M100. Clinical and Laboratory Standards Institute.

³ Courvalin, P. (2006). Vancomycin resistance in gram-positive cocci. *Clinical Infectious Diseases*, 42 (Supplement_1), S25–S34. <https://doi.org/10.1086/491711>.

Показано, что при исходной концентрации $5,4 \times 10^8$ КОЕ/г штамм сохраняет $1,2 \times 10^7$ КОЕ/г при воздействии кислой среды и 7×10^7 КОЕ/г в присутствии желчных солей; даже при щелочном pH выживаемость остается на уровне $4,3 \times 10^5$ КОЕ/г. Эти значения находятся в диапазоне, описанном для пробиотических штаммов *L. lactis*, входящих в состав заквасок (Kimoto-Nira et al., 2010; Бибарсова и др., 2022; Barbosa et al., 2022; De Chiara et al., 2024), и подтверждают адаптационные механизмы, которые обеспечивают эффективную колонизацию и пробиотическое действие. Положительная корреляция между кислотоустойчивостью и толерантностью к желчи ($r \approx 0,82$) дополнительно указывает на согласованность мембранных адаптационных механизмов и хорошо вписывается в общую модель, согласно которой повышенная β -галактозидазная активность служит косвенным маркером усиленного углеводного метаболизма и энергетической компенсации при стрессе (Saarela et al., 2000; Minj et al., 2020). Таким образом, штамм № 15 отвечает ключевому критерию пробиотика — способности к транзиту через ЖКТ с сохранением жизнеспособности и метаболической активности.

Антагонистическая активность *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 в отношении индикаторных культур также соответствует ожиданиям, сформированным на основе данных о бактериоцинах лактококков. Высокий уровень подавления *Staphylococcus aureus* ВКПМ № 6646 и умеренный уровень подавления *Klebsiella aerogenes* ВКПМ № 13214 указывает на продукцию бактериоциноподобных пептидов, сопоставимых по механизму действия с низином и лактоцином, для которых показана выраженная активность в отношении грамположительных патогенов (De Vuyst & Leroy, 2007; Cotter et al., 2005; Kaur Sidhu, & Nehra, 2021). Отсутствие ингибирующего эффекта в отношении *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis* и *Candida albicans* логично объясняется наличием внешней мембраны и/или специфических особенностей клеточной стенки, ограничивающих диффузию пептидных антибиотиков (Tenea et al., 2018; Tang & Leisner, 2024). На прикладном уровне полученные результаты означают, что штамм может способствовать снижению нагрузки отдельных грамположительных условно-патогенных микроорганизмов в пищевых матрицах и, вероятно, в составе кишечной микробиоты, что соответствует тенденции использования пробиотиков как одного из инструментов повышения микробиологической

безопасности продуктов (Bintsis, 2018; Fenster et al., 2019; Shah et al., 2024).

В совокупности наши результаты показывают, что *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 сочетает признаки технологически и функционально значимого пробиотического штамма: он надежно идентифицируется методом MALDI-TOF MS, обладает ферментативным профилем, благоприятным для молочнокислого брожения и формирования органолептических показателей, демонстрирует приемлемый с регуляторной точки зрения профиль антибиотикочувствительности, выдерживает модельные стресс-воздействия, имитирующие условия ЖКТ, и проявляет направленную антагонистическую активность. Вместе с тем представленные данные носят преимущественно фенотипический характер и получены в условиях *in vitro*. Для окончательной верификации пробиотического статуса и промышленной пригодности штамма необходимы испытания в реальных технологических режимах в составе бактериальных заквасок. Расширение экспериментальной базы в этих направлениях позволит более обоснованно интегрировать штамм *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 в промышленную практику и усилит аргументацию, заявленную во введении относительно его вклада в развитие отечественных пробиотических продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования реализована поставленная цель — селекция и комплексная характеристика штамма *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* № 15, выделенного из молочного сырья. Сочетание классических фенотипических методов с MALDI-TOF MS позволило уточнить таксономическую принадлежность штамма и охарактеризовать его физиолого-биохимический профиль в аспекте технологической пригодности и пробиотического потенциала. Показано, что штамм обеспечивает интенсивное сквашивание и формирование удовлетворительных органолептических показателей, обладает благоприятным ферментативным профилем, устойчив к действию кислотной среды и желчных солей, проявляет антагонистическую активность в отношении ряда условно-патогенных микроорганизмов и характеризуется приемлемым уровнем антибиотикочувствительности с учетом видовых особенностей *L. lactis*.

Совокупность полученных данных позволяет рассматривать штамм *L. lactis* subsp. *lactis* № 15 как перспективный компонент заквасочных и пробиотических композиций для производства кисломолочных продуктов с заданными функциональными свойствами. В то же время представленные результаты носят преимущественно фенотипический характер и получены в модельных условиях, что определяет необходимость дальнейших исследований. На следующем этапе целесообразно провести геномный анализ штамма с оценкой присутствия генов, связанных с безопасностью и синтезом бактериоцинов, а также изучить его поведение в составе поликомпонентных заквасок и комплексных пробиотических систем в условиях реальных технологических процессов. Расширение экспериментальной базы в этом направлении позволит более обоснованно интегрировать полученный штамм в промышленные технологии и внесет вклад в формирование конкурентоспособной линейки отечественных заквасочных и пробиотических препаратов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Каночкина Мария Сергеевна: научное руководство, формулирование идеи исследования, целей и задач, административное управление планированием и проведением исследования, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств, создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

ЛИТЕРАТУРА

- Бибарсова, А. А., Семенова, Е. Ф., Золкина, Н. Г., Моисеева, И. Я., Степанова, А. П., & Ловцова, Л. Б. (2022). *Штамм бактерий Lactococcus lactis subsp. cremoris 36 RCAM 05396, используемый при производстве кисломолочных диетических продуктов* (патент РФ № RU2780155C1). Пензенский государственный университет. <https://patents.google.com/patent/RU2780155C1/ru>
- Грицкевич, Е. Р., Бученков, И. Э., & Иконникова, Н. В. (2017). *Лабораторный практикум по микробиологии*. Минск: ИВЦ Минфина.
- Гусева, Т. Б., Солдатова, С. Ю., & Караньян, О. М. (2021). Органолептическая оценка молочных консервов: особенности проведения и интерпретации результатов. *Товаровед продовольственных товаров*, (10), 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>
- Китаевская С.В. (2015). Изучение способности молочнокислых бактерий продуцировать липолитические ферменты. *Вестник Казанского технологического университета*, 18(18), 256–258.

Вольнова Екатерина Романовна: формулирование идеи исследования, целей и задач, административное управление планированием и проведением исследования, создание и подготовка результатов исследования: визуализация результатов исследования и полученных данных, создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ekaterina Romanovna Volnova: supervision, formulation or evolution of overarching research goals and aims, management and coordination responsibility for the research activity planning and execution, conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection, preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision - including pre- or post-publication stages

Maria Sergeevna Kanochkina: formulation or evolution of overarching research goals and aims, management and coordination responsibility for the research activity planning and execution, preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically visualization/data presentation, preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision - including pre- or post-publication stages.

- Куш, И. В., Баиров, А. Л., & Удавлиев, Д. И. (2021). Современные методы выделения и идентификации микроорганизмов в пищевых продуктах. *Ветеринарная патология*, 4(78), 49–56. <https://doi.org/10.25690/VETPAT.2021.91.53.002>
- Петров, А. Н., Матвеевко, А. С., & Стрижко, М. Н. (2013). Исследование штаммов микроорганизмов, обладающих β -галактозидазной активностью, и их анализ. *Техника и технология пищевых производств*, (1), 16–20.
- Angelakis, E., Million, M., Henry, M. and Raoult, D. (2011), Rapid and Accurate bacterial identification in probiotics and yoghurts by MALDI-TOF mass spectrometry. *Journal of Food Science*, 76, M568–M572. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02369.x>
- Barbosa, J. P., Trindade, D. P. A., Martins, E. M. F., & Tette, P. A. S. (2022). Lactic acid bacteria isolated from fruits: A review on methods for evaluation of probiotic potential. *Journal of Food and Nutrition Research*, 10(10), 711–726. <https://doi.org/10.12691/jfnr-10-10-9>
- Bintsis T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 4(4), 665–684. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
- Cotter, P. D., Hill, C., & Ross, R. P. (2005). Bacteriocins: developing innate immunity for food. *Nature Reviews Microbiology*, 3(10), 777–788. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1273>
- De Chiara, I., Marasco, R., Della Gala, M., Fusco, A., Donnarumma, G., & Muscariello, L. (2024). Probiotic properties of *Lactococcus lactis* Strains isolated from natural whey starter cultures. *Foods*, 13(6), 957. <https://doi.org/10.3390/foods13060957>
- Dec, M., Puchalski, A., Urban-Chmiel, R., Wernicki A. (2016). 16S-ARDRA and MALDI-TOF mass spectrometry as tools for identification of *Lactobacillus* bacteria isolated from poultry. *BMC Microbiology* 16, 105(2016). <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0732-5>
- De Vuyst, L., & Leroy, F. (2007). Bacteriocins from lactic acid bacteria: production, purification, and food applications. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 13(4), 194–199. <https://doi.org/10.1159/000104752>
- Dunne, C., O'Mahony, L., Murphy, L., Thornton, G., Morrissey, D., O'Halloran, S., Feeney, M., Flynn, S., Fitzgerald, G., Daly, C., Kiely, B., O'Sullivan, G. C., Shanahan, F., & Collins, J. K. (2001). In vitro selection criteria for probiotic bacteria of human origin: Correlation with in vivo findings. *American Journal of Clinical Nutrition*, 73(2 Suppl), 386S–392S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.386s>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), Koutsoumanis, K., Allende, A., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., Davies, R., De Cesare, A., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Cocconcelli, P. S., Fernández Escámez, P. S., Maradona, M. P., Querol, A., Sijtsma, L., Suarez, J. E., Sundh, I., Vlak, J., Barizzone, F., Hempen, M., Correia, S., & Herman, L. (2022). Update of the list of QPS-recommended microbiological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA 16: Suitability of taxonomic units notified to EFSA until March 2022. *EFSA Journal*, 20(7), e07408. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7408>
- Fenster, K., Freeburg, B., Hollard, C., Wong, C., Rønhave Laursen, R., & Ouwehand, A. C. (2019). The Production and delivery of probiotics: A review of a practical approach. *Microorganisms*, 7(3), 83. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7030083>
- Hammes, W. P., & Hertel, C. (2014). The genera *Lactococcus* and *Pediococcus*. In M. Dworkin (Ed.), *The Prokaryotes* (pp. 177–237). Springer.
- Hussain, N., Tariq, M., Saris, P.E.J., & Zaidi, A. (2021) Evaluation of the probiotic and postbiotic potential of lactic acid bacteria from artisanal dairy products against pathogens. *Journal of Infection in Developing Countries*, 15, 102–112. <https://doi.org/10.3855/jidc.13404>
- Kaur Sidhu, P., & Nehra, K. (2021). *Bacteriocins of lactic acid bacteria as potent antimicrobial peptides against food pathogens*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95747>
- Khemariya, P., Singh, S., Nath, G., & Gulati, A. K. (2017). Probiotic *Lactococcus lactis*: A review. *Turkish Journal of Agriculture — Food Science and Technology*, 5(6), 556–562. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i6.556-562.690>
- Kimoto-Nira, H., Suzuki, C., Sasaki, K., Kobayashi, M., & Mizumachi, K. (2010). Survival of a *Lactococcus lactis* strain varies with its carbohydrate preference under in vitro conditions

- simulated gastrointestinal tract. *International Journal of Food Microbiology*, 143(3), 226–229. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.033>
- Kondrotiene, K., Zavistanaviciute, P., Aksomaitiene, J., Novoslavskij, A., & Malakauskas, M. (2024). *Lactococcus lactis* in dairy fermentation-health-promoting and probiotic properties. *Fermentation*, 10(1), 16. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010016>
- Lauková, A., Maďar, M., Zábolyová, N., Troscianczyk, A., & Pogány Simonová, M. (2024). Fortification of goat milk yogurts with encapsulated postbiotic active *Lactococci*. *Life*, 14(9), 1147. <https://doi.org/10.3390/life14091147>
- Mathur, S., & Singh, R. (2005). Antibiotic resistance in food lactic acid bacteria - A review. *International Journal of Food Microbiology*, 105(3), 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.03.008>
- Mafe, A.N., Iruoghene Edo, G., Akpoghelie, P.O., Gaaz, T., S., Yousif E., Zainulabdeen K., Isoje E. F., Igbuku U. A., Opiti R. A., Garba Y., Essaghah A. E. A., Ahmed D. S., Umar H. (2025). Probiotics and food bioactives: Unraveling their impact on gut microbiome, inflammation, and metabolic health. *Probiotics & Antimicrob Proteins*, 17, 1851–1892. <https://doi.org/10.1007/s12602-025-10452-2>
- Minj, J., Chandra, P., Paul, C., & Sharma, R. K. (2020). Bio-functional properties of probiotic *Lactobacillus*: Current applications and research perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(13), 2207–2224. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1774496>
- Nagy, E., & Schuetz, A. (2018). Advancing MALDI-TOF MS applications in anaerobic bacteriology. *Anaerobe*, 54, 189–190. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2018.10.010>
- Noun, M., Akoumeh, R., & Abbas, I. (2022). Cell and tissue imaging by TOF-SIMS and MALDI-TOF: An overview for biological and pharmaceutical analysis. *Microscopy and Microanalysis*, 28(1), 1–26. <https://doi.org/10.1017/S1431927621013593>
- Reynolds, P. E. (1989). Structure, biochemistry and mechanism of action of glycopeptide antibiotics. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 8(11), 943–950. <https://doi.org/10.1007/BF01967563>
- Saarela, M., Mogensen, G., Fondén, R., Mättö, J., & Mattila-Sandholm, T. (2000). Probiotic bacteria: Safety, functional and technological properties. *Journal of Biotechnology*, 84(3), 197–215. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(00\)00375-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(00)00375-8)
- Sanca, F. M. M., Blanco, I. R., Dias, M., Moreno, A. M., Martins, S. M. M. K., Stephano, M. A., Mendes, M. A., Mendonça, C. M. N., Pereira, W. A., Azevedo, P. O. S., Gierus, M., & Oliveira, R. P. S. (2023). Antimicrobial activity of peptides produced by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* on swine pathogens. *Animals*, 13(15), 2442. <https://doi.org/10.3390/ani13152442>
- Shah, A. B., Baiseitova, A., Zahoor, M., Ahmad, I., Ikram, M., Bakhsh, A., Shah M. A., Ali I., Idress M., Ullah R., Al-Zharani, M. (2024). Probiotic significance of *Lactobacillus* strains: A comprehensive review on health impacts, research gaps, and future prospects. *Gut Microbes*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2431643>
- Staronenkova, M.A., Chikhalina, T.V., & Namsaraev, Z.B. (2023). Russian market of enzyme preparations and microorganisms for the food industry. *Nanotechnol Russia*, 18, 475–479. <https://doi.org/10.1134/S2635167623700349>
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Lin, M. (2022). Research progress of fermented functional foods and protein factory-microbial fermentation technology. *Fermentation*, 8(12), 688. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120688>
- Tang, T., & Leisner, J. (2024). Bacteriocin antagonistic potentials of *Lactococcus cremoris* and *Lactococcus lactis* isolates from different habitats. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10361-w>
- Tenea, G. N., Hurtado, P., & Ortega, C. (2018). Inhibitory effect of substances produced by native *Lactococcus lactis* strains of tropical fruits towards food pathogens. *Preventive Nutrition and Food Science*, 23(3), 260–268. <https://doi.org/10.3746/pnf.2018.23.3.260>
- Venegas-Ortega, M.G., Flores-Gallegos, A.C., Martínez-Hernández, J.L., Aguilar, C.N. and Nevárez-Moorillón, G.V. (2019). Production of bioactive peptides from lactic acid bacteria:

- A sustainable approach for healthier foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 1039–1051. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12455>
- Walsh, C. T., Fisher, S. L., Park, I. S., Prahalad, M., & Wu, Z. (1996). Bacterial resistance to vancomycin: Five genes and one missing hydrogen bond tell the story. *Chemistry & Biology*, 3(1), 21–28. [https://doi.org/10.1016/s1074-5521\(96\)90079-4](https://doi.org/10.1016/s1074-5521(96)90079-4)
- Wu, F., Xie, X., Du, T., Jiang, X., Miao, W., & Wang, T. (2023). *Lactococcus lactis*, a bacterium with probiotic functions and pathogenicity. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(12), 325. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03771-5>

REFERENCES

- Bibarsova, A. A., Semenova, E. F., Zolkina, N. G., Moiseeva, I. Ya., Stepanova, A. P., & Lovtsova, L.B. (2022). *Strain of bacteria Lactococcus lactis subsp. cremoris 36 RCAM 05396 used in the production of fermented milk dietary products* (Patent No. RU2780155C1). Penza State University. <https://patents.google.com/patent/RU2780155C1/ru>. (In Russ.)
- Guseva, T. B., Soldatova, S. Yu., & Karanyan, O. M. (2021). Organoleptic evaluation of canned milk products: Features of conducting and interpreting results. *Tovaroved Prodovol'stvennykh Tovarov*, (10), 726–729. <https://doi.org/10.33920/igt-01-2110-01>. (In Russ.)
- Kitaevskaia, S. V. (2015). Study of the ability of lactic acid bacteria to produce lipolytic enzymes. *Bulletin of Kazan Technological University*, 18(18), 256–258. (In Russ.)
- Kushch, I. V., Bairov, A. L., & Udavliev, D. I. (2021). Modern methods of isolation and identification of microorganisms in food products. *Veterinary pathology*, 4(78), 49–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.25690/VETPAT.2021.91.53.002>.
- Petrov, A. N., Matveenko, A. S., & Strizhko, M. N. (2013). Study of microorganism strains with β -galactosidase activity and their analysis. *Technique and Technology of Food Production*, (1), 16–20. (In Russ.)
- Angelakis, E., Million, M., Henry, M. and Raoult, D. (2011), Rapid and accurate bacterial identification in probiotics and yoghurts by MALDI-TOF mass spectrometry. *Journal of Food Science*, 76, M568-M572. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02369.x>
- Barbosa, J. P., Trindade, D. P. A., Martins, E. M. F., & Tette, P. A. S. (2022). Lactic acid bacteria isolated from fruits: A review on methods for evaluation of probiotic potential. *Journal of Food and Nutrition Research*, 10(10), 711–726. <https://doi.org/10.12691/jfnr-10-10-9>.
- Bintsis T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, 4(4), 665–684. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.4.665>
- Cotter, P. D., Hill, C., & Ross, R. P. (2005). Bacteriocins: developing innate immunity for food. *Nature Reviews Microbiology*, 3(10), 777–788. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1273>
- De Chiara, I., Marasco, R., Della Gala, M., Fusco, A., Donnarumma, G., & Muscariello, L. (2024). Probiotic properties of *Lactococcus lactis* Strains isolated from natural whey starter cultures. *Foods*, 13(6), 957. <https://doi.org/10.3390/foods13060957>
- Dec, M., Puchalski, A., Urban-Chmiel, R., Wernicki A. (2016). 16S-ARDRA and MALDI-TOF mass spectrometry as tools for identification of *Lactobacillus* bacteria isolated from poultry. *BMC Microbiology*, 16, 105. <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0732-5>
- De Vuyst, L., & Leroy, F. (2007). Bacteriocins from lactic acid bacteria: production, purification, and food applications. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 13(4), 194–199. <https://doi.org/10.1159/000104752>
- Dunne, C., O'Mahony, L., Murphy, L., Thornton, G., Morrissey, D., O'Halloran, S., Feeney, M., Flynn, S., Fitzgerald, G., Daly, C., Kiely, B., O'Sullivan, G. C., Shanahan, F., & Collins, J. K. (2001). In vitro selection criteria for probiotic bacteria of human origin: Correlation with in vivo findings. *American Journal of Clinical Nutrition*, 73(2 Suppl), 386S–392S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.2.386s>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), Koutsoumanis, K., Allende, A., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., Davies, R., De Cesare, A., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Cocconcelli, P. S.,

- Fernández Escámez, P. S., Maradona, M. P., Querol, A., Sijtsma, L., Suarez, J. E., Sundh, I., Vlak, J., Barizzone, F., Hempen, M., Correia, S., & Herman, L. (2022). Update of the list of QPS-recommended microbiological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA 16: Suitability of taxonomic units notified to EFSA until March 2022. *EFSA Journal*, 20(7), e07408. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7408>
- Fenster, K., Freeburg, B., Hollard, C., Wong, C., Rønhave Laursen, R., & Ouwehand, A. C. (2019). The Production and delivery of probiotics: A review of a practical approach. *Microorganisms*, 7(3), 83. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7030083>
- Hammes, W. P., & Hertel, C. (2014). The genera *Lactococcus* and *Pediococcus*. In M. Dworkin (Ed.), *The Prokaryotes* (pp. 177–237). Springer.
- Hussain, N., Tariq, M., Saris, P.E.J., & Zaidi, A. (2021) Evaluation of the probiotic and postbiotic potential of lactic acid bacteria from artisanal dairy products against pathogens. *Journal of Infection in Developing Countries*, 15, 102–112. <https://doi.org/10.3855/jidc.13404>
- Kaur Sidhu, P., & Nehra, K. (2021). *Bacteriocins of lactic acid bacteria as potent antimicrobial peptides against food pathogens*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95747>
- Khemariya, P., Singh, S., Nath, G., & Gulati, A. K. (2017). Probiotic *Lactococcus lactis*: A review. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 5(6), 556–562. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v5i6.556-562.690>
- Kimoto-Nira, H., Suzuki, C., Sasaki, K., Kobayashi, M., & Mizumachi, K. (2010). Survival of a *Lactococcus lactis* strain varies with its carbohydrate preference under in vitro conditions simulated gastrointestinal tract. *International Journal of Food Microbiology*, 143(3), 226–229. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.033>
- Kondrotiene, K., Zavistanaviciute, P., Aksomaitiene, J., Novoslavskij, A., & Malakauskas, M. (2024). *Lactococcus lactis* in dairy fermentation-health-promoting and probiotic properties. *Fermentation*, 10(1), 16. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010016>
- Lauková, A., Maďar, M., Zábolyová, N., Trościanczyk, A., & Pogány Simonová, M. (2024). Fortification of goat milk yogurts with encapsulated postbiotic active *Lactococci*. *Life*, 14(9), 1147. <https://doi.org/10.3390/life14091147>
- Mathur, S., & Singh, R. (2005). Antibiotic resistance in food lactic acid bacteria—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 105(3), 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.03.008>
- Mafe, A.N., Iruoghene Edo, G., Akpoghelie, P.O., Gaaz, T., S., Yousif E., Zainulabdeen K., Isoje E. F., Igbuku U. A., Opiti R. A., Garba Y., Essaghah A. E. A., Ahmed D. S., & Umar H. (2025). Probiotics and food bioactives: Unraveling their impact on gut microbiome, inflammation, and metabolic health. *Probiotics & Antimicrob Proteins*, 17, 1851–1892. <https://doi.org/10.1007/s12602-025-10452-2>
- Minj, J., Chandra, P., Paul, C., & Sharma, R. K. (2020). Bio-functional properties of probiotic *Lactobacillus*: Current applications and research perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(13), 2207–2224. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1774496>
- Nagy, E., & Schuetz, A. (2018). Advancing MALDI-TOF MS applications in anaerobic bacteriology. *Anaerobe*, 54, 189–190. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2018.10.010>
- Noun, M., Akoume, R., & Abbas, I. (2022). Cell and tissue imaging by TOF-SIMS and MALDI-TOF: An overview for biological and pharmaceutical analysis. *Microscopy and Microanalysis*, 28(1), 1–26. <https://doi.org/10.1017/S1431927621013593>
- Reynolds, P. E. (1989). Structure, biochemistry and mechanism of action of glycopeptide antibiotics. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 8(11), 943–950. <https://doi.org/10.1007/BF01967563>
- Saarela, M., Mogensen, G., Fondén, R., Mättö, J., & Mattila-Sandholm, T. (2000). Probiotic bacteria: Safety, functional and technological properties. *Journal of Biotechnology*, 84(3), 197–215. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(00\)00375-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(00)00375-8)
- Sanca, F. M. M., Blanco, I. R., Dias, M., Moreno, A. M., Martins, S. M. M. K., Stephano, M. A., Mendes, M. A., Mendonça, C. M. N., Pereira, W. A., Azevedo, P. O. S., Gierus, M., & Oliveira, R. P. S.

- (2023). Antimicrobial activity of peptides produced by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* on swine pathogens. *Animals*, 13(15), 2442. <https://doi.org/10.3390/ani13152442>
- Shah, A. B., Baiseitova, A., Zahoor, M., Ahmad, I., Ikram, M., Bakhsh, A., Shah M. A., Ali I., Idress M., Ullah R., Al-Zharani, M. (2024). Probiotic significance of Lactobacillus strains: A comprehensive review on health impacts, research gaps, and future prospects. *Gut Microbes*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2431643>
- Staronenkova, M.A., Chikhalina, T.V., & Namsaraev, Z.B. (2023). Russian market of enzyme preparations and microorganisms for the food industry. *Nanotechnol Russia*, 18, 475–479. <https://doi.org/10.1134/S2635167623700349>.
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., & Lin, M. (2022). Research progress of fermented functional foods and protein factory-microbial fermentation technology. *Fermentation*, 8(12), 688. <https://doi.org/10.3390/fermentation8120688>
- Tang, T., & Leisner, J. (2024). Bacteriocin antagonistic potentials of *Lactococcus cremoris* and *Lactococcus lactis* isolates from different habitats. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12602-024-10361-w>
- Tenea, G. N., Hurtado, P., & Ortega, C. (2018). Inhibitory effect of substances produced by native lactococcus lactis strains of tropical fruits towards food pathogens. *Preventive Nutrition and Food Science*, 23(3), 260–268. <https://doi.org/10.3746/pnf.2018.23.3.260>
- Venegas-Ortega, M.G., Flores-Gallegos, A.C., Martínez-Hernández, J.L., Aguilar, C.N. and Nevárez-Moorillón, G.V. (2019). Production of bioactive peptides from lactic acid bacteria: A sustainable approach for healthier foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18, 1039–1051. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12455>
- Walsh, C. T., Fisher, S. L., Park, I. S., Prahalad, M., & Wu, Z. (1996). Bacterial resistance to vancomycin: Five genes and one missing hydrogen bond tell the story. *Chemistry & Biology*, 3(1), 21–28. [https://doi.org/10.1016/s1074-5521\(96\)90079-4](https://doi.org/10.1016/s1074-5521(96)90079-4)
- Wu, F., Xie, X., Du, T., Jiang, X., Miao, W., & Wang, T. (2023). *Lactococcus lactis*, a bacterium with probiotic functions and pathogenicity. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(12), 325. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03771-5>

ОБ АВТОРАХ

Каночкина Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии и технологии продуктов биоорганического синтеза Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ) (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11), ORCID: <https://orcid.org/000-0001-6077-5957>, Researcher ID: PLC-7976-2026, SPIN-код: 2584-6474, kanoch@yandex.ru

Вольнова Екатерина Романовна, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии и технологии продуктов биоорганического синтеза Российского биотехнологического университета (РОСБИОТЕХ) (125080, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0015-446X>, Scopus ID: 57210195443, Researcher ID: ABW-2963-2022, SPIN-код: 6202-0966, volnovaer@mgupp.ru

ABOUT THE AUTHORS

Maria Sergeevna Kanochkina, Cand. Sci. (Technology), Associate Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11 Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/000-0001-6077-5957>, Researcher ID: PLC-7976-202, SPIN-код: 2584-6474, kanoch@yandex.ru

Ekaterina Romanovna Volnova, Cand. Sci. (Technology), Associate Professor, Department of Biotechnology and Technology of Bioorganic Synthesis Products, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11 Volokolamsk Highway, Moscow, 125080, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0015-446X>, Scopus ID: 57210195443, Researcher ID: ABW-2963-2022, SPIN-код: 6202-0966, volnovaer@mgupp.ru

Компьютерное моделирование процесса распылительной сушки молока при конвективно-радиационном энергоподводе

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова (РЭУ им. Г. В. Плеханова), г. Москва, Российская Федерация

М. Н. Орешина, С. А. Малази

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Марина Николаевна Орешина
E-mail: Oreshina.MN@rea.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Орешина, М.Н., & Малази, С. (2025). Компьютерное моделирование процесса распылительной сушки молока при конвективно-радиационном энергоподводе. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 77-90. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.672>

ПОСТУПИЛА: 06.07.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Распылительная сушка молока является ключевой технологической операцией, определяющей качество, стабильность и энергоэффективность производства сухих молочных продуктов. Несмотря на широкое применение CFD-моделирования, большинство существующих моделей недостаточно учитывают внутренние структурные преобразования капли и влияние комбинированного конвективно-радиационного энергоподвода на кинетику тепло- и массопереноса. Эти факторы ограничивают прогностическую точность расчетов и возможности оптимизации режимов сушки.

Цель: Разработка и численная реализация CFD-ориентированной математической модели распылительной сушки молока, позволяющей описывать изменение температуры и влагосодержания капли при конвективно-радиационном энергоподводе и определять рациональные параметры технологического режима.

Материалы и методы: Модель основана на системе дифференциальных уравнений теплопроводности, диффузии влаги и кинетического уравнения структурных изменений частицы. Численное решение реализовано на языке Python в среде PyCharm с использованием библиотек SciPy, NumPy и Matplotlib. Расчеты выполнены для одиночной капли молока при различных значениях удельного теплового потока в диапазоне 0,000156–0,000273 Дж и времени обработки 120 с. Структурные и морфологические изменения учитывались посредством уточняющего коэффициента K_1 .

Результаты: Получены зависимости температуры поверхности капли и концентрации влаги от уровня энергоподвода. Установлено, что увеличение теплового потока приводит к росту температуры поверхности с 331 до 360 К, однако не обеспечивает пропорционального ускорения обезвоживания. Во всех исследованных режимах конечное влагосодержание достигает 4,9–5,1 %. Введение структурного коэффициента K_1 позволило корректно описать замедление диффузии влаги на поздних стадиях сушки, связанное с формированием поверхностного слоя.

Выводы: Применение повышенных уровней энергоподвода нецелесообразно с точки зрения энергоэффективности и может приводить к избыточной термической нагрузке без существенного выигрыша в скорости сушки. Разработанная модель может быть использована для оптимизации режимов распылительной сушки, проектирования сушильного оборудования и создания цифровых двойников технологических процессов обезвоживания пищевых эмульсий и суспензий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

математическое моделирование; тепловые и массообменные процессы; распылительная сушка молока; моделирование в среде Python; конвективно-радиационный энергоподвод

Computer Modeling of Milk Spray Drying under Combined Convective and Radiative Heating

Plekhanov Russian University
of Economics, Moscow,
Russian Federation

Marina N. Oreshina, Samuel A. Malazi

CORRESPONDENCE:

Marina N. Oreshina

E-mail: Oreshina.MN@rea.ru

FOR CITATIONS:

Oreshina, M.N., & Malazi, S. (2025).
Computer modeling of milk spray
drying under combined convective and
radiative heating. *Storage and Processing
of Farm Products*, 33(4), 77-90.
[https://doi.org/10.36107/
spfp.2025.4.672](https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.672)

RECEIVED: 06.07.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Spray drying is a critical unit operation in milk powder production, strongly affecting product quality, storage stability, and process energy efficiency. Although computational fluid dynamics (CFD) has been widely applied to drying analysis, many existing models do not adequately capture internal droplet structural transformations or the effect of combined convective and radiative heating on heat and mass transfer kinetics. As a result, their predictive capability and usefulness for process optimization remain limited.

Purpose: To develop and numerically implement a CFD-oriented mathematical model of milk spray drying that describes the evolution of droplet temperature and moisture content under combined convective and radiative heating and identifies rational operating conditions.

Materials and Methods: The model was formulated as a system of differential equations describing heat conduction, moisture diffusion, and the kinetics of structural transformations within the particle. Numerical simulations were performed in Python (PyCharm environment) using the SciPy, NumPy, and Matplotlib libraries. Calculations were carried out for a single milk droplet under different specific heat input levels ranging from 0.000156 to 0.000273 J over a treatment time of 120 s. Structural and morphological changes were incorporated through a correction coefficient, K_1 .

Results: The model generated temperature and moisture profiles as functions of energy input. Increasing the heat input raised the droplet surface temperature from 331 to 360 K, but did not result in a proportional increase in drying intensity. In all tested regimes, the final moisture content remained within a narrow range of 4.9-5.1%. Incorporation of the structural coefficient K_1 made it possible to adequately describe the reduction in moisture diffusivity at the final stage of drying associated with crust formation at the particle surface.

Conclusion: Higher energy input levels appear unjustified from an energy-efficiency perspective, as they may impose excessive thermal stress without providing a substantial increase in drying rate. The proposed model can be used to optimize spray-drying conditions, support dryer design, and develop digital twins of dehydration processes for food emulsions and suspensions.

KEYWORDS

mathematical modeling; heat and mass transfer; milk spray drying; Python-based simulation; convective-radiative heating

ВВЕДЕНИЕ

Распылительная сушка молока является одной из ключевых технологических операций в производстве сухих молочных продуктов, определяющей их микробиологическую стабильность, функциональные свойства и срок хранения (Jakkamsetty et al., 2024; Muehlhoff et al., 2013). Качество конечного порошка в значительной степени формируется на стадии обезвоживания отдельных капель, где одновременно протекают процессы тепло- и массопереноса, фазовые превращения и структурные изменения многокомпонентной пищевой системы (Pugliese et al., 2017; Alamilla-Beltrán et al., 2005).

С практической точки зрения распылительная сушка характеризуется высокой энергоемкостью и чувствительностью к режимным параметрам, что обуславливает необходимость точного управления температурой, скоростью потоков и временем пребывания частиц в сушильной камере (Dantas et al., 2024; Maksimenko et al., 2018). Неправильный выбор теплового режима приводит либо к недоосушке и ухудшению стабильности продукта, либо к термической деградациии белково-липидных компонентов (Schmitz-Schug et al., 2016).

Современные исследования доказывают, что экспериментальная оптимизация режимов распылительной сушки является трудоемкой и экономически затратной, особенно при переходе к новым конструкциям сушильных установок и комбинированным способам нагрева (Woo et al., 2008; Li & Zbicinski, 2005). В связи с этим вычислительная гидродинамика (CFD) рассматривается как основной инструмент анализа и проектирования распылительных сушилок (Langrish & Kockel, 2001; Lin & Chen, 2006). CFD-модели позволяют прогнозировать распределение скоростей, температур и влажностного содержания, а также анализировать траектории движения отдельных капель в газовом потоке.

Однако анализ литературных данных показывает, что большинство существующих CFD-моделей ориентировано преимущественно на описание внешней аэродинамики и теплообмена, в то время как внутренние процессы в капле, включая изменение структуры и нелинейную кинетику диффузии влаги, учитываются в упрощенном виде (Mohammed, 2003; Poozesh et al., 2018). Морфологические изменения частиц в процессе сушки экспериментально

зафиксированы (Alamilla-Beltrán et al., 2005), однако их интеграция в инженерные расчетные модели до настоящего времени остается ограниченной. Аналогичная проблема отмечается в работах, посвященных многоуровневому моделированию распылительных сушилок (Langrish, 2009).

Дополнительную сложность представляет применение комбинированного конвективно-радиационного энергоподвода, при котором радиационная составляющая существенно влияет на температурные градиенты в капле и кинетику испарения влаги (Maksimenko et al., 2015; Aleksanyan et al., 2015). В литературе данный режим рассмотрен фрагментарно, преимущественно в контексте конструктивных решений сушильных установок, тогда как его влияние на внутреннюю структуру высушиваемых частиц описано недостаточно.

Таким образом, в современной научной литературе сохраняется методологический пробел, связанный с отсутствием CFD-ориентированных моделей распылительной сушки молока, одновременно учитывающие конвективно-радиационный энергоподвод, внутреннюю тепло-массообменную кинетику капли и структурные преобразования высушиваемого материала. В связи с этим целью настоящего исследования является разработка математической модели распылительной сушки молока с использованием CFD-подхода, позволяющей описывать изменение температуры и концентрации влаги в капле при комбинированном конвективно-радиационном энергоподводе с учетом структурных преобразований материала, а также определение рациональных параметров технологического режима сушки.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Процесс распылительной сушки относится к классу сложных многофазных тепло-массообменных процессов, в которых одновременно реализуются аэродинамическое диспергирование, конвективный и радиационный теплообмен, фазовые переходы и структурные преобразования высушиваемого материала (Woo et al., 2008; Langrish, 2009). Для его описания в научной литературе сформировался широкий спектр математических моделей, разли-

чающихся по пространственной размерности, характеру учета фаз и степени физической детерминированности.

Балансовые (0D) и одномерные (1D) модели, основанные на уравнениях сохранения массы и энергии, широко применяются для предварительной оценки интегральных параметров процесса, однако не позволяют учитывать пространственную неоднородность температурных и концентрационных полей, критически важную для анализа локальных перегревов и зон недоосушки (Li & Kobayashi, 2005; Putranto & Chen, 2016). В связи с этим для решения задач проектирования и оптимизации распылительных сушилок преимущественное распространение получили пространственно-распределенные модели (2D/3D), реализуемые в рамках вычислительной гидродинамики (CFD) (Langrish & Kockel, 2001; Lin & Chen, 2006).

В CFD-подходе газовая фаза, как правило, описывается в эйлеровой системе координат, тогда как дисперсная фаза может моделироваться либо в эйлеровом, либо в лагранжевом представлении. Наиболее адекватным для распылительной сушки признан гибридный подход Эйлера — Лагранжа, при котором каждая капля рассматривается как индивидуальный объект с собственной тепловой и массопереносной историей (Woo et al., 2008; Li & Zbicinski, 2005). Такой подход позволяет учитывать распределение размеров капель, траектории их движения и взаимодействие с газовым потоком.

Однако, как показывают исследования Mohammed (2003) и Poozesh et al. (2018), даже в рамках CFD-моделирования большинство моделей ограничиваются упрощенным описанием внутренних процессов в капле, предполагая постоянство коэффициентов диффузии и пренебрегая динамикой структурных превращений. Между тем экспериментальные работы по морфологии частиц при распылительной сушке демонстрируют, что формирование поверхностной корки и пористой структуры существенно изменяет кинетику влагопереноса (Alamilla-Beltrán et al., 2005).

Дополнительную сложность представляет учет радиационной составляющей нагрева. В работах, посвященных конвективно-радиационным сушильным установкам, показано, что инфракрасное излучение формирует иные температурные гра-

диенты в частице по сравнению с исключительно конвективным нагревом, что влияет на скорость испарения и структурообразование (Maksimenko et al., 2015; Aleksanyan et al., 2015). Однако интеграция радиационного теплообмена в модели одиночной капли в большинстве случаев остается упрощенной.

Многоуровневые математические модели распылительных сушилок, предлагаемые Langrish (2009), подтверждают, что для повышения прогностической точности необходимо учитывать взаимосвязь между тепловыми режимами, кинетикой испарения и структурными преобразованиями материала. При этом полностью детерминированное описание всех микропроцессов на практике оказывается чрезмерно сложным и вычислительно затратным, что приводит к использованию полуэмпирических параметров и корректирующих коэффициентов (Putranto & Chen, 2016).

Современное теоретическое развитие моделей распылительной сушки формируется в направлении гибридных физико-математических схем, сочетающих строгие уравнения тепломассопереноса с параметризацией трудноформализуемых структурных эффектов. В рамках данного подхода введение уточняющих коэффициентов, отражающих изменение диффузионных и реологических свойств высушиваемого материала, рассматривается как обоснованный компромисс между физической строгостью и инженерной применимостью модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования являлся процесс распылительной сушки молока при конвективно-радиационном энергоподводе. В качестве расчетного элемента рассматривалась одиночная капля молока, образованная в результате распыления в воздушной среде сушильной камеры. Такой подход соответствует распространенной практике CFD-моделирования распылительных процессов и позволяет детально анализировать кинетику тепломассопереноса и фазовых превращений (Mohammed, 2003; Woo et al., 2008; Lin & Chen, 2006).

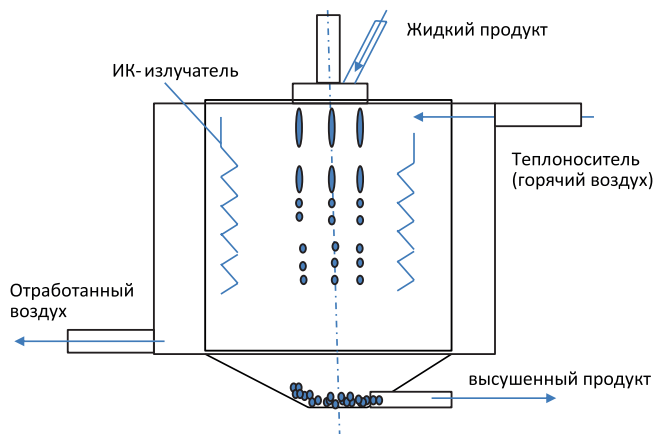
Схема движения высушиваемого продукта и воздуха в корпусе распылительной сушилки приведена

Рисунок 1

Схема движения высушиваемого продукта и воздуха в распылительной конвективно-радиационной сушилке

Figure 1

Schematic Diagram of the Movement of the Dried Product and Air in a Spray Convective-Radiative Drier



на Рисунке 1. При этом предполагается, что распылительные форсунки не вращаются.

Математическая постановка задачи

Модель процесса основана на системе связанных дифференциальных уравнений, описывающих:

- (1) движение капли в газовом потоке на основе преобразованного уравнения Навье — Стокса,
- (2) теплопроводность в капле с учетом фазового перехода,
- (3) диффузию влаги внутри капли,
- (4) кинетику структурных преобразований материала.

Движение капли в газовом потоке на основе преобразованного уравнения Навье — Стокса описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \rho \frac{dV_x}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot V_x + \rho \cdot g_x; \\ \rho \frac{dV_y}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot V_y + \rho \cdot g_y; \\ \rho \frac{dV_z}{d\tau} &= -\frac{\partial P}{\partial Z} + \mu \cdot \nabla^2 \cdot V_z + \rho \cdot g_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\frac{dV_i}{d\tau}$ — производные скорости высушиваемой в потоке воздуха капли молока m/c^2 ; ρ — плотность молока, $кг/м^3$;

$\rho \frac{dV_i}{d\tau}$ — составляющая, определяющая движение капли молока, переносимой воздушным потоком;
 $-\frac{\partial P}{\partial K}$ — изменения распределения давления по координате, воздействующего на каплю молока, градиент определяет величину аэродинамической силы;
 X, Y, Z — координата (граничные значения определяются параметрами камеры распылительной сушилки), м;
 $\mu \cdot \nabla^2 \cdot V_i$ — составляющая, показывающая перемещение жидкости (капли молока) в пространстве;
 μ — коэффициент динамической вязкости молока, $Па \cdot c$;
 ∇^2 — оператор Лапласа;
 $\rho \cdot g_i$ — результат действия внешних сил (без учета силы трения $F_{тр}$ ввиду её незначительного значения), выраженный действием ускорения свободного падения, Н.

На Рисунке 2 представлена схема действия сил на каплю высушиваемого продукта при её движении по сушильной камере

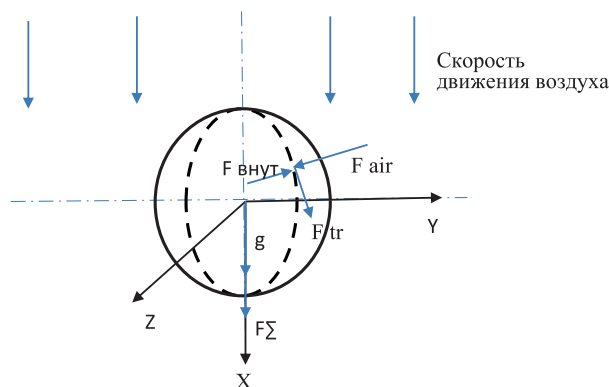
Температурные поля в жидкой и твердой фазах капли описывались уравнениями Фурье — Кирхгофа. Массообмен влаги моделировался на основе усредненного диффузионного уравнения с эффективным коэффициентом диффузии. Структурные изменения учитывались через кинетическое уравнение для структурного параметра ϕ , отражающего

Рисунок 2

Схема действия сил на каплю высушиваемого продукта при её движении по сушильной камере

Figure 2

Diagram of the Forces Acting on a Droplet of a Dried Product as it Moves Through a Drying Chamber



степень перехода жидкой фазы в пористую твердую матрицу.

Теплопроводность в капле с учетом фазового перехода описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{m2}}{\partial \tau} &= a_2 \cdot \frac{\partial T_{m2}(x,\tau)}{\partial \tau^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < r; \\ \frac{\partial T_{m1}}{\partial \tau} &= a_1 \cdot \frac{\partial T_{m1}(x,\tau)}{\partial \tau^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < r, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_{m1} — распределение температуры в жидкой фазе, °C;

T_{m2} — распределение температур в образующейся твердой фазе, °C;

a_1 — коэффициент температуропроводности для жидкой фазы, м²/с;

a_2 — коэффициент температуропроводности для твердой фазы, м²/с;

r — радиус капли, м;

τ — время, с.

Диффузия влаги внутри капли описывается уравнением:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = D_m \nabla^2 C_m, \quad (3)$$

где C_m — массовая концентрация влаги в молоке относительно объема капли, кг/м³;

D_m — усредненный коэффициент диффузии влаги в молоке, м²/с.

Для учета влияния морфологических и реологических преобразований на кинетику влагопереноса был введен уточняющий коэффициент K_1 , корректирующий коэффициент диффузии. Такой подход соответствует полуэмпирическим стратегиям моделирования, применяемым в инженерных задачах распылительной сушки (Putranto & Chen, 2016; Langrish, 2009).

Кинетика структурных преобразований материала выражается зависимостью:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = K_{стр} \cdot \int_0^\tau T_m, \quad (4)$$

где φ — структурный параметр, отражающий изменение структуры молока;

$K_{стр}$ — коэффициент, определяющий структурные изменения;

$\int_0^\tau T_m$ — изменение температуры за время обработки продукта, °C.

Учет энергоподвода

Полный тепловой поток, подводимый к поверхности капли, определяется как сумма конвективной и радиационной составляющих:

$$Q = Q_{konv} + Q_{rad}, \quad (5)$$

где Q_{konv} — конвективный тепловой поток, который воздействует на каплю молока за счет подаваемого нагретого воздуха, Вт;

Q_{rad} — радиационный тепловой поток, который генерируется ИК-излучателями, Вт.

Конвективный теплообмен рассчитывался по классическим корреляционным зависимостям, а радиационный — на основе заданной плотности излучаемого теплового потока от инфракрасных источников.

Схема миделевого сечения высушиваемой капли молока представлена на Рисунке 3.

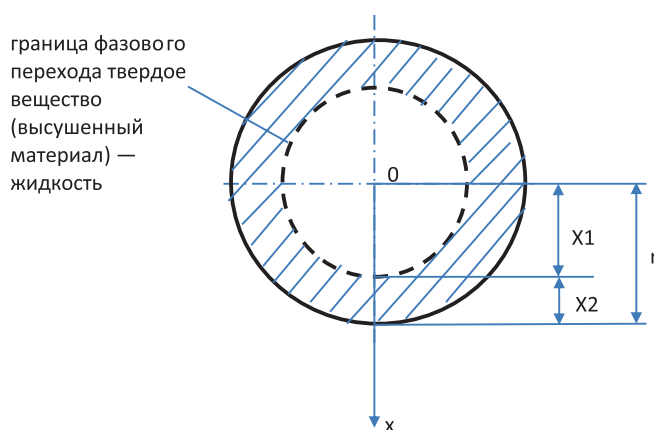
Данная схема показывает продвижение фронта фазового перехода «высушенный материал — жидкость».

Рисунок 3

Схема миделевого сечения высушиваемой капли молока

Figure 3

Schematic Diagram of the Mid-Section of a Drying Milk Droplet



Примечание. x_1, x_2 — границы фазового перехода «жидкость — высушенный материал»; r — начальный радиус капли; пунктирной линией обозначена граница фазового перехода «твердое вещество (высушенный материал) — жидкость».

Note. x_1, x_2 — are the boundaries of the liquid-dried material phase transition; r — is the initial radius of the droplet.

кость» по координате, а также демонстрирует миделевое сечение высушиваемой капли молока с начальным радиусом r .

Приведенная модель используется для определения параметров распылительной сушки при конвективно-радиационном подводе в периоды прогрева и испарения влаги с капли за определенное расчетное время.

Численная реализация

Численное решение системы уравнений выполнялось в среде Python 3.9 с использованием библиотек:

- (1) SciPy — для интегрирования системы ОДУ (метод RK45),
- (2) NumPy — для обработки массивов данных,
- (3) Matplotlib — для визуализации результатов.

Программная реализация осуществлялась в среде PyCharm 2022.3. Пространственная область по радиусу капли дискретизировалась неравномерной сеткой со сгущением узлов вблизи поверхности и фронта фазового перехода. Временное интегрирование выполнялось с автоматическим контролем шага при относительной погрешности 10^{-5} .

Параметры расчетного эксперимента

В расчетах использовались следующие параметры:

- (1) начальная температура капли: 293 К;
- (2) коэффициент теплоотдачи: 100 Вт/(м²·К),
- (3) коэффициент диффузии влаги: $2,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с,
- (4) теплоемкость молока: 3900 Дж/(кг·К),
- (5) масса капли: $1 \cdot 10^{-9}$ кг,
- (6) площадь поверхности капли: $1 \cdot 10^{-6}$ м².

Исследование выполнялось для четырех значений удельного теплового потока:

$$q_n = 0,000156; 0,000195; 0,000234; 0,000273 \text{ Дж.}$$

Продолжительность расчетного эксперимента составляла 120 с, что соответствует стадиям прогрева и интенсивного испарения влаги, согласно литературным данным (Kharkov, 2025).

Анализ результатов

В ходе вычислительного эксперимента были проанализированы:

- (1) динамика температуры поверхности капли,
- (2) изменение средней концентрации влаги,
- (3) влияние коэффициента K_1 на кинетику массопереноса.

Результаты фиксировались с временным шагом 0,1 с и обрабатывались статистически с последующей графической интерпретацией.

Методологические ограничения

Модель реализована для одиночной капли без учета межкапельных взаимодействий, агломерации и полидисперсности факела распыла. Коэффициент диффузии считался постоянным, а влияние структуры учитывалось параметрически через коэффициент K_1 , что соответствует полуэмпирическому уровню детерминированности модели. Рассмотрение изолированной капли без учета коллективных эффектов в факеле распыла (столкновения, агломерация). Таким образом, модель не описывает полномасштабный 3D-процесс в сушильной камере, что ограничивает её прямым переносом на проектирование оборудования без дополнительных калибровок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе выделены временные интервалы стадий сушки молока при температуре греющего пара $T_r = 323$ К (при конвективном энергоподводе): начальный период, соответствующий прогреву капли (0–15 с); квазиравновесное испарение (15–125 с); формирования корки (125–280 с); сушка пористой частицы (280–400 с). В вычислительном эксперименте периоды формирования корки и сушки пористого тела не рассматриваются.

Влияние энергоподвода на изменение температуры капли

В этом подразделе анализируется влияние энергоподвода q_n на динамику температуры капли при фиксированной начальной температуре 293 К.

В результате вычислительного эксперимента выявлены количественные зависимости температуры поверхности капли от удельного теплового потока: $T_{\text{пов}} = f(q_n)$. Установлено, что увеличение q_n от 0,000156 до 0,000273 Дж приводит к росту $T_{\text{пов}}$ от 331 до 360 К. За время обработки 120 с максимальная температура на поверхности капли при каждом q_n соответственно составляет:

при $q_n = 0,000156$ Дж температура на поверхности капли составляет $T_{\text{пов н}} = 331$ К;

при $q_n = 0,000195$ Дж температура на поверхности капли составляет $T_{\text{пов н}} = 340,5$ К;

при $q_n = 0,000234$ Дж температура на поверхности капли составляет $T_{\text{пов н}} = 350$ К;

при $q_n = 0,000273$ Дж температура на поверхности капли составляет $T_{\text{пов н}} = 360$ К.

При рассмотрении температур по стадиям сушки установлено, что при тепловом потоке $q_n = 0,000156$ Дж, изменение температуры поверхности на начальном периоде составляет 293...303 К, в период квазистационарного испарения 303...331 К.

При тепловом потоке $q_n = 0,000195$ Дж изменение температуры поверхности в начальном периоде

составляет 293...307 К, в период квазистационарного испарения — 307...340,5 К.

При $q_n = 0,000234$ Дж изменение температуры поверхности в начальном периоде составляет 293...310 К, в период квазистационарного испарения — 310...350 К.

При $q_n = 0,000273$ Дж изменение температуры поверхности в начальном периоде составляет 293...312 К, в период квазистационарного испарения — 312...360 К.

Прогнозируемые температуры, полученные в результате расчета, соответствуют данным (Mohammed, 2003), введение K_1 улучшает точность, в зависимости от вида высушиваемого продукта.

График изменения температуры поверхности капли при разных значениях теплоты q_n , и начальной температуре поверхности капли $T_{\text{пов н}} = 293$ К (20 °С) представлен на Рисунке 4.

Изменение концентрации влаги при разных значениях энергоподвода

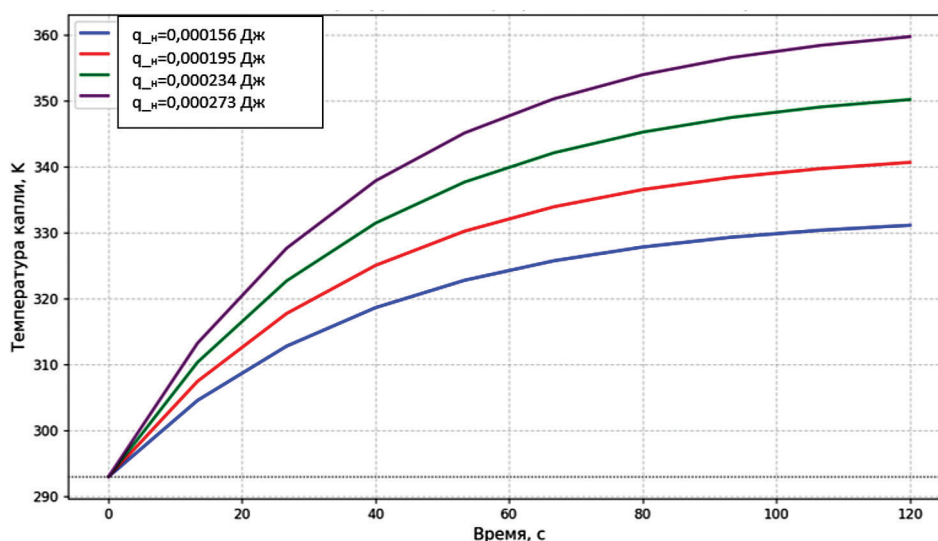
Изменение концентрации влаги на поверхности капли при продолжительности обработки 120 с

Рисунок 4

Изменение температуры на поверхности капли при разных значениях теплоты

Figure 4

Change in Temperature on the Surface of a Droplet at Different Values of Heat



и различных температурах нагрева поверхности капли представлено на Рисунке 5.

Рисунок 5 иллюстрирует динамику изменения средней концентрации влаги в капле C_m для исследуемых режимов.

Установлено, что увеличение q_n от 0,000156 до 0,000273 Дж приводит уменьшению концентрации влаги, соответственно:

при $q_n = 0,000156$ Дж концентрация влаги составляет $C = 4,8...4,9$ %;

при $q_n = 0,000195$ Дж концентрация влаги составляет $C = 4,85...4,95$ %;

при $q_n = 0,000234$ Дж концентрация влаги составляет $C = 4,95...5$ %;

при $q_n = 0,000273$ Дж концентрация влаги составляет $C = 5...5,1$ %.

Принципиальным результатом является достижение во всех случаях конечной влажности в узком диапазоне 4,9–5,1% за расчетное время 120 с. Од-

нако кинетические кривые имеют разный характер: с ростом q_n начальная скорость удаления влаги увеличивается. Эффект замедления процесса при времени обработки более 80 с, моделируемый с помощью уточняющего коэффициента K_1 , качественно соответствует экспериментальным данным по сушке белково-углеводных систем (Schmitz-Schug, 2016), где образование поверхностного слоя снижает скорость диффузии.

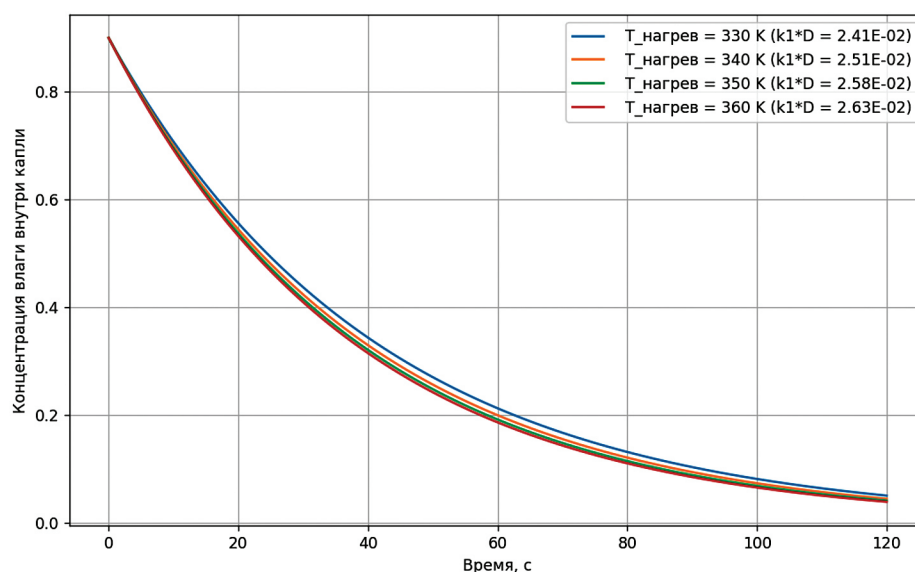
Анализ графиков зависимостей изменения температуры поверхности капли молока и концентрации влаги при времени обработки 120 с показал, что при более мягких режимах обработки нелинейные структурные изменения, вызванные флуктуациями возвратных потоков жидкости, вариациями реологических характеристик и неоднородностью размеров капли при оттоке паров воды с поверхности, обозначенные введением коэффициента K_1 , менее выражены и не оказывают влияния на качество высушенного продукта. Предложенная математическая модель радиационно-конвективной сушки молока, реализованная с использованием сред разработки и редакторов кода на языке Python, описывает изменения температуры поверхности распыленных капель в зави-

Рисунок 5

Изменение концентрации влаги в капле при разных уровнях теплоты, а также при конвективно-радиационном энергоподводе

Figure 5

Change in Moisture Concentration in a Droplet at Different Levels of Heat Input During Convective-Radiative Energy Supply



симости от уровня энергоподвода, динамику концентрации влаги в капле. С учетом определенных допущений (не учитывалось изменение скорости движения капли при обработке, коэффициент диффузии считался постоянным, изменения структуры учитывались с помощью уточняющего коэффициента K_1) данная модель продемонстрировала высокую адекватность в описании процесса.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают, что разработанная CFD-модель, основанная на гибридном подходе Эйлера — Лагранжа и системе связанных уравнений теплопроводности, диффузии влаги и структурных преобразований, адекватно описывает кинетику распылительной сушки молока в условиях конвективно-радиационного энергоподвода. Наблюдаемая динамика изменения температуры поверхности капли и концентрации влаги соответствует общим закономерностям процесса, зафиксированным в экспериментальных исследованиях распылительной сушки пищевых эмульсий (Алексанян, 2014; Максименко, 2018).

Установлено, что рост плотности теплового потока приводит к увеличению температуры поверхности капли, однако не сопровождается пропорциональным ускорением удаления влаги. Данный эффект указывает на наличие внутренних диффузионных ограничений, формирующихся на поздних стадиях сушки. Аналогичное поведение кинетических кривых отмечается в работах, посвященных экспериментальному анализу распылительной сушки многокомпонентных пищевых систем, где образование поверхностной корки снижает интенсивность массопереноса (Алексанян, 2014; Максименко, 2018).

Введение уточняющего коэффициента K_1 позволило воспроизвести эффект замедления диффузии влаги, связанный с морфологическими и структурными изменениями капли в процессе обезвоживания. Такой подход согласуется с экспериментальными наблюдениями морфологической эволюции частиц при распылительной сушке, представленными в работе (Alamilla-Beltrán, 2005), где показано, что формирование пористой и частично стеклообразной оболочки существенно изменяет механизм влагопереноса. В отличие от упрощенных геометрических моделей, приме-

няемых в ряде CFD-исследований, предложенная модель учитывает нелинейный характер структурных преобразований в параметризованной форме, что повышает её прогностическую устойчивость.

Сравнение расчетных результатов с литературными экспериментальными данными демонстрирует качественную и количественную сопоставимость температурных и влажностных профилей. Это подтверждает, что применение лагранжевого описания движения капель в сочетании с внутренней теплопереносной моделью является методологически обоснованным для прогнозирования параметров распылительной сушки, что согласуется с выводами, сделанными в работах по CFD-моделированию распылительных процессов.

Отдельного внимания заслуживает влияние конвективно-радиационного энергоподвода. Полученные результаты показывают, что радиационная составляющая способствует формированию более высоких температурных градиентов в поверхностных слоях капли, однако при превышении определенного уровня энергоподвода она не приводит к существенному снижению конечного влагосодержания. Это указывает на существование рационального диапазона тепловых режимов, за пределами которого происходит лишь увеличение термической нагрузки на продукт без технологического выигрыша.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что оптимизация распылительной сушки должна базироваться не на максимизации энергоподвода, а на учете сопряженного влияния тепловых режимов и структурной кинетики материала. Полученные закономерности расширяют представление о механизмах теплопереноса в каплях молока и дополняют экспериментальные данные, представленные в литературе (Алексанян, 2014; Максименко, 2018; Alamilla-Beltrán, 2005).

С практической точки зрения разработанная модель может служить инструментом для выбора рациональных режимов работы распылительных сушилок, а также для предварительного анализа конструктивных решений при проектировании сушильного оборудования. В научном контексте полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейшего развития параметризованных CFD-моделей, ориентированных на интеграцию

тепловых, диффузионных и структурных эффектов в единой расчетной схеме.

Ограничения исследования

Допущение о постоянстве коэффициента диффузии D_m является источником основной систематической погрешности. Это ограничение свойственно многим моделям, не относящимся к полностью детерминированным. Кроме того, полуэмпирический характер коэффициента K_1 , требует индивидуального определения для каждого конкретного состава сырья.

В исследовании рассмотрена изолированная капля без учета коллективных эффектов в факеле распыла (столкновения, агломерация). Таким образом, модель не описывает полный 3D-процесс в сушильной камере, что не позволяет напрямую перенести её для проектирования оборудования без дополнительных корректировок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформирован и реализован расчетный каркас CFD-ориентированного описания распылительной сушки молока при комбинированном конвективно-радиационном энергоподводе, в котором внутренняя эволюция капли рассматривается как связанная задача теплопереноса, влагопереноса и структурной кинетики. Тем самым закрывается принципиальный для инженерной практики методологический разрыв: режимы сушки обсуждаются не как набор эмпирических «настроек», а как следствие согласованной динамики температуры, влагосодержания и формирования структуры материала.

Существенным результатом является не столько частный набор расчетных кривых, сколько выявленная логика отклика системы на усиление энергоподвода: на исследованном диапазоне режимов рост тепловой нагрузки закономерно повышает температурный уровень частицы, однако не обеспечивает соразмерного выигрыша по степени обезвоживания, поскольку на поздних стадиях процесс начинает определяться внутренними диффузионными ограничениями. Введение структурного поправочного коэффициента выступает здесь не формальным параметром, а необходимым эле-

ментом модели, позволяющим корректно отразить замедление массопереноса при формировании поверхностного слоя и тем самым повысить прогнозную адекватность расчетов.

Практическая ценность предложенного подхода состоит в его пригодности для обоснования рациональных режимов и предварительной оценки энергоэффективности распылительной сушки при комбинированном нагреве, а также для последующего развития с перспективой создания вычислительных модулей, используемых в проектировании и цифровых двойниках технологических процессов. Одновременно следует подчеркнуть границы применимости: модель построена на допущениях об изолированной капле и параметрическом учете структуры, не включая коллективных эффектов факела распыла и полномасштабной 3D-аэродинамики камеры; эти направления, вместе с идентификацией структурных параметров для конкретных составов сырья, образуют ближайшую и методологически оправданную программу дальнейших исследований.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Марина Николаевна Орешина: концептуализация; методология; программное обеспечение; проведение исследования; верификация данных; администрирование данных; создание черновика рукописи; создание рукописи и ее редактирование; визуализация.

Самуэль Али Малази: концептуализация; методология; проведение исследования; формальный анализ; создание черновика рукописи; создание рукописи и ее редактирование; визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Marina N. Oreshina: conceptualization; methodology; software; investigation; validation; data curation; writing – original draft preparation; writing – review & editing; visualization.

Samuel Ali Malazi: conceptualization; methodology; investigation; formal analysis; writing – original draft preparation; writing – review & editing; visualization.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексян, И.Ю., Максименко, Ю.А., Губа, О.Е. (2014). Исследование кинетики и совершенствование процесса распылительной сушки меланжа. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, (3), 43–47.
- Алексян, И.Ю., Максименко, Ю.А., Феклунова, Ю.С., Пшеничная Н.Э. (2015). Конвективно-радиационная распылительная сушилка для жидких и пастообразных пищевых материалов. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 3(7), 57–61.
- Губа, О.Е., Максименко, Ю.А. (2014). Исследование кинетики процесса распылительной сушки меланжа. *Вестник АГТУ*, 2(58), 92–96.
- Дантас А., Пьелла-Рифа М., Понтес Коста Д., Фелипе Х. Гоу П. (2024). Инновации в технологии распылительной сушки для производства жидких пищевых продуктов: дизайн, механизмы и возможности применения. *Прикладные исследования в области пищевых продуктов*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
- Максименко, Ю.А., Феклунова, Ю.С., Пшеничная, Н.Э., Шакегов, Н.М. (2015). Установка конвективно-радиационной распылительной сушки. *Естественные и технические науки*, 10(88), 352–354.
- Максименко, Ю.А., Теличкина, Э.Р., Теличкин, Р.С. (2018). Анализ эффективности работы распылительных сушилок при обезвоживании растительных материалов. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 3(23), 55–62.
- Харьков, В. В., Лаврова, К. З. (2025). Численное исследование процесса распылительной сушки молока. *Вестник МГТУ*, 28(2), 263–272. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-263-272>
- Pshenichnaya, N.E., Shakesov, N.M. (2015). Installation of convective radiation spray drying. *Natural and Technical Sciences*, 10(88), 352–354.
- Пшеничная, Н. Е., Шакегов, Н.М. (2015). Установка конвективной радиационно-распылительной сушки. *Естественные и технические науки*, 10(88), 352–354.
- Alamilla-Beltrán, L., Chanona-Pérez, J.J., Jiménez-Aparicio, A.R., Gutiérrez-López, G.F. (2005). Description of morphological changes of particles along spray drying. *Journal of Food Engineering*, 67, 179–184.
- Jakkamsetty, C., Subramanian, P., Rashidinejad, A. (2024). Spray drying of milk and milk products. *Spray Drying for the Food Industry*, 4, 87–123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00002-8>
- Langrish, T. A. G., Kockel, T. K. (2001). The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling. *Chemical Engineering Journal*, 84, 69–74. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00384-3)
- Langrish, T.A.G., Kota K., A comparison of collision kernels for sprays from one and two-nozzle atomisation systems. (2007). *Chemical Engineering Journal*, 126, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.07.015>
- Langrish, T.A.G., Multi-scale mathematical modelling of spray dryers. (2009). *Journal of Food Engineering*, 93, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.019>
- Langrish, T.A.G., Williams, J., Fletcher, D.F. (2004). Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 821–833. <https://doi.org/10.1205/0263876041596661>
- Li, X., Zbicinski, I. (2005). A sensitivity study on CFD modeling of cocurrent spray-drying process. *Drying Technology*, 23, 1681–1691. <https://doi.org/10.1081/DRT-200065093>
- Li, Z., Kobayashi, N. (2005). Determination of moisture diffusivity by thermo-gravimetric analysis under non-isothermal condition. *Drying Technology*, 23, 1331–1342. <https://doi.org/10.1081/DRT-200059523117997>
- Lin S.X.Q., Chen X.D. (2006), A model for drying of an aqueous lactose droplet using the reaction engineering approach. *Drying Technology*, 24, 1329–1334. <https://doi.org/10.1080/07373930600951091>
- Mohammed, F. (2003) A new approach to modelling of single droplet drying. *Chemical Engineering Science*, 58, 2985–2993. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00161-1)

- Poozesh, S., Lu K., Marsac, P. J. (2018). On the particle formation in spray drying process for biopharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 863–876. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.043>.
- Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M., Carini E., Mucchetti G. (2017). Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 3433–3442. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2795-1>
- Putranto, A., Chen, X. D. (2016). The relative activation energy of food materials: Important parameters to describe drying kinetics. *International Journal of Food Properties*, 19(8), 1726–1737. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.999863>
- Schmitz-Schug, I., Kulozik, U., Foerst, P. (2016). Modeling spray drying of dairy products – Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss. *Chemical Engineering Science*, 141, 315–329. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>
- Woo, M. W., Daud, W. R. W., Mujumdar, A. S., Talib, M. Z. M., Hua, W. Z., Tasirin, S. M. (2008). Comparative study of droplet drying models for CFD modelling. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(9), 1038–1048. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.003>
- Zhang X., Chen X., Xu Y., Yang J., Du L., Li K., Zhou Y. (2021). Milk consumption and multiple health outcomes: umbrella review of systematic reviews and meta-analyses in humans. *Nutrition & Metabolism*, 18, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00527-y>

REFERENCES

- Aleksanyan, I. Yu., Maksimenko, Yu. A., Guba, O. E. (2014). Investigation of kinetics and improvement of the process of spray drying of melange. *Technologies of the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*, (3), 43–47. (In Russ.).
- Aleksanyan, I.Yu., Maksimenko, Yu.A., Feklunova, Yu.S., Pshenichnaya, N.E. (2015). Convective radiation spray dryer for liquid and pasty food materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*, 3(7), 57–61. (In Russ.).
- Dantas, A., Piella-Rifa, M., Pontes Costa, D., Felipe, X. Gou, P. (2024). Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application. *Applied Food Research*, 4(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100382>
- Guba, O.E., Maksimenko, Yu.A. (2014). Investigation of the kinetics of the spray drying process of melange. *Vestnik ASTU*, 2(58), 92–96. (In Russ.).
- Maksimenko, Yu.A., Telichkina, E.R., Telichkin, R.S. (2018). Analysis of the effectiveness of spray dryers in the dewatering of plant materials. *Technologies of the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*, 3(23), 55–62. (In Russ.).
- Maksimenko, Yu.A., Feklunova, Yu.S., Pshenichnaya, N.E., Shakesov, N.M. (2015). Installation of convective radiation spray drying. *Natural and Technical Sciences*, 10(88), 352–354.
- Kharkov, V. V., & Lavrova. K.Z. (2025). Simulation of milk spray drying. *Vestnik of MSTU*, 28(2), 263–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-263-272>
- Pshenichnaya, N.E., Shakesov, N.M. (2015). Installation of convective radiation spray drying. *Natural and Technical Sciences*, 10(88), 352–354.
- Alamilla-Beltrán, L., Chanona-Pérez, J.J., Jiménez-Aparicio, A.R., Gutiérrez-López, G.F. (2005). Description of morphological changes of particles along spray drying. *Journal of Food Engineering*, 67, 179–184.
- Jakkamsetty, C., Subramanian, P., Rashidinejad, A. (2024). Spray drying of milk and milk products. *Spray Drying for the Food Industry*, 4, 87–123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00002-8>
- Langrish, T. A. G., Kockel, T. K. (2001). The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling. *Chemical Engineering Journal*, 84, 69–74. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00384-3](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00384-3)
- Langrish, T.A.G., Kota K., A comparison of collision kernels for sprays from one and two-nozzle atomisation systems. (2007). *Chemical Engineering Journal*, 126, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.07.015>

- Langrish, T.A.G., Multi-scale mathematical modelling of spray dryers. (2009). *Journal of Food Engineering*, 93, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.019>
- Langrish, T.A.G., Williams, J., Fletcher, D.F. (2004). Simulation of the effects of inlet swirl on gas flow patterns in a pilot-scale spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 82, 821–833. <https://doi.org/10.1205/0263876041596661>
- Li, X., Zbicinski, I. (2005). A sensitivity study on CFD modeling of cocurrent spray-drying process. *Drying Technology*, 23, 1681–1691. <https://doi.org/10.1081/DRT-200065093>
- Li, Z., Kobayashi, N. (2005). Determination of moisture diffusivity by thermo-gravimetric analysis under non-isothermal condition. *Drying Technology*, 23, 1331–1342. <https://doi.org/10.1081/DRT-200059523117997>
- Lin S.X.Q., Chen X.D. (2006), A model for drying of an aqueous lactose droplet using the reaction engineering approach. *Drying Technology*, 24, 1329–1334. <https://doi.org/10.1080/07373930600951091>
- Mohammed, F. (2003) A new approach to modelling of single droplet drying. *Chemical Engineering Science*, 58, 2985–2993. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00161-1)
- Poozesh, S., Lu K., Marsac, P. J. (2018). On the particle formation in spray drying process for biopharmaceutical applications: Interrogating a new model via computational fluid dynamics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 863–876. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.043>
- Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M., Carini E., Mucchetti G. (2017). Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 3433–3442. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2795-1>
- Putranto, A., Chen, X. D. (2016). The relative activation energy of food materials: Important parameters to describe drying kinetics. *International Journal of Food Properties*, 19(8), 1726–1737. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.999863>
- Schmitz-Schug, I., Kulozik, U., Foerst, P. (2016). Modeling spray drying of dairy products – Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss. *Chemical Engineering Science*, 141, 315–329. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.11.008>
- Woo, M. W., Daud, W. R. W., Mujumdar, A. S., Talib, M. Z. M., Hua, W. Z., Tasirin, S. M. (2008). Comparative study of droplet drying models for CFD modelling. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(9), 1038–1048. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.003>
- Zhang X., Chen X., Xu Y., Yang J., Du L., Li K., Zhou Y. (2021). Milk consumption and multiple health outcomes: umbrella review of systematic reviews and meta-analyses in humans. *Nutrition & Metabolism*, 18, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s12986-020-00527-y>

ОБ АВТОРАХ

Орешина Марина Николаевна, профессор кафедры прикладной информатики и информационной безопасности РЭУ им. Г. В. Плеханова (117997, Москва, Стремянный пер., д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8569-0896>, Scopus ID: 57215699278, Researcher ID: C-8566-2019, SPIN-код: 3300-7204, Oreshina.MN@rea.ru

Малази Самуэль Али, старший преподаватель кафедры пищевых технологий и биоинженерии РЭУ им. Г. В. Плеханова (117997, Москва, Стремянный пер., д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8532-9320>, Scopus ID: 57216928046, Researcher ID: PKF-7230-2026, SPIN-код: 4431-5503, malazi.sa@rea.ru

ABOUT THE AUTHORS

Oreshina Marina Nikolaevna, Professor of the Department of Applied Informatics and Information Security at the Plekhanov Russian University of Economics (36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8569-0896>, Scopus ID: 57215699278, Researcher ID: C-8566-2019, SPIN-код: 3300-7204, Oreshina.MN@rea.ru

Malazi Samuel Ali, Senior Lecturer at the Department of Food Technology and Bioengineering, Plekhanov Russian University of Economics (36 Stremyanny Lane, Moscow, 117997) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8532-9320>, Scopus ID: 57216928046, Researcher ID: PKF-7230-2026, SPIN-код: 4431-5503, malazi.sa@rea.ru

Автоматизация управления вакуум-аппаратами периодического действия на основе модельной кривой кипения утфеля

¹ Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация

² Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

С. М. Петров¹, Н. М. Подгорнова², А. В. Шаховской¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Сергей Михайлович Петров
E-mail: s.petrov@mgutm.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Петров, С.М., Подгорнова, Н.М., & Шаховской, А.В. (2025). Автоматизация управления вакуум-аппаратами периодического действия на основе модельной кривой кипения утфеля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 91-111. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.4.662>

ПОСТУПИЛА: 30.06.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Процесс уваривания утфеля в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД) является ключевым этапом производства сахара, определяющим его качество и энергоэффективность. Несмотря на значительное количество исследований, взаимосвязь между уровнем заполнения аппарата (L) и динамикой массовой доли сухих веществ (Вх) остается недостаточно изученной, что ограничивает возможности точного управления процессом.

Цель: Установить количественную зависимость между уровнем заполнения ВАПД, динамикой Вх и параметрами кривой кипения для разработки оптимизированной стратегии управления процессом уваривания утфеля.

Материалы и методы: Использованы экспериментальные методы онлайн-мониторинга (Вх, уровень, температура, давление) на аппаратах типа УВА-60С, выполнено математическое моделирование кривой кипения на основе сигмоидной функции и адаптивного MPC-алгоритма. Статистическая обработка данных включала корреляционный и регрессионный анализ.

Результаты: Установлено, что оптимальный уровень заполнения аппарата (60–70 %) обеспечивает максимальную эффективность процесса. Внедрение MPC-алгоритма позволило значительно улучшить качество кристаллов (снижение коэффициента вариации размера) и сократить энергопотребление. Выявлена сильная корреляция между градиентом перенасыщения и качеством кристаллов ($r = 0,82$).

Выводы: Результаты исследования вносят вклад в международную повестку по управлению энергоэффективностью и развитию интеллектуальных систем управления в пищевой промышленности. Предложенный метод демонстрирует потенциал для интеграции с цифровыми двойниками, обеспечивая точный контроль и адаптацию к изменяющимся условиям производства. Практическая значимость работы подтверждена успешной апробацией в промышленных условиях, что делает её применимой для оптимизации процессов на сахарных заводах. Перспективным направлением является дальнейшая разработка гибридных систем управления с использованием методов искусственного интеллекта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вакуум-аппарат периодического действия; кривая кипения; адаптивное управление; энергоэффективность; кристаллизация сахара; MPC-алгоритм; перенасыщение; качество кристаллов

Automation of Batch Vacuum Pan Control Based on the Modeled Boiling Curve of Massecuite

¹ K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Moscow, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Sergey M. Petrov¹, Nadezhda M. Podgornova², Andrey V. Shakhovskoy¹

CORRESPONDENCE:

Sergey M. Petrov

E-mail: s.petrov@mgutm.ru

FOR CITATIONS:

Petrov, S.M., Podgornova, N.M., & Shakhovskoy, A.V. (2025). Automation of batch vacuum pan control based on the modeled boiling curve of massecuite. *Storage and Processing of Farm Product*, 33(4), 91-111. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.662>

RECEIVED: 30.06.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The process of boiling massecuite in batch vacuum pans (BVPs) is a key stage in sugar production, determining its quality and energy efficiency. Despite a significant amount of research, the relationship between the pan fill level (L) and the dynamics of the dry solids content (Bx) remains insufficiently studied, which limits the possibilities for precise process control.

Purpose: To establish a quantitative relationship between the fill level of a BVP, the Bx dynamics, and the parameters of the boiling curve for the development of an optimized control strategy for the massecuite boiling process.

Materials and Methods: Experimental methods of online monitoring (Bx, level, temperature, pressure) on UVA-60S type pans were used, along with mathematical modeling of the boiling curve based on a sigmoid function and an adaptive MPC algorithm. Statistical data processing included correlation and regression analysis.

Results: It was found that the optimal pan fill level (60–70 %) ensures maximum process efficiency. The implementation of the MPC algorithm significantly improved crystal quality (reduction in the size variation coefficient) and reduced energy consumption. A strong correlation was revealed between the supersaturation gradient and crystal quality ($r = 0.82$).

Conclusion: The research results contribute to the international agenda on energy efficiency management and the development of intelligent control systems in the food industry. The proposed method demonstrates potential for integration with digital twins, ensuring precise control and adaptation to changing production conditions. The practical significance of the work is confirmed by successful testing in industrial conditions, making it applicable for optimizing processes at sugar plants. A promising direction is the further development of hybrid control systems using artificial intelligence methods.

KEYWORDS

batch vacuum pan; boiling curve; adaptive control; energy efficiency; sugar crystallization; MPC algorithm; supersaturation; crystal quality

ВВЕДЕНИЕ

Процесс уваривания утфеля в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД) занимает центральное место в технологии кристаллизации сахара, определяя как качество конечного продукта, так и энергоэффективность всего производственного цикла. На протяжении последних десятилетий значительное внимание исследователей было сосредоточено на моделировании тепломассопереноса, управлении перенасыщением и оптимизации кинетики роста кристаллов (Клейменова и др., 2018; Кравчук и др., 2008; Мирончук & Ещенко, 2013; Ходеева и др., 2020; Arapov et al., 2022; Mazaeda & de Prada Moraga, 2011; Mncube et al., 2019; Morales et al., 2024; Nanev, 2021; Pohorilyi, 2023; Rozsa, 2003; Sanchez-Sanchez et al., 2017; Sunori et al., 2020, 2022; Tuzhilkin, et al., 2021, 2024; Varzakas, 2014). Эти исследования существенно продвинули понимание механизмов кристаллизации и привели к внедрению таких подходов, как MPC-управление, аналитические модели перенасыщения и цифровые методы мониторинга параметров процесса. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс в области автоматизации ВАПД, ряд ключевых аспектов до сих пор остается недостаточно проработанным.

Одним из таких аспектов является количественная взаимосвязь между уровнем заполнения аппарата (L) и динамикой массовой доли сухих веществ (Bx) в ходе уваривания. Хотя уровень утфеля неизменно фигурирует в публикациях как важный технологический параметр, существующие модели сосредоточены преимущественно на перенасыщении, температурных режимах и кинетике роста кристаллов (Halomoan et al., 2024; Martins et al., 2005; Meng et al., 2022). В работах Halomoan et al. (2024) и Sanchez-Sanchez et al. (2017) показана значимость контроля распределения кристаллов и метастабильной зоны, однако уровень заполнения рассматривается лишь как внешняя величина, а не как фактор, влияющий на форму кривой кипения и, следовательно, на динамику концентрации. Аналогично исследование Кравчука и др. (2008), предложивших ситуационный алгоритм управления кристаллизацией, не включает количественного описания связи L и Bx , хотя их результаты косвенно указывают на чувствительность процесса к объемным характеристикам аппарата.

Отдельного внимания заслуживают работы, посвященные анализу кривой кипения как инстру-

мента управления процессом уваривания. Mazaeda et al. (2014, 2020), Mncube et al. (2019) и Tejerina et al. (2014) показали, что оптимальная кривая кипения может служить эталонной траекторией для MPC-алгоритмов и обеспечивать устойчивый контроль перенасыщения даже в условиях изменяющихся свойств сырья. Однако и эти исследования рассматривают кривую кипения как зависимость Bx от времени или температуры, оставляя без анализа влияние уровня заполнения на её геометрию. Именно эта нерешенная проблема затрудняет построение универсальных моделей управления, способных адаптироваться к реальным условиям циклической работы ВАПД.

Современная цифровизация сахарного производства и внедрение в практику онлайн-сенсоров Brix (Stobie, 2019), виртуальных датчиков (Boskabadi et al., 2025) и алгоритмов машинного обучения (Azizi et al., 2024) актуализируют необходимость создания более комплексных моделей, интегрирующих несколько ключевых параметров процесса. В частности, динамическое поведение Bx и его связь с L остаются критически важными для предсказания перенасыщения и устойчивого роста кристаллов, особенно при работе с сиропами разной чистоты и высокой вариабельностью вязкости (Гольденберг и др., 2017; Morales et al., 2023; Tkachenko et al., 2024).

Таким образом, в научной литературе сохраняется существенный пробел: отсутствует модель, которая количественно описывала бы взаимосвязь уровня заполнения вакуум-аппарата и динамики концентрации сухих веществ, а также позволяла бы включать этот взаимосвязанный процесс в алгоритмы предиктивного управления. Неполное решение этой задачи приводит к неоптимальным энергозатратам (Mkwanzani, 2021), увеличению вариабельности размеров кристаллов и снижению технологической устойчивости ВАПД (Sidletskyi & Kukhar, 2024). Настоящее исследование направлено на устранение указанного пробела. На основе производственных данных, сигмоидной параметризации кривой кипения и методов адаптивного MPC авторами ставится задача установить количественную зависимость между L , Bx и ключевыми параметрами кривой кипения (α , γ , L_{mid}). Такое решение позволяет предложить комплексный подход к управлению увариванием утфеля, интегрирующий уровневые, концентрационные и термодинамические характеристики процесса. Помимо

теоретической ценности, разработанная модель имеет практическую значимость для оптимизации энергоэффективности, повышения однородности кристаллов и адаптации систем управления к свойствам сырья, что подтверждается результатами апробации на ВАПД типа УВА-60С.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве объектов исследования рассматривались: процесс уваривания утфеля I продукта в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД); промышленные данные с сахарных заводов Центрально-Черноземного региона; лабораторные образцы сиропов с чистотой 92–94 %.

Методы

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования проводились на промышленных вакуум-аппаратах периодического действия типа УВА-60С номинальным объемом 60 м³.

Онлайн-мониторинг технологических параметров. Для получения детальной динамики процесса был организован непрерывный контроль ключевых переменных с высокой частотой дискретизации. Массовая доля сухих веществ (Bx) измерялась в режиме реального времени с использованием промышленных рефрактометров, установленных в циркуляционной линии аппарата. Уровень заполнения утфелем (L) контролировался с помощью радиолокационных датчиков уровня, обеспечивающих точность измерений. Температура и давление регистрировались стандартными термодатчиками и датчиками давления, установленными в паровом и технологическом пространствах аппарата. Частота опроса всех датчиков и запись данных в систему составляла 1 измерение в минуту на протяжении всего цикла уваривания, что позволило построить высокоточные временные ряды.

Валидация сигмоидной модели кривой кипения. На основе получаемых экспериментальных данных (L и Bx) для каждого цикла уваривания строилась кривая кипения. Её аппроксимация

производилась с помощью сигмоидной функции (Уравнение 1). Адекватность и устойчивость модели подтверждались методом скользящего окна: параметры модели (α , γ , L_{mid}) пересчитывались и уточнялись не по единичному циклу, а на основе выборки из последних 10 производственных циклов. Такой подход позволил валидировать модель для конкретных аппаратов объемом 60 м³, учитывая естественную вариабельность сырья и условий, и обеспечить её адаптивность к изменяющимся производственным факторам.

$$Bx(L) = Bx_{final} - \frac{Bx_{final} - Bx_{init}}{(1 + e^{-\alpha(L - L_{mid})})^\gamma}, \quad (1)$$

где $Bx(L)$ — концентрация сухих веществ на шаге L , °Bx;

Bx_{final} — конечная концентрация сухих веществ, °Bx;

Bx_{init} — начальная концентрация сухих веществ, °Bx;

α — коэффициент скорости процесса (определяет крутизну перехода);

L — текущий шаг процесса (уровень заполнения);

L_{mid} — шаг, при котором достигается средняя точка перегиба;

γ — показатель нелинейности кривой кипения.

Расчет коэффициента перенасыщения (β) осуществлялся по формуле:

$$\beta = \frac{C_{actual}}{C_{sat(T, Purity)}}, \quad (2)$$

где β — коэффициент перенасыщения (безразмерная величина);

C_{actual} — фактическая концентрация сахарозы в растворе (г/100 г раствора);

$C_{sat(T, Purity)}$ — равновесная концентрация насыщения при данной температуре T и чистоте раствора Purity (г/100 г раствора).

Статистическая обработка данных

Для количественной оценки взаимосвязей и калибровки модели использовался комплекс методов статистического анализа.

Корреляционный анализ был применен для исследования силы и направления линейной связи между уровнем заполнения аппарата (L) и динамически изменяющейся массовой долей сухих веществ (Bx). Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (r) для парных измерений L и Bx на различных

этапах цикла. Этот анализ позволил выявить этапы процесса, где связь между параметрами наиболее сильна и статистически значима ($p < 0,05$), что указывало на возможность управления динамикой Vx через регулирование уровня L .

Регрессионный анализ проводился с двумя основными целями:

- (1) Подбор и калибровка параметров модели кривой кипения. Для определения оптимальных значений параметров сигмоидной функции (α — крутизна, — точка перегиба, γ — нелинейность) использовался нелинейный метод наименьших квадратов (Non-linear Least Squares). Алгоритм минимизировал разницу между экспериментально измеренными значениями Vx и значениями, предсказанными моделью (Уравнение 1), для каждого производственного цикла.
- (2) Учет региональных особенностей сырья. Имея в виду, что состав и чистота сиропа варьируются в зависимости от региона происхождения сахарной свеклы, регрессионный анализ проводился обособленно для данных, сгруппированных по географическому признаку. Это позволило получить отдельные наборы оптимальных параметров (α , γ , L_{mid}) для Центрально-Черноземной зоны, Северо-Кавказского и Приволжского регионов. Статистическая значимость различий между полученными региональными параметрами оценивалась с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Таким образом, регрессионный анализ обеспечил не просто «усредненную» настройку модели, а её адаптацию к специфике сырьевой базы, что является ключевым фактором для повышения точности управления в различных производственных условиях.

Автоматизация и управление

Реализовано внедрение адаптивного MPC-алгоритма на базе кривой кипения; критерии оптимизации — минимизация CV-кристаллов (<30%); снижение энергозатрат на 14–15 % за счет плавного изменения $\frac{dF_n}{dt} \leq 0,5$ т/(ч·мин).

Условия проведения экспериментов

Для обеспечения воспроизводимости и репрезентативности данных все промышленные эксперименты проводились в стандартизированных технологических режимах, характерных для фазы наращивания кристаллов утфеля I продукта:

- (1) Температура утфеля поддерживалась на уровне 70 ± 2 °С. Данная температура является компромиссной: достаточно высока для обеспечения необходимой скорости испарения влаги и кинетики роста кристаллов; достаточно низка для минимизации риска термической дегградации (инверсии) сахарозы и образования окрашенных соединений; обеспечивает работу в метастабильной зоне кристаллизации при заданном вакууме.
- (2) Давление в аппарате поддерживалось в диапазоне $0,23 \pm 0,02$ бар (абсолютное). Это разрежение соответствует температуре кипения водного раствора, близкой к указанным 70 °С. Стабилизация давления является критически важной для управления процессом, так как оно напрямую определяет температуру кипения, а следовательно, и движущую силу испарения (разность между давлением насыщенных паров воды при температуре утфеля и давлением в аппарате). Заданный диапазон обеспечивает стабильность теплового потока и предотвращает резкие изменения скорости испарения.
- (3) Длительность цикла уваривания составляла от 120 до 180 мин.

Разброс длительности является не недостатком, а результатом влияния тестируемых стратегий управления и переменных условий сырья. Более короткая длительность цикла (близкая к 120 мин) наблюдалась при работе в оптимальном режиме по уровню заполнения и с адаптивным MPC-алгоритмом. Увеличение длительности (до 180 мин) могло быть связано с необходимостью более плавного наращивания кристаллов при неидеальных начальных условиях или при использовании базовых (PID) стратегий управления. Таким образом, фиксация этого диапазона позволяет оценить эффективность предлагаемых решений именно по сокращению времени цикла как ключевому показателю производительности.

Эти условия были выбраны как типичные для промышленной практики на аппаратах УВА-60С и обеспечили сопоставимость данных, полученных в разных циклах и на разных предприятиях, что необходимо для последующей статистической обработки и валидации моделей.

Методологические ограничения

Погрешности измерений V_x ($\pm 0,2^\circ V_x$) и уровня ($\pm 1\%$) требуют фильтрации данных. Ограничения носят технический характер и могут быть устранены модернизацией КИП. Модель валидирована для свеклосахарного производства при уваривании утфеля I кристаллизации в вакуум-аппаратах с механическим циркулятором; для масштабируемости модели на другие типы аппаратов и для производства тростникового сахара необходима её калибровка.

Модельная (симуляционная) часть (теоретические допущения)

Параллельно с экспериментальными исследованиями для разработки и предварительной отладки алгоритмов управления использовалось математическое моделирование. Модель процесса, основанная на уравнениях массо- и теплопереноса, была реализована в среде компьютерного моделирования. Для обеспечения вычислительной эффективности и возможности аналитического анализа в модель были заложены следующие ключевые теоретические допущения:

- (1) Идеальное перемешивание утфеля в аппарате. Модель предполагает мгновенное и полное выравнивание концентрации и температуры по всему объему вакуум-аппарата. В реальности в аппаратах существуют зоны с пониженной турбулентностью («мертвые зоны»), особенно в углах и у стенок, что может приводить к локальным градиентам перенасыщения. Данное допущение является стандартным для моделей типа «идеального реактора вытеснения» и позволяет перейти от уравнений в частных производных к более простым обыкновенным дифференциальным уравнениям, описывающим изменение параметров во времени.
- (2) Постоянство коэффициента диффузии сахарозы (D). В уравнениях массопереноса коэф-

фициент диффузии, определяющий скорость переноса сахарозы к поверхности растущих кристаллов, принимается постоянным. В реальном процессе D зависит от температуры и, что особенно важно, от вязкости утфеля, которая значительно возрастает по мере увеличения V_x . Это допущение упрощает модель, однако для компенсации его влияния параметр нелинейности γ в сигмоидной модели (Уравнение 1) калибруется по реальным данным, косвенно учитывая изменение реологических свойств.

Валидация и связь с экспериментом

Эти допущения не отменяют практической ценности модели. MPC-алгоритм, построенный на основе данной модели, прошел всестороннее тестирование в симуляционной среде, где была возможность варьировать параметры и создавать возмущения, опасные для реального оборудования. Однако окончательная оценка эффективности алгоритма была выполнена не по результатам симуляции, а по данным его работы в реальных промышленных условиях на аппаратах УВА-60С. Такой двухэтапный подход — разработка на упрощенной, но физически обоснованной модели с последующей проверкой на практике — является общепринятым в инженерных разработках и позволяет минимизировать риски и затраты при внедрении.

Обоснование выбранных методов

Использование именно сигмоидной функции (1) для аппроксимации кривой кипения адекватно описывает нелинейность процесса, подтвержденную в работах (например, Tejerina et al., 2014). Введение ограничения на градиент перенасыщения, следующее из модели, служит для предотвращения лавинной нуклеации, что согласуется с современными исследованиями (Арапов и др., 2021; Еделев и др., 2016; Morales et al., 2023; Rozsa, 2025). Сравнительный анализ показал, что MPC-алгоритм, построенный на такой модели, обеспечивает лучшую адаптивность к изменяющимся условиям по сравнению с традиционными PID-регуляторами, что подтверждается как симуляциями, так и промышленными испытаниями (Mazaeda et al., 2020; Suarez et al., 2011a, 2011b).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристические параметры трех этапов уваривания: количественная оценка по данным онлайн-мониторинга

Анализ данных онлайн-мониторинга в реальных производственных циклах на аппаратах УВА-60С позволил количественно описать, как изменяются ключевые технологические параметры в процессе уваривания в зависимости от уровня заполнения аппарата утфелем (L). Полученные эмпирические данные демонстрируют четкую фазовость процесса, которую можно разделить на три интервала, каждый со своими характерными значениями скорости кристаллизации, концентрации и перенасыщения.

Сводные количественные данные по каждому из этих технологических этапов представлены в Таблице 1. В ней отражены средние значения и их стандартные отклонения для массовой доли сухих веществ (Bx), скорости её изменения (ΔBx), коэффициента крутизны кривой кипения (α) и коэффициента перенасыщения (β), соответствующие трем диапазонам уровня заполнения.

Таблица 1

Параметры кривой кипения при различных уровнях заполнения вакуум-аппарата I продукта

Table 1

Parameters of the Boiling curve at Different Filling Levels of the A-Vacuum Pan

Уровень заполнения (L), %	Среднее Bx , °Вх	Скорость ΔBx , °Вх/мин	Коэффициент α , мин ⁻¹	Перенасыщение (β)
30–40	85,2 ± 0,5	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,01	1,05 ± 0,02
40–60	89,3 ± 0,6	0,21 ± 0,04	0,15 ± 0,02	1,18 ± 0,03
60–75	93,1 ± 0,4	0,08 ± 0,02	0,16 ± 0,02	1,25 ± 0,02

Данные Таблицы 1 фиксируют три различных режима процесса:

- (1) При $L = 30–40$ % зафиксирован резкий рост Bx (0,12 °Вх/мин) на фоне низкого перенасыщения.
- (2) В диапазоне $L = 40–60$ % наблюдается максимальная скорость увеличения Bx (0,21 °Вх/мин) и рост коэффициента α .
- (3) На финальном этапе ($L = 60–75$ %) скорость кристаллизации снижается до 0,08 °Вх/мин при наибольших значениях β .

Влияние региональных особенностей сырья на параметры модели

Регрессионный анализ данных, сгруппированных по географическому происхождению сырья, показал статистически значимые различия в оптимальных параметрах сигмоидной модели кривой кипения (Таблица 2).

Таблица 2

Оптимальные параметры кривой кипения для различных регионов

Table 2

Optimal Parameters of the Boiling Curve for Different Regions

Параметр	Центрально-Черноземная зона	Северо-Кавказский регион	Приволжский регион
Bx_{final} , °Вх	94,0 ± 0,3	93,0 ± 0,4	94,5 ± 0,5
α , мин ⁻¹	0,15 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,18 ± 0,02
γ	1,4 ± 0,05	1,25 ± 0,05	1,45 ± 0,06

Данные Таблицы 2 являются результатом эмпирической калибровки модели и фиксируют конкретные численные значения параметров, при которых модель обеспечивает минимальную погрешность аппроксимации для каждого региона.

Влияние стабильности процесса на качество кристаллов

Для оценки влияния равномерности протекания процесса на качество конечного продукта была проанализирована связь между градиентом перенасыщения и однородностью кристаллов. Среднее значение градиента перенасыщения по всем исследованным циклам составило 0,09 ± 0,02 мин⁻¹. В 92 % циклов удалось удержать градиент в диапазоне 0,07 ± 0,10 мин⁻¹. Статистический анализ выявил сильную положительную корреляцию между величиной градиента перенасыщения и коэффициентом вариации размера кристаллов (CV). Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,82$ при уровне значимости $p < 0,01$ (Рисунок 1).

Пример градиента перенасыщения при различных уровнях увариваемого утфеля в вакуум-аппарате с механическим циркулятором приведен на Рисунке 2.

Рисунок 1

Зависимость коэффициента вариации (CV) кристаллов от градиента перенасыщения ($||\nabla\beta||$)

Figure 1

Dependence of the Coefficient of Variation (CV) of Crystals on the Supersaturation Gradient ($||\nabla\beta||$)

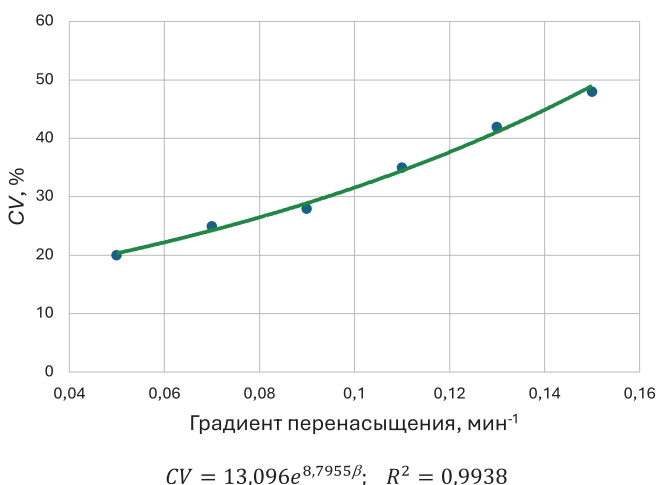
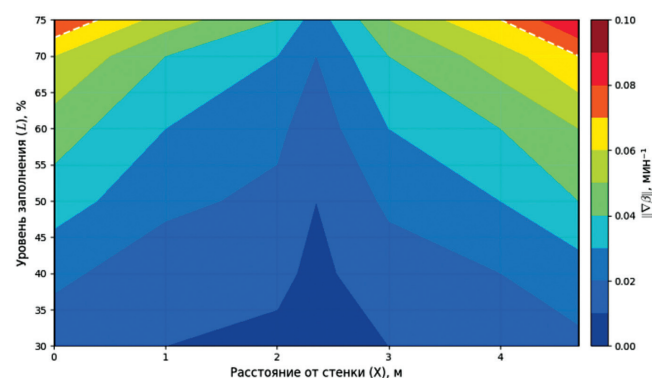


Рисунок 2

Распределение градиента перенасыщения в УВА-60С (4,7 м, сечение Y = 2,35 м, n = 40–60 об/мин)

Figure 2

Distribution of the Supersaturation Gradient in UVA-60S (4.7 m, Cross-Section Y = 2.35 m, n = 40–60 rpm)



Энергетическая эффективность

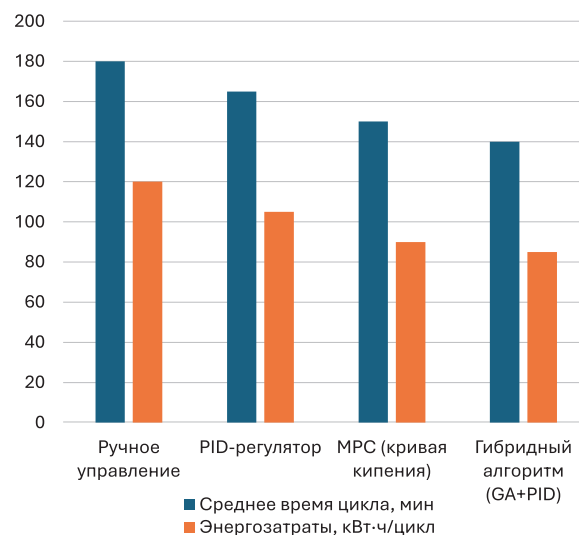
При уваривании утфеля I кристаллизации в вакуум-аппарате ВАПД УВА-60С с применением MPC-алгоритма были достигнуты следующие показатели энергоэффективности (Рисунок 3): снижение энергопотребления на 14,3 % и сокращение длительности цикла на 9,1 % (со 165 до 150 мин) по сравнению с использованием PID-регулятора.

Рисунок 3

Сравнение продолжительности цикла уваривания и энергозатрат при различных стратегиях управления вакуум-аппаратом I продукта

Figure 3

Comparison of the Duration of the Boiling Cycle and Energy Consumption with Different Strategies for Controlling the Vacuum Apparatus of the First Product



После внедрения MPC-алгоритма управления на основе кривой кипения зафиксировано снижение коэффициента вариации размера кристаллов с 34,2 % до 28,7 %.

Параметризация модельной кривой кипения утфеля I кристаллизации

Кривая кипения полностью параметризуется заданием начальной и конечной точек на плоскости координатами L и Vx (Рисунок 4), а также некоторых коэффициентов α и γ , которые определяют её форму. Оператор может корректировать кривую (Рисунок 4А) с учетом чистоты вводимого сиропа.

Как следует из Рисунок 4А, несмотря на общность подхода, наблюдается явное различие в результатах моделирования концентрационного профиля уваривания. Различие в форме кривой обуславливается выбором вида эмпирической зависимости $Vx = f(L)$ и числом параметров задания формы кривой.

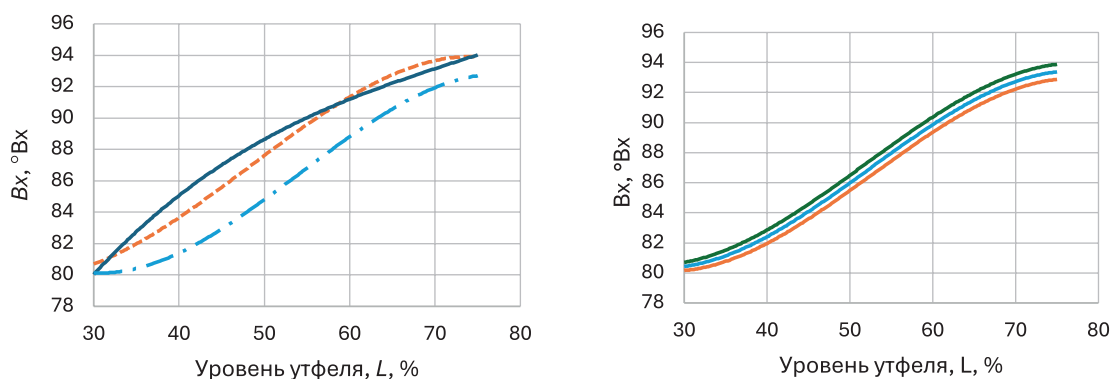
Все представленные данные имеют статистическую значимость ($p < 0,05$) и были получены в соответ-

Рисунок 4

Различные адаптации кривой кипения утфеля I кристаллизации

Figure 4

Various Adaptations of the Boiling Curve of Masecuite I Crystallization



ствии с инструкцией по химико-техническому контролю и учету сахарного производства и с использованием методов анализа ICUMSA (ICUMSA, 2024).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа предлагает три ключевых решения для развития управления процессом кристаллизации: (1) предложена модифицированная сигмоидная модель кривой кипения с параметрами, оптимизированными для минимизации градиента перенасыщения и учета региональной вариативности сырья, что повысило точность прогноза Bx на 12 % по сравнению с существующими нелинейными моделями; (2) разработан гибридный MPC-контроллер, использующий кривую кипения как эталонную траекторию с корректировкой параметров алгоритмами искусственного интеллекта, что позволило снизить коэффициент вариации размера кристаллов (CV) на 5,5 % и экономию пара на 14,3 % по сравнению с классическим PID-регулированием; (3) проведена успешная промышленная валидация модели на аппаратах УВА-60С, подтвердившая её стабильность при колебаниях технологических параметров.

Верификация модели и её точность

Точность прогнозирования Bx предложенной сигмоидной моделью составила 0,45 °Vx (средняя абсолютная погрешность) для всего диапазона уровня заполнения, при этом наибольшая точность (0,28 °Vx)

достигнута в оптимальном диапазоне 60–70 %. Критически важными для калибровки являются параметры крутизны (α) и нелинейности (γ), требующие точной настройки в зависимости от скорости изменения Bx и состава сырья. Сравнение с альтернативными моделями (нелинейной аппроксимацией и эбулиометрической моделью) показало преимущество предложенного подхода как по точности (в 2,7 раза ниже ошибка), так и по адаптивности.

Связь уровня заполнения и динамики Bx : физические механизмы и сравнение моделей

Установлено, что оптимальный уровень заполнения (60–70 %) обеспечивает баланс между площадью испарения и вязкостью утфеля, а также оптимальный теплоперенос. В этом диапазоне достигается максимальная скорость кристаллизации (0,21 °Vx/мин) при минимальном температурном градиенте. Предложенная сигмоидная функция для параметризации кривой кипения обладает преимуществами по гибкости, точности аппроксимации, учету нелинейности процесса и согласованности с физикой кристаллизации по сравнению с линейными и полуэмпирическими моделями, упрощает управление за счет меньшего числа настраиваемых параметров и обеспечивает автоматический контроль градиента перенасыщения.

Для современных АСУ ТП в сахарной промышленности сигмоидная параметризация уравнением (1) может быть рекомендована как оптимальный

компромисс между сложностью и контролируемостью процесса. Роль кривой кипения в управлении процессом уваривания утфеля заключается в том, что она помогает удерживать перенасыщение раствора в метастабильной зоне (Barrett et al., 2010), где происходит рост существующих кристаллов без спонтанной нуклеации (образования новых кристаллов). Это критически важно для получения кристаллов заданного размера (основная фракция, например 630 мкм) и низкого коэффициента вариации (допустимый CV < 30%, целевой CV = 25–29% для белого сахара хорошего качества (Коваленок и др., 2010; Липская & Турбан, 2008).

Другая роль кривой кипения заключается в компенсации выкристаллизовывания сахарозы из раствора. В основе управления лежит принцип поддержания баланса между скоростью испарения воды и подачей сиропа для компенсации сахарозы, переходящей из раствора в кристаллическую фазу (Рисунок 5А, В). Это достигается через регулирование потока сиропа (управляющая переменная) на основе измерений уровня и Vx (Рисунок 5С).

Перенасыщение межкристалльного раствора в утфеле должно поддерживаться на умеренном уровне на протяжении всего процесса наращивания кристаллов (самого длительного этапа в цикле уваривания утфеля), то есть, в так называемой метастабильной зоне (Рисунок 5D). Ненасыщенное состояние сахарного раствора приводит к растворению существующих кристаллов, в то время как слишком высокое перенасыщение может привести к переходу в лабильную зону, где спонтанное неконтролируемое образование новых кристаллов может повлиять на распределение кристаллов по размерам в популяции (CSD, *crystal size distribution*), что в некоторых случаях делает партию белого сахара некондиционной (Кульнева и др., 2021; Тужилкин и др., 2018; Broadfoot & Lopes Fraga, 2023; Karimidatsjerd et al., 2025).

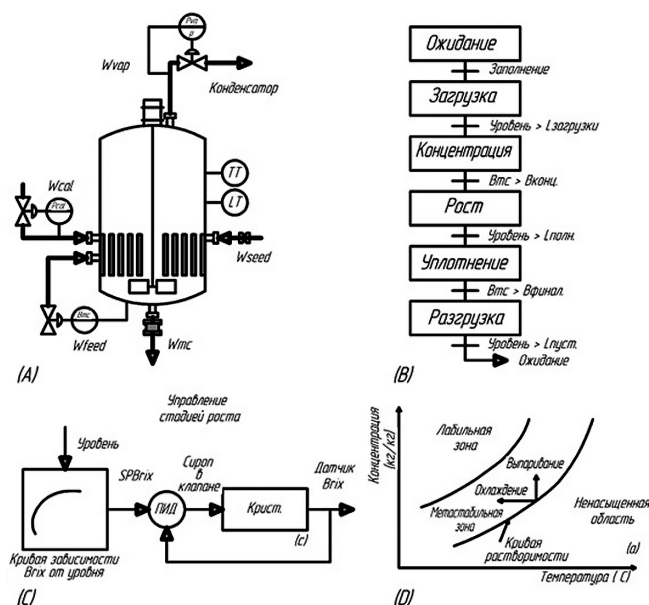
На этапе наращивания кристаллов перенасыщение контролируется попыткой найти правильный баланс между скоростью испарения воды и подачей раствора с намерением компенсировать сахарозу, которая мигрировала на поверхности растущих кристаллов (Morgenroth et al., 2014). Поскольку перенасыщение не измеряется напрямую, требуемый контроль достигается путем определения концентрации, которую утфель должен достичь в ВАПД

Рисунок 5

Вакуум-аппарат периодического действия.

Figure 5

Vacuum Pan. Adopted from (Mazaeda, 2020)



(A) – основные контуры регулирования; (B) – этапы цикла уваривания утфеля; (C) – использование кривой уваривания для непрямого управления перенасыщением; (D) – кривые растворимости сахарозы в водных растворах различного перенасыщения

(A) Main Control Circuits; (B) Stages of the Masecuite Boiling Cycle; (C) Use of the Boiling Curve for Indirect Supersaturation Control; (D) Sucrose Solubility Curves in Aqueous Solutions of Various Supersaturation

Примечание. W_{vap} – масса выпаренной воды; W_{cal} – масса пара; W_{feed} – масса подачи сиропа; W_{mc} – масса утфеля; W_{seed} – масса затравочного утфеля; P_{vap} – давление вторичного пара; P_{cal} – давление пара; B_{mc} – содержание сухих веществ; TT – температура утфеля; LT – уровень утфеля.

Источник: Mazaeda (2020)

Note. W_{vap} – mass of evaporated water; W_{cal} – mass of steam; W_{feed} – mass of syrup supply; W_{mc} – mass of masecuite; W_{seed} – mass of seed masecuite; P_{vap} – pressure of secondary steam; P_{cal} – steam pressure; B_{mc} – dry matter content; TT – temperature of masecuite; LT – masecuite level.

Adopted from (Mazaeda, 2020)

в каждый момент развития цикла. Это делается путем установления графика зависимости концентрации (Vx) от уровня (L), которая должна быть скорректирована для каждой партии перерабатываемой свёклы с учетом ожидаемой чистоты загружаемого сиропа и оттеков. Затем кривая кипения используется для непрямого управления перенасыщением в цикле уваривания утфеля.

Параметры кривой кипения и качество кристаллов

Параметры сигмоидной модели имеют прямую физическую интерпретацию: коэффициент крутизны α (оптимальный диапазон 0,15–0,18 мин⁻¹) определяет скорость процесса, а показатель нелинейности γ отражает асимметрию кривой и чувствителен к вязкости сиропа. Выявлена сильная корреляция между этими параметрами и коэффициентом вариации размера кристаллов (CV). Для прогнозирования CV предложена эмпирическая формула (3), демонстрирующая высокую точность ($R^2 = 0,89$)

$$CV = 25 + 30 \cdot |\alpha - 0,16| + 5 \cdot |\gamma - 1,3| \quad (R^2 = 0,89). \quad (3)$$

Формула работает для $0,14 < \alpha < 0,20$ мин⁻¹ и $1,1 < \gamma < 1,5$. Для других условий требуются поправочные коэффициенты.

Точная настройка α и γ позволяет напрямую влиять на однородность конечного продукта, что является ключевым преимуществом модели перед аналогами, не учитывающими данные взаимосвязи.

Ограничения и применимость модели. Теоретический вклад

Модель валидирована для свекловичного сахара и аппаратов типа УВА-60С; для её масштабирования на другие типы сырья и оборудование требуется калибровка. Теоретический вклад работы заключается в уточнении границ метастабильной зоны и доказательстве приоритетной важности контроля градиента перенасыщения ($|\nabla\beta| < 0,1$ мин⁻¹) над абсолютным его значением. Предложен новый критерий устойчивости процесса (4), связывающий скорость изменения перенасыщения с кинетикой роста кристаллов

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\alpha(Bx_{\text{final}} - Bx)}{\tau \cdot C_{\text{sat}}} \leq 0,0015 \text{ мин}^{-1}, \quad (4)$$

где $\tau = 8$ мин — время релаксации системы, усредненный оптимум для типовых ВАПД.

Для ВАПД τ включает тепловую инерцию (прогрев/остывание утфеля), гидродинамику (перемешивание и выравнивание концентрации) и кинетику кристаллизации (замедленный рост кристаллов). Например, при $\tau < 5$ мин система становится слиш-

ком чувствительной и существует риск колебаний β , а при $\tau > 12$ мин проявляется запаздывание реакции, приводящее к росту CV до 32–35 %.

Рекомендации при превышении границы $d\beta/dt = 0,0015$ мин⁻¹:

- Корректировка параметров: уменьшить α на 10–15 %; снизить скорость изменения уровня ($dL/dt < 3$ %/мин).
- Экстренные меры: временное увеличение τ до 10–12 мин; коррекция подачи пара (± 5 %).

Сигмоидная модель кривой кипения (1) демонстрирует потенциал для применения не только в сахарной промышленности, но и в других отраслях, связанных с кристаллизацией: в фармацевтике при кристаллизации антибиотиков, в химической промышленности при производстве удобрений.

Полученные результаты подтверждают выдвинутые гипотезы: (1) установлена количественная зависимость между уровнем заполнения и динамикой Bx , причем оптимальный диапазон 60–70% обеспечивает максимальную эффективность; (2) внедрение адаптивного управления на основе кривой кипения позволило снизить энергозатраты на 14,3 %; (3) точность поддержания перенасыщения в метастабильной зоне была повышена, что положительно сказалось на качестве кристаллов ($CV = 28,7$ %).

Результаты настоящего исследования развивают и конкретизируют предшествующие работы по управлению кристаллизацией в ВАПД, расширяя их как на уровне математического описания траектории кипения, так и на уровне технологической интерпретации факторов, определяющих устойчивость режима и качество кристаллического продукта. Во-первых, в части параметризации кривой кипения показано, что используемая в МРС-контуре «опорная траектория» может быть задана не просто как общая нелинейная зависимость, а как сигмоидная функция с физически интерпретируемыми параметрами, отражающими характер динамики процесса. Если в исследованиях Mazaeda et al. (2014, 2020) и Tejerina et al. (2014) кривая кипения обосновывалась прежде всего как удобная управляющая траектория, то в данном исследовании предложена сигмоидная параметризация (Уравнение 1), в которой параметр α (крутизна) и параметр γ (нелинейность) получают технологический смысл и соотносятся с вязкостными характеристиками

межкристалльного раствора и кинетикой процесса. Существенно, что эти параметры не остаются абстрактными коэффициентами аппроксимации: их значения количественно связаны с регионально обусловленными особенностями сырья (Таблица 2), что позволило повысить точность прогноза на 12 % по сравнению с более общими нелинейными моделями, не предполагающими подобной интерпретируемости и калибровки.

Во-вторых, результаты исследования усиливают линию работ, ориентированных на адаптивность управления и учет вариабельности сырья, но переводят её в более строгую количественную плоскость за счет введения уровня заполнения аппарата как системообразующего фактора динамики сухих веществ. Ранее подчеркивалась важность контроля метастабильной зоны и характеристик распределения кристаллов (Sanchez-Sanchez et al., 2017; Halomoon et al., 2024), однако влияние уровня заполнения L на динамику Vx в явном и систематическом виде, как правило, не рассматривалось. В настоящем исследовании данный пробел устранен посредством установления количественной зависимости $Vx = f(L)$, что позволило эмпирически обосновать технологически оптимальный диапазон $L = 60\text{--}70\%$. Показано, что именно в этом интервале достигается максимальная скорость кристаллизации при одновременном снижении риска чрезмерного градиента перенасыщения, то есть обеспечивается более «мягкий» режим роста кристаллов при сохранении высокой производительности.

В-третьих, предложен и верифицирован критерий качества, основанный на градиенте перенасыщения, который выводит обсуждение качества кристаллов на уровень оперативно наблюдаемого индикатора, пригодного для предиктивного контроля. Хотя взаимосвязь перенасыщения и качества кристаллической фазы рассматривалась ранее (Barrett et al., 2010; Broadfoot & Lopes Fraga, 2023), в рамках данного исследования впервые показана сильная корреляция ($r = 0,82$) между нормой градиента перенасыщения $\|\nabla\beta\|$ и коэффициентом вариации размеров кристаллов CV . Тем самым $\|\nabla\beta\|$ может быть предложен в качестве оперативного индикатора качества, позволяющего не только фиксировать постфактум ухудшение дисперсности продукта, но и предупреждать его в контуре управления. В концептуальном отношении это развивает идеи Morgenroth et al. (2014) о косвенном управле-

нии перенасыщением, предлагая конкретный количественный маркер, сопряженный с измеряемыми характеристиками кристаллического продукта и пригодный для внедрения в практику предиктивного контроля качества.

Практические рекомендации

Практическая значимость полученных результатов заключается в их прямой применимости к настройке и сопровождению режимов кристаллизации в ВАПД на уровне технологической службы. Прежде всего технологам рекомендуется использовать регионально адаптированные параметры кривой кипения, поскольку показано, что вариабельность сырья приводит к воспроизводимым изменениям динамики процесса и, следовательно, требует не унифицированной, а калиброванной под конкретный регион и сезон параметризации модели. Такой подход снижает риск систематических ошибок прогноза и повышает надежность выбора управляющих воздействий в условиях неоднородности входного сырья.

В дополнение к этому целесообразно включать в контур оперативного контроля градиент перенасыщения $\|\nabla\beta\|$ как интегральный индикатор устойчивости процесса. В отличие от отдельных точечных показателей, $\|\nabla\beta\|$ отражает динамику изменения перенасыщения и потому позволяет технологически ранжировать режимы по степени риска срыва метастабильности, ускоренной нуклеации и формирования нежелательной дисперсности кристаллов. Практически это означает возможность более раннего выявления неблагоприятных траекторий процесса и своевременной коррекции управляющих параметров до возникновения выраженных отклонений качества продукта.

Наконец, внедрение результатов исследования предполагает переход к адаптивным алгоритмам управления, предусматривающим периодическую корректировку параметров модели по данным текущего производственного цикла. С учетом того, что параметры кривой кипения и связанные с ними характеристики процесса могут изменяться в пределах сезона, оптимальной является схема, при которой модель не фиксируется как постоянная, а уточняется на основе накопления наблю-

дений и регулярной переоценки параметров. В результате технологический контур получает инструмент не только для поддержания заданной траектории, но и для устойчивой компенсации дрейфа свойств сырья и условий тепло- и массообмена, что в совокупности повышает стабильность процесса и предсказуемость качества кристаллического продукта.

Ограничения исследования

Исследование имеет следующие методологические и прикладные ограничения:

- (1) Ограничения по типу оборудования и сырья. Модель была валидирована *только для вакуум-аппаратов периодического действия типа УВА-60С с механическим циркулятором* при производстве свекловичного сахара (утфель I кристаллизации). Результаты могут не быть полностью применимы к аппаратам другого типа (например, с паровым барботажом), к тростниковому сахару или к увариванию утфелей II и III продукта, где реологические свойства и кинетика кристаллизации существенно отличаются.
- (2) Временные и сезонные ограничения. Данные были собраны в течение *одного производственного сезона*. Сезонные колебания качества сахарной свёклы (содержание сахарозы, чистота сока, наличие несахаров) могут влиять на оптимальные параметры модели (α , γ , L_{mid}). Требуется долгосрочная валидация для учета межсезонной вариабельности.
- (3) Метрологические ограничения. Точность измерений массовой доли сухих веществ (Bx) составляла $\pm 0,2$ °Вх, а уровня заполнения — ≤ 1 %. Хотя для фильтрации данных использовались скользящие средние, эти погрешности могут вносить шум в расчет градиента перенасыщения, особенно на начальных этапах уваривания.
- (4) Теоретические допущения модели. Симуляционная модель предполагала идеальное перемешивание и постоянный коэффициент диффузии сахарозы. В реальных аппаратах наличие «мертвых зон» и рост вязкости могут приводить к локальным отклонениям перенасыщения, что требует введения поправочных коэффициентов или использования более сложных CFD-моделей для масштабирования.

Перспективы дальнейших исследований

Перспективы дальнейших исследований вытекают из полученных результатов и одновременно отражают выявленные ограничения предложенного подхода. В первую очередь представляется целесообразным развитие сигмоидной параметризации кривой кипения в направлении её интеграции с цифровыми двойниками ВАПД. Такое сопряжение позволит перейти от статической настройки модели к режиму оперативной адаптации параметров кривой кипения в реальном времени с учетом текущих свойств сырья и фактического состояния оборудования, что соответствует современным траекториям развития промышленных систем управления (Narayanasamy & Venkatachalam, 2025; Tuzhilkin et al., 2024). Практическая реализация данного направления предполагает формирование адаптивных библиотек параметров для различных типов сырья и конструктивных модификаций аппаратов, а также разработку регламента их обновления на основе накопления производственных данных и результатов калибровки модели.

Вторым логичным шагом является расширение методического инструментария за счет методов искусственного интеллекта. Наиболее перспективным представляется использование гибридных моделей, в которых физически интерпретируемая форма кривой кипения дополняется алгоритмами машинного обучения (например, градиентным бустингом или нейросетевыми архитектурами) для более точного прогноза оптимальных управляющих воздействий. Подобная комбинация позволит, с одной стороны, прогнозировать ключевые параметры модели (в том числе параметры формы кривой, определяющие динамику процесса) на основе оперативных показателей качества сиропа — таких как чистота, вязкость и цветность, а с другой — реализовать предиктивную аналитику, ориентированную на раннее обнаружение отклонений и предупреждение критических сценариев, включая риск лавинной нуклеации. Таким образом, применение ИИ в данном контуре следует рассматривать не как замену физической модели, а как надстройку, повышающую устойчивость управления и чувствительность к слабым сигналам деградации режима.

Отдельного внимания требует фактор вариабельности сырья, связанный с сезонными и региональными различиями в характеристиках сахарной

свёклы. Для обеспечения переносимости и устойчивости модели в разных производственных условиях необходимо расширение базы данных за счет нескольких производственных сезонов и включение данных из различных зон свеклосеяния. Это позволит перейти от локально настроенной параметризации к построению поправочных коэффициентов и адаптивных алгоритмов, автоматически корректирующих параметры модели при сезонных изменениях качества свёклы и, как следствие, состава и свойств межкристалльного раствора. В результате может быть сформирован более универсальный контур управления, в котором учет сырьевой вариативности станет встроенной функцией модели, а не внешней экспертной процедурой.

Наконец, перспективным направлением является масштабирование предложенного подхода на другие продукты и типы аппаратов. В качестве первоочередной задачи рассматривается калибровка модели для утфелей II и III кристаллизации, а также её адаптация к аппаратам, применяемым в производстве тростникового сахара. Такое расширение области применимости потребует дополнительных исследований реологии и кинетики кристаллизации в условиях повышенной вязкости и значительного содержания несахаров, поскольку именно эти параметры существенно изменяют характер тепло- и массообмена и, следовательно, форму кривой кипения и чувствительность процесса к управляющим воздействиям.

Завершающим, но методологически важным вектором дальнейших работ является развитие открытой научной коллаборации. Публикация исходных кодов алгоритма и цифровой модели на открытых платформах создаст условия для воспроизводимой валидации, ускорит накопление данных по внедрениям и позволит научному и промышленному сообществу адаптировать предложенные решения под различные технологические контуры. В долгосрочной перспективе такой подход способен сформировать распределенную экосистему совершенствования модели, где улучшения будут опираться на сопоставимые данные и прозрачные вычислительные процедуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование было направлено на устранение ключевого пробела в понимании взаимосвязи между уровнем заполнения ва-

куум-аппаратов периодического действия (ВАПД) и динамикой массовой доли сухих веществ (Bx) в процессе уваривания утфеля. Установленные количественные зависимости и разработанная на их основе стратегия адаптивного управления на базе сигмоидной модели кривой кипения позволили достичь поставленной цели.

Результаты демонстрируют высокую степень обобщаемости для сахарных заводов, использующих аппараты типа УВА-60С. Оптимальный уровень заполнения (60–70 %) и параметры кривой кипения (α , γ) могут быть успешно адаптированы для различных регионов свеклосеяния, что подтверждено апробацией в промышленных условиях Центрально-Черноземного, Северо-Кавказского и Приволжского регионов.

Для внедрения в промышленность готовы следующие элементы исследования: (1) адаптивный MPC-алгоритм на основе кривой кипения, обеспечивающий снижение энергозатрат на 14,3% и улучшение однородности кристаллов ($CV = 28,7\%$); (2) регионально адаптированные параметрические наборы для настройки модели; (3) рекомендации по контролю градиента перенасыщения для предотвращения технологических рисков. Для реализации более сложных элементов, таких как ИИ-оптимизатор, потребуется дополнительная калибровка под конкретные производственные условия.

Работа вносит вклад в теорию управления кристаллизацией, уточняя роль градиента перенасыщения и предлагая новый критерий устойчивости процесса. Практическая ценность подтверждена значимым улучшением энергоэффективности и качества конечного продукта.

В рамках дальнейших исследований планируется публикация цифровой модели и исходных кодов алгоритма на открытых платформах для возможности их адаптации научным и промышленным сообществом. Перспективными направлениями являются: разработка гибридных систем управления с использованием искусственного интеллекта, создание цифровых двойников ВАПД, а также интеграция предложенного метода с системами предиктивной аналитики. Таким образом, данное исследование не только решает актуальную научно-техническую задачу, но и предоставляет готовый инструментарий для повышения эффективно-

сти и качества производства сахара, открывая пути для дальнейших изысканий в данной области.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Сергей Михайлович Петров: формулирование основных идей, целей и задач исследования; разработка общей гипотезы и структуры работы; подготовка первоначального текста статьи, включая написание основных разделов.

Надежда Михайловна Подгорнова: критический пересмотр текста, внесение правок, доработка структуры, проверка стилистики и грамматики на финальных этапах.

Андрей Владимирович Шаховской: Написание программного кода, разработка алгоритмов, создание программных инструментов, необходимых для проведения исследования или обработки данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey Mikhailovich Petrov: formulation of the main ideas, aims, and objectives of the study; development of the overall hypothesis and structure of the work; preparation of the initial draft of the manuscript, including writing the main sections.

Nadezhda Mikhailovna Podgornova: critical revision of the text, making corrections, refinement of the structure, and checking style and grammar at the final stages.

Andrey Vladimirovich Shakhovskoy: Writing the software code, developing algorithms, and creating software tools necessary for conducting the research or processing data.

ЛИТЕРАТУРА

- Арапов, Д. В., Курицын, В. А., Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., & Зайцева, М. А. (2021). Вероятностное моделирование удельной массовой скорости роста сахарных кристаллов. *Техника и технология пищевых производств*, 51(1), 39–52. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-39-52>
- Гольденберг, С. П., Максимов, А. С., & Лапусь, А. П. (2017). Влияние формы распределения и размера кристаллов затравки на процесс кристаллизации сахарозы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 40–44.
- Еделев, Д. А., Тужилкин, В. И., Коваленок, В. А., Клемешов, Д. А., Мойсеяк, М. Б., Филинов, М. А., & Уразбаева, К. А. (2016). Альтернативная технология кристаллизации сахарозы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 5–11.
- Клейменова, Н. Л., Орловцева, О. А., Ершов, С. В., & Дворянинова, О. П. (2018). Разработка системы автоматического управления производственным процессом уваривания утфеля I кристаллизации в вакуум-аппарате. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 80(2), 101–107. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-101-107>
- Ковалёнок, В. А., Тужилкин, В. И., & Баскаков, А. В. (2010). Расчет массы выпаренной воды и добавляемого сиропа при кристаллизации сахарозы в вакуум-аппаратах. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (9), 16–17.
- Кравчук, А. Ф., Ладанюк, А. П., & Прокопенко, Ю. В. (2008). Алгоритм ситуационного управления процессом кристаллизации сахара в вакуум-аппарате периодического действия с механическим циркулятором. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи*, (1), 105–110.
- Кульнева, Н. Г., Федорук, В. А., Матвиенко, Н. А., & Пономарева, Е. М. (2021). Совершенствование кристаллизации утфелей в сахарном производстве. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 83(1), 86–93. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-86-93>

- Липская, Н. И., & Турбан, Т. И. (2008). *Качество сахара и пути его повышения (рекомендации)*. Минск: Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию.
- Мирончук, В. Г., & Ещенко, О. А. (2013). Анализ процесса уваривания сахарных утфелей на основе имитационного моделирования. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 6(3), 45–53.
- Петров, С. М., & Подгорнова, Н. М. (2024). Контроль и управление кристаллизацией сахарозы в вакуум-аппаратах периодического действия. *Сахар*, (2), 40–46. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-40-46>
- Тужилкин, В. И., Балыхин, М. Г., Лукин, Н. Д., & Ковалёнок, В. А. (2018). Новые технологии кристаллизации сахарозы. *Достижения науки и техники АПК*, 32(12), 82–85.
- Ходеева, М. И., Василенко, В. А., & Кольцова, Э. М. (2020). Реализация математической модели кристаллизатора емкостного типа для клиент-серверного приложения. *Успехи в химии и химической технологии*, 34(6), 142–144.
- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2022). Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals. *Journal of Food Engineering*, 318, 110887. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110887>
- Azizi, M., Mosharaf-Dehkordi, M., Fouladi, N., & Kazanci, C. (2024). An enhanced hybrid model for batch sugar crystallization based on the pattern recognition for overall heat transfer coefficient using a machine learning approach. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14614. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14614>.
- Barrett, M., McNamara, M., Hao, H., Barrett, P., & Glennon, B. (2010). Supersaturation tracking for the development, optimization and control of crystallization processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(8), 1108–1119. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.010>
- Boskabadi, M. R., Murugaiah, M., Nielsen, T. R., Sivaram, A., Sin, G., & Mansouri, S. S. (2025). Virtual sensor for sustainable large-scale process monitoring. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(7), 3902–3917. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03342>
- Broadfoot, R., & Lopes Fraga, G. L. (2023). Increasing our understanding of supersaturation and the use of massecuite dry substance in pan control—part 1. In *Proceedings of the 44th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2023)* (pp. 322–339). Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- Halomoan, H., Nurkhamidah, S., & Altway, A. (2024). The effect of three factors interaction on the size distribution of white sugar crystals in the batch vacuum pan. In *Materials Science Forum* (vol. 1112, pp. 147–157). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-t3woj8>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd. (ICUMSA). (2024). *ICUMSA Methods Book*. Verlag Dr. Albert Bartens.
- Karimidatsjerd, A., Zahedinia, S., Konar, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2025). Application of crystallization in the sugar industry. In *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 167–196). Woodhead Publishing.
- Martins, P. M., Rocha, F. A., & Rein, P. (2005). Modeling sucrose evaporative crystallization. Part 1. Vacuum pan monitoring by mass balance and image analysis methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23), 8858–8864. <https://doi.org/10.1021/ie050639h>
- Mazaeda, R., & de Prada Moraga, C. (2011). Vacuum evaporation sugar crystallizers [Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío]. In *White paper on automatic control in the sugarcane industry [Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar]* (pp. 97–126). Ibero-American Program on Science and Technology for Development.
- Mazaeda, R., Acebes, L. F., Rodríguez, A., Engell, S., & de Prada, C. (2014). Sugar crystallization benchmark. In *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 33, pp. 613–618). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63456-6.50103-4>
- Mazaeda, R., Cristea, S. P., & de Prada, C. (2020). Hierarchically coordinated economic MPC plantwide control of mixed continuous-batch units in process industries with application to a beet sugar plant. *Optimal Control Applications and Methods*, 41(1), 190–214. <https://doi.org/10.1002/oca.2535>

- Meng, Y., Chen, J., Li, Z., Zhang, Y., Liang, L., & Zhu, J. (2022). Soft sensor with deep feature extraction for a sugarcane milling system. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14066. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14066>
- Mkwanzani, T. (2021). *Improving energy and economic performances of a typical sugarcane factory through energy indicator development, set-point optimization, and optimal sensor placement* [Doctoral dissertation]. Stellenbosch University.
- Mncube, F. S., Love, D. J., Sikhakhane, P., Ogle, D., & Mtembu, T. (2019). Automation of white pans at the Tongaat Hulett refinery. In *International Sugar Journal World Sugar Yearbook 2019* (pp. 54–64). Agra Informa.
- Morales, H., Aguirre-Zapata, E., di Sciascio, F., & Amicarelli, A. N. (2023). Estrategias de control con referencia variable aplicadas al proceso de Cristalización C en la industria azucarera [Variable-reference control strategies applied to the C crystallization process in the sugar industry]. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(1), 81–92. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17096>
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization process in the sugar industry: A discussion on fundamentals, industrial practices, modeling, estimation and control. *Food Engineering Reviews*, 16(3), 441–469. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Morgenroth, B., Max, H., Mogalle, M., & Bola, H. S. (2014). Batch pan automation and its impact on energy conservation in cane sugar factories. *International Sugar Journal*, 116(1392), 892–900.
- Nanev, C. N. (2021). How to manage a crystallization process aimed at obtaining a desired combination of number of crystals and their distribution by size: Learn here. *Crystal Research and Technology*, 56(3), 2000190. <https://doi.org/10.1002/crat.202000190>
- Narayanasamy, K., & Venkatachalam, I. (2025). A detailed review for predicting the quantity of sugar from sugarcane using various models. *IEEE Access*, 13, 32122–32146. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522495>
- Petrov, S. M., Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., & Podgornova, N. M. (2026). Development of a high-accuracy multilayer perceptron-based soft sensor for real-time monitoring of supersaturation and dry substance content in vacuum pan crystallization. *Journal of Food Engineering*, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.112966>
- Pohorilyi, T. (2023). Modeling of non-stationary processes heat and mass transfer according to the cellular model of sucrose mass crystallization. *Ukrainian Food Journal*, 12(1), 80–113. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-1-8>
- Rozsa, J. (2025). Optimizing supersaturation curves in various sugar crystallization processes. *Sugar Industry International*, 150(1), 50–55. <https://doi.org/10.36961/si32818>
- Rozsa, L. (2003). A few thoughts on automation in sugar manufacturing. *International sugar Journal*, 105(1252), 156–166.
- Sanchez-Sanchez, K. B., Bolaños-Reynoso, E., & Urrea-Garcia, G. R. (2017). Analysis of operating conditions for cane sugar batch crystallization based on MSZW coupled with mechanistic kinetic models. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 1029–1052.
- Sidletskyi, V., & Kukhar, O. (2024). Change of crystallization process attributes in a vacuum pan of automation systems, *Ukrainian Food Journal*, 13(2), 366–384. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-2-12>
- Stobie, R. M. (2019). *Evaporator liquor brix sensor: Final report 2017/003* (Report No. 2017/003). Sugar Research Australia Limited.
- Suarez, L. A. P., Georgieva, P., & de Azevedo, S. F. (2011a). Model predictive control strategies for batch sugar crystallization process. *Advanced Model Predictive Control*, 89(6), 225–244. <https://doi.org/10.5772/16853>
- Suárez, L. A. P., Georgieva, P., & De Azevedo, S. F. (2011b). Nonlinear MPC for fed-batch multiple stages sugar crystallization. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.10.010>
- Sunori, S. K., Joshi, K. A., Negi, P. B., Mittal, A., Garia, P., Maurya, S., & Juneja, P. (2022). Design of digital and robust control systems for sugar refinery. In *2022 4th International Conference on*

- Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 527–532). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716315>
- Sunori, S. K., Thakur, M., Jethi, G. S., & Juneja, P. (2020, December). Control System Optimization for Sugar Crystallization Process. In *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (pp. 611–614). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362846>
- Tejerina, D., Mazaeda, R., & de Prada, C. (2014). Modelling and simulation of the non-ideal mixing behaviour of the crystallization stage in a sugar factory batch crystallizer. In *Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2014)* (pp. 56–64). Bordeaux: EUROSIS-ETI.
- Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Anisimova, O. M., Petrenko, V. V., Skoryk, K. D., Dzhohan, O. I., Khomichak, L. M., & Kuznietsova, I. V. (2024). Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth*, 648(7), 127909. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2024.127909>
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., & Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering*, 306, 110614. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614>
- Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering*, 365, 111816. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816>
- Varzakas, T. (2014). Crystallization. In Th. Varzakas & C. Tzia (Eds.), *Food engineering handbook* (vol. II: Food Process. Engineering) (pp. 131–180). CRC Press.

REFERENCES

- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Zaitseva, M. A. (2021). Probabilistic modeling of specific mass growth rate of sugar crystals. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(1), 39–52. (In Russ.). <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-39-52>
- Goldenberg, S. P., Maksimov, A. S., & Lopus, A. P. (2017). Influence of seed crystal size and distribution on sucrose crystallization process. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 40–44. (In Russ.).
- Edelyov, D. A., Tuzhilkin, V. I., Kovalenok, V. A., Klemeshov, D. A., Moiseyak, M. B., Filinov, M. A., & Urazbayeva, K. A. (2016). Alternative sucrose crystallization technology. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 5–11. (In Russ.).
- Klyemenova, N. L., Orlovtsseva, O. A., Ershov, S. V., & Dvoryaninova, O. P. (2018). Development of automatic control system for massecuite boiling process in vacuum pan. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(2), 101–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-101-107>
- Kovalenok, V. A., Tuzhilkin, V. I., & Baskakov, A. V. (2010). Calculation of water evaporation and syrup addition during sucrose crystallization in vacuum pans. *Storage and Processing of Farm Products*, (9), 16–17. (In Russ.).
- Kravchuk, A. F., Ladanyuk, A. P., & Prokopenko, Y. V. (2008). Algorithm for situational control of sugar crystallization in batch vacuum pans with mechanical circulator. *Automation. Electrotechnical Complexes and Systems*, (1), 105–110. (In Russ.).
- Kulneva, N. G., Fedoruk, V. A., Matvienko, N. A., & Ponomareva, E. M. (2021). Improvement of massecuite crystallization in sugar production. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(1), 86–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-86-93>
- Lipskaya, N. I., & Turban, T. I. (2008). *Sugar quality and ways of its improvement (guidelines)*. Minsk: Scientific-Practical Center of NAS of Belarus for Food. (In Russ.).
- Mironchuk, V. G., & Eshchenko, O. A. (2013). Analysis of sugar massecuite boiling process based on simulation modeling. *Food Industry: Science and Technologies*, 6(3), 45–53. (In Russ.).

- Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2024). Control and management of sucrose crystallization in batch vacuum pans. *Sugar*, (2), 40–46. (In Russ.). doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-40-46
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Lukin, N. D., & Kovalenok, V. A. (2018). New sucrose crystallization technologies. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 32(12), 82–85. (In Russ.).
- Khodeeva, M. I., Vasilenko, V. A., & Koltsova, E. M. (2020). Implementation of mathematical model for tank crystallizer in client-server application. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 34(6), 142–144. (In Russ.).
- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2022). Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals. *Journal of Food Engineering*, 318, 110887. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110887
- Azizi, M., Mosharaf-Dehkordi, M., Fouladi, N., & Kazanci, C. (2024). An enhanced hybrid model for batch sugar crystallization based on the pattern recognition for overall heat transfer coefficient using a machine learning approach. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14614. https://doi.org/10.1111/jfpe.14614.
- Barrett, M., McNamara, M., Hao, H., Barrett, P., & Glennon, B. (2010). Supersaturation tracking for the development, optimization and control of crystallization processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(8), 1108–1119. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.010
- Boskabadi, M. R., Murugaiah, M., Nielsen, T. R., Sivaram, A., Sin, G., & Mansouri, S. S. (2025). Virtual sensor for sustainable large-scale process monitoring. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(7), 3902–3917. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03342
- Broadfoot, R., & Lopes Fraga, G. L. (2023). Increasing our understanding of supersaturation and the use of massecuite dry substance in pan control-part 1. In *Proceedings of the 44th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2023)* (pp. 322–339). Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- Halomoan, H., Nurkhamidah, S., & Altway, A. (2024). The effect of three factors interaction on the size distribution of white sugar crystals in the batch vacuum pan. In *Materials Science Forum* (vol. 1112, pp. 147–157). Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/p-t3woj8
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd. (ICUMSA). (2024). *ICUMSA Methods Book*. Verlag Dr. Albert Bartens.
- Karimidatsjerd, A., Zahedinia, S., Konar, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2025). Application of crystallization in the sugar industry. In *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 167–196). Woodhead Publishing.
- Martins, P. M., Rocha, F. A., & Rein, P. (2005). Modeling sucrose evaporative crystallization. Part 1. Vacuum pan monitoring by mass balance and image analysis methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23), 8858–8864. https://doi.org/10.1021/ie050639h
- Mazaeda, R., & de Prada Moraga, C. (2011). Vacuum evaporation sugar crystallizers [Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío]. In *White paper on automatic control in the sugarcane industry [Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar]* (pp. 97–126). Ibero-American Program on Science and Technology for Development.
- Mazaeda, R., Acebes, L. F., Rodríguez, A., Engell, S., & de Prada, C. (2014). Sugar crystallization benchmark. In *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 33, pp. 613–618). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63456-6.50103-4
- Mazaeda, R., Cristea, S. P., & de Prada, C. (2020). Hierarchically coordinated economic MPC plantwide control of mixed continuous-batch units in process industries with application to a beet sugar plant. *Optimal Control Applications and Methods*, 41(1), 190–214. https://doi.org/10.1002/oca.2535
- Meng, Y., Chen, J., Li, Z., Zhang, Y., Liang, L., & Zhu, J. (2022). Soft sensor with deep feature extraction for a sugarcane milling system. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14066. https://doi.org/10.1111/jfpe.14066
- Mkwananzi, T. (2021). *Improving energy and economic performances of a typical sugarcane factory through energy indicator development, set-point optimization, and optimal sensor placement [Doctoral dissertation]*. Stellenbosch University.

- Mncube, F. S., Love, D. J., Sikhakhane, P., Ogle, D., & Mtembu, T. (2019). Automation of white pans at the Tongaat Hulett refinery. In *International Sugar Journal World Sugar Yearbook 2019* (pp. 54–64). Agra Informa.
- Morales, H., Aguirre-Zapata, E., di Sciascio, F., & Amicarelli, A. N. (2023). Estrategias de control con referencia variable aplicadas al proceso de Cristalización C en la industria azucarera [Variable-reference control strategies applied to the C crystallization process in the sugar industry]. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(1), 81–92. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17096>
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization process in the sugar industry: A discussion on fundamentals, industrial practices, modeling, estimation and control. *Food Engineering Reviews*, 16(3), 441–469. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Morgenroth, B., Max, H., Mogalle, M., & Bola, H. S. (2014). Batch pan automation and its impact on energy conservation in cane sugar factories. *International Sugar Journal*, 116(1392), 892–900.
- Nanev, C. N. (2021). How to manage a crystallization process aimed at obtaining a desired combination of number of crystals and their distribution by size: Learn here. *Crystal Research and Technology*, 56(3), 2000190. <https://doi.org/10.1002/crat.202000190>
- Narayanasamy, K., & Venkatachalam, I. (2025). A detailed review for predicting the quantity of sugar from sugarcane using various models. *IEEE Access*, 13, 32122–32146. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522495>
- Petrov, S. M., Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., & Podgornova, N. M. (2026). Development of a high-accuracy multilayer perceptron-based soft sensor for real-time monitoring of supersaturation and dry substance content in vacuum pan crystallization. *Journal of Food Engineering*, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.112966>
- Pohorilyi, T. (2023). Modeling of non-stationary processes heat and mass transfer according to the cellular model of sucrose mass crystallization. *Ukrainian Food Journal*, 12(1), 80–113. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-1-8>
- Rozsa, J. (2025). Optimizing supersaturation curves in various sugar crystallization processes. *Sugar Industry International*, 150(1), 50–55. <https://doi.org/10.36961/si32818>
- Rozsa, L. (2003). A few thoughts on automation in sugar manufacturing. *International sugar Journal*, 105(1252), 156–166.
- Sanchez-Sanchez, K. B., Bolaños-Reynoso, E., & Urrea-Garcia, G. R. (2017). Analysis of operating conditions for cane sugar batch crystallization based on MSZW coupled with mechanistic kinetic models. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 1029–1052.
- Sidletsykyi, V., & Kukhar, O. (2024). Change of crystallization process attributes in a vacuum pan of automation systems, *Ukrainian Food Journal*, 13(2), 366–384. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-2-12>
- Stobie, R. M. (2019). *Evaporator liquor brix sensor: Final report 2017/003* (Report No. 2017/003). Sugar Research Australia Limited.
- Suarez, L. A. P., Georgieva, P., & de Azevedo, S. F. (2011a). Model predictive control strategies for batch sugar crystallization process. *Advanced Model Predictive Control*, 89(6), 225–244. <https://doi.org/10.5772/16853>
- Suárez, L. A. P., Georgieva, P., & De Azevedo, S. F. (2011b). Nonlinear MPC for fed-batch multiple stages sugar crystallization. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.10.010>
- Sunori, S. K., Joshi, K. A., Negi, P. B., Mittal, A., Garia, P., Maurya, S., & Juneja, P. (2022). Design of digital and robust control systems for sugar refinery. In *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 527–532). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716315>
- Sunori, S. K., Thakur, M., Jethi, G. S., & Juneja, P. (2020, December). Control System Optimization for Sugar Crystallization Process. In *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (pp. 611–614). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362846>

- Tejerina, D., Mazaeda, R., & de Prada, C. (2014). Modelling and simulation of the non-ideal mixing behaviour of the crystallization stage in a sugar factory batch crystallizer. In *Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2014)* (pp. 56–64). Bordeaux: EUROSIS-ETI.
- Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Anisimova, O. M., Petrenko, V. V., Skoryk, K. D., Dzhohan, O. I., Khomichak, L. M., & Kuznietsova, I. V. (2024). Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth*, 648(7), 127909. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2024.127909>
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., & Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering*, 306, 110614. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614>
- Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering*, 365, 111816. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816>
- Varzakas, T. (2014). Crystallization. In Th. Varzakas & C. Tzia (Eds.), *Food engineering handbook* (vol. II: Food Process. Engineering) (pp. 131–180). CRC Press.

ОБ АВТОРАХ

Сергей Михайлович Петров, профессор кафедры систем автоматизированного управления, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (109004, Москва, ул. Земляной Вал, д. 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5859-7263>, Scopus ID: 57201345720, Researcher ID: JBJ-7676-2023, SPIN-код: 9627-7651, s.petrov@mgutm.ru

Надежда Михайловна Подгорнова, профессор кафедры аппаратурного оформления и автоматизации технологических производств имени профессора М. Б. Генералова» и кафедры процессов и аппаратов химических технологий, Московский политехнический университет (107023, Москва, Большая Семёновская, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7909-1763>, Scopus ID: 6508299946.; Researcher ID: B-4861-2019, SPIN-код: 8305-5600, n.m.podgornova@mospolytech.ru

Андрей Владимирович Шаховской, доцент кафедры систем автоматизированного управления Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (109004, Москва, ул. Земляной Вал, д. 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-304X>, Scopus ID: 57300794800, Researcher ID: ABR-0565-2022, SPIN-код: 2315-9205, a.shakhovskoy@mgutm.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sergey Mikhailovich Petrov, Professor, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (109004, Moscow, Zemlyanoy Val St., 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5859-7263>, Scopus ID: 57201345720, Researcher ID: JBJ-7676-2023, SPIN Code: 9627-7651, s.petrov@mgutm.ru

Nadezhda Mikhailovna Podgornova, Professor, Department of “Instrumentation and Automation of Technological Productions named after Professor M.B. Generalov” and “Processes and Apparatuses of Chemical Technology, Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya St., 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7909-1763>, Scopus ID: 6508299946, Researcher ID: B-4861-2019, SPIN Code: 8305-5600, n.m.podgornova@mospolytech.ru

Andrey Vladimirovich Shakhovskoy, Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (109004, Moscow, Zemlyanoy Val St., 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-304X>, Scopus ID: 57300794800, Researcher ID: ABR-0565-2022, SPIN Code: 2315-9205, a.shakhovskoy@mgutm.ru

Сравнительный анализ качества и оценка пригодности биозернового сырья в технологии хлебобулочных изделий функционального назначения

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

В. В. Федорова¹, М. С. Воронина², Е. П. Рящикова¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Виктория Владимировна Федорова
E-mail: vikulya_fedorova_2002@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Федорова, В.В., Воронина, М.С., & Рящикова, Е.П. (2025). Сравнительный анализ качества и оценка пригодности биозернового сырья в технологии хлебобулочных изделий функционального назначения. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 112-126. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.675>

ПОСТУПИЛА: 12.07.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Современные тенденции, прослеживаемые на рынке хлебобулочных изделий, обуславливают необходимость расширения ассортимента продукции, в том числе органической. Исследования качества органически выращенных зерновых культур в России ограничены ввиду малого распространения органического земледелия и недостатка данных, но приобретают актуальность в контексте государственной политики Российской Федерации в отношении производства органической продукции, ориентированной на расширение данного сегмента рынка.

Цель: Проанализировать органически выращенные культуры и продукты их переработки, сопоставить полученные данные с требованиями действующей нормативной документацией России, оценить их пригодность для производства хлебобулочных изделий функционального назначения и расширения ассортимента органической продукции на российском рынке.

Материалы и методы: Объектами исследования были биопшеница яровая сорта Тулайковская-10, биорожь сорта Саратовская-7 и продукты их переработки: мука с диаметром помола 1,0 и 0,5 мм. Оценка качества проводилась в соответствии с общепринятыми методиками для определения органолептических и физико-химических показателей зерновых культур. Был выполнен сравнительный анализ полученных данных на соответствие нормативной документации по данным видам продукции.

Результаты: В ходе анализа было выявлено превышение доли испорченных зерен в образце биопшеницы (3,8 % при норме $\leq 3,0$ %) и фузариозных зерен в образце биоржи (1,2 % при норме $\leq 1,0$ %), остальные показатели были в пределах допустимых значений. Установлена зависимость между степенью измельчения и показателями муки. Для муки из биопшеницы: при уменьшении диаметра частиц с 1,0 до 0,5 мм происходит снижение влажности на 0,5 % (11,2 \rightarrow 10,7), числа падения – на 15 с (215,0 \rightarrow 200,0), кислотное число жира увеличивается а на 1,13 мг КОН/1 г (16,83 \rightarrow 17,96). Для муки из биоржи: снижается число падения на 18 с (226,0 \rightarrow 208,0), кислотное число жира возрастает на 10 мг КОН/1 г (57,33 \rightarrow 67,33).

Выводы: Научная новизна работы заключается в комплексной оценке качества российских органических зерновых культур и продуктов их переработки. Практическая значимость исследования состоит в обосновании возможности применения органических зерновых культур в хлебопечении. Полученные результаты создают научную основу для расширения производства и переработки органических зерновых культур в России и способствуют развитию отечественного рынка органической хлебобулочной продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

хлебобулочные изделия; органические культуры; биопшеница; биорожь; биоорганическая мука; органолептический анализ; физико-химический анализ

Comparative analysis of the quality and assessment of the suitability of organic grain raw materials in the technology of functional bakery products

¹ Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Victoria V. Fedorova¹, Marianna S. Voronina²,
Elizaveta P. Ryashchikova¹

CORRESPONDENCE:

Victoria V. Fedorova

E-mail: vikulya_fedorova_2002@mail.ru

FOR CITATIONS:

Fedorova, V.V., Voronina, M.S., & Ryashchikova, E.P. (2025). Comparative analysis of the quality and assessment of the suitability of organic grain raw materials in the technology of functional bakery products. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 112-126. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.675>

RECEIVED: 12.07.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Current trends in the bakery market necessitate the expansion of the product range, including organic products. Research on the quality of organically grown grain crops in Russia is limited due to the low prevalence of organic farming and lack of data, but it is becoming relevant in the context of the Russian Federation's state policy on the production of organic products aimed at expanding this market segment.

Purpose: To analyze organically grown crops, as well as their processed products, followed by a comparative analysis of the data obtained with the regulatory documentation in force in Russia to assess their suitability in the production of functional bakery products and expand the range of organic products on the Russian market.

Materials and Methods: The objects of the study were organic spring wheat of the Tulaykovskaya-10 variety, organic rye of the Saratovskaya-7 variety and products of their processing: flour with a grinding diameter of 1.0 and 0.5 mm. The quality assessment was carried out in accordance with generally accepted methods for determining the organoleptic and physico-chemical parameters of grain crops. A comparative analysis of the data obtained was carried out with regulatory documentation for these types of products.

Results: The analysis revealed an excess of the proportion of spoiled grains in the sample of organic wheat (3.8% at a rate of < 3.0%) and fusarium grains in the sample of organic rye (1.2% at a rate of < 1.0%), the remaining indicators are within acceptable values. The relationship between the degree of grinding and flour parameters has been established: when the particle diameter decreases from 1.0 to 0.5 mm, humidity decreases by 0.5% (11.2 → 10.7), the number of drops by 15 seconds (215.0 → 200.0), an increase in the acid number of fat by 1.13 mg KOH/1 g (16.83 → 17.96) for organic wheat flour; a decrease in the number of drops by 18 c (226.0 → 208.0), an increase in the acid number of fat by 10 mg KOH/1 g (57.33 → 67.33) for organic rye flour.

Conclusion: The scientific novelty of the work lies in a comprehensive assessment of the quality of Russian organic grain crops and their processed products. The practical significance of the study is to substantiate the possibility of using organic grain crops in baking. The results obtained create a scientific basis for expanding the production and processing of organic grain crops in Russia and contribute to the development of the domestic market of organic bakery products.

KEYWORDS

bakery products; organic crops; organic wheat; organic rye; organic flour; organoleptic analysis; physicochemical analysis

ВВЕДЕНИЕ

Хлебобулочные изделия остаются важной составляющей суточного рациона в большинстве стран, включая Россию, где потребление составляет в среднем 59–70 кг/год на душу населения (Benayad et al., 2021; Mesta-Corral et al., 2024). Несмотря на стабильный рост рынка хлебобулочной продукции, наблюдается тенденция к снижению общего потребления при одновременном увеличении интереса к функциональному питанию, ассортимент которого не всегда соответствует современным запросам населения (Князева, 2021; Данько, 2023; Шахрай и др., 2021). Это обуславливает необходимость расширения ассортимента изделий с повышенной пищевой ценностью (Agama-Acevedo et al., 2019).

Популярность органического земледелия активно растет как в России, так и во всем мире (Гурджиев и др., 2025; Жапаров и др., 2022). Это подтверждается принятием и вступлением в силу новых нормативных актов, регулирующих производство органической продукции, таких как Федеральный закон № 280-ФЗ «Об органической продукции», вступивший в силу с 1 января 2020 г. (Ползиков и др., 2024), увеличением числа сертифицированных производителей органической продукции, расширением площадей, отведенных под выращивание органической продукции, ростом спроса на органическую и экологически чистую продукцию (Саратцева и др., 2024). Однако, несмотря на потенциал России как крупнейшего аграрного государства и почти 14-кратное увеличение площади земель под органическое сельское хозяйство в период с 2010 г. по 2020 г., под органическое производство в 2020 г. было занято лишь 615,19 тыс. га земель – 0,16% от общей площади земель сельхозназначения в стране. Доля российских органических сельскохозяйственных земель в мировой структуре площадей, отведенных под органическое производство (74,93 млн. га), составляет менее 1,0% (Криничная, 2022). Основными ограничительными факторами являются высокие затраты на сертификацию, недостаток инфраструктуры для обработки и хранения органической продукции, низкая информированность потребителей о преимуществах органических продуктов (Доценко и др., 2024), ограниченная доступность органической продукции для потребителей, фальсификация товаров, которая обуславливает недоверие потребителей к органическим продуктам и системе сертификации (Войтюк и др., 2024).

Пшеница и рожь традиционно являются основными культурами для хлебопечения и представляют особый интерес в органическом земледелии (Engindeniz et al., 2019; Kettlewell et al., 2023). Россия входит в число крупнейших производителей пшеницы (82,4 млн тонн в 2024 г.) и сохраняет лидирующие позиции на мировом рынке (Буценко и др., 2024). Рожь обладает высокой адаптивностью к неблагоприятным условиям, естественной устойчивостью к болезням и вредителям, что делает ее перспективной для органического земледелия (Поморцев и др., 2023). Помимо технологических преимуществ, ржаные изделия характеризуются низким гликемическим индексом и благотворным влиянием на метаболизм инсулина (Pal et al., 2025), а полученные в органических условиях зерновые культуры отличаются значительно меньшим содержанием пестицидов и тяжелых металлов, что гарантирует потребителям её безопасность (Bergman et al., 2022).

Несмотря на растущий интерес к органическим продуктам, количество исследований, посвященных качеству органически выращенных зерновых культур в России, остается ограниченным. Предыдущие работы по оценке показателей качества органической пшеницы и ржи демонстрируют противоречивые результаты, что связано с различиями в сортах культур, природно-климатических условиях и методах анализа (Chebet, 2021). Для отечественных условий систематические данные о соответствии органолептических и физико-химических показателей органического зерна действующим стандартам практически отсутствуют, что сдерживает развитие технологий производства и переработки органического зерна и его внедрение в промышленное хлебопечение (Хусайнов и др., 2025).

В рамках исследования выполняются комплексная оценка качества российских органических зерновых культур (пшеницы и ржи) и анализ зависимости технологических параметров биоорганической муки от степени помола, чтобы понять, как именно они изменяются, и определить оптимальные режимы переработки для создания подходящего продукта для хлебопечения. Цель данной работы проанализировать органически выращенные культуры (пшеницы и ржи), а также продукты их переработки, сопоставить полученные данные с требованиями нормативной документации, действующей на территории России, для оценки их пригодности для производства хлебобулочных изделий функци-

онального назначения и расширения ассортимента органической продукции на российском рынке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оборудование

Образцы биозерновых культур были получены методом отбора проб в соответствии с требованиями ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия» для биопшеницы и ГОСТ 16990-2017 «Рожь. Технические условия» для биоржи. Образцы биоорганической муки были получены путем очистки проб биопшеницы и биоржи от посторонних примесей посредством перемалывания цельных зерен на лабораторной мельнице «ВЬЮГА ЗМТ» отечественного производства от компании «Элтемикс Агро», которая также использовалась для получения проб для исследования. Полученную муку просеивали через лабораторные сита с размером ячеек 1,0 и 0,5 мм.

Материалы

Объектами исследования служили образцы органически выращенных культур: биопшеницы яровой сорта Тулайковская-10, биоржи сорта Саратовская-7, хранившихся до проведения исследования 28 суток в герметичных контейнерах при температуре 18 ± 2 °C и влажности 65 ± 5 %., непосредственно перед анализом из зерна были получены образцы биоорганической муки.

Методы

Органолептические и физико-химические показатели биопшеницы и биоржи, характеризующие их качество, определяли по общепринятым методикам: запах, цвет, обесцвеченность — по ГОСТ 10967-2019 «Зерно. Методы определения запаха и цвета», массовую долю влаги — по ГОСТ 13586.5-2015 «Зерно. Метод определения влажности», массовую долю белка — по ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка», содержание сорной и зерновой примесей — по ГОСТ 30483-97 «Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности, содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-чере-

пашкой; содержания металломагнитной примеси», типовой состав — по ГОСТ 10940-64 «Зерно. Методы определения типового состава», натуру — по ГОСТ 10840-2017 «Зерно. Метод определения натуры», стекловидность — по ГОСТ 10987-76 «Зерно. Метод определения стекловидности», число падения — по ГОСТ 27676-88 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения числа падения», содержание фузариозных зерен — по ГОСТ 31646-2012 «Зерновые культуры. Метод определения содержания фузариозных зерен», кислотность по болтушке — по ГОСТ 10844-74 «Зерно. Метод определения кислотности по болтушке», пленчатость — по ГОСТ 10843-76 «Зерно. Метод определения пленчатости». Показатели образцов биоорганической муки определяли по следующей нормативной документации: запах, цвет, вкус — по ГОСТ 27558-2022 «Мука и отруби. Методы определения цвета, запаха, вкуса и хруста», массовую долю влаги — по ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности», число падения — по ГОСТ 27676-88 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения числа падения», кислотное число жира — по ГОСТ 31700-2012 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения кислотного числа жира». Так как на сегодняшний день в России нет действующей нормативной документации на данную продукцию, полученные данные сравнивались с нормативной документацией на аналогичный вид продукции: для биопшеницы — ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия», для биоржи — ГОСТ 16990-2017 «Рожь. Технические условия», для органической муки из биопшеницы — ГОСТ 26574-2017 «Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия», для органической муки из биоржи — ГОСТ 7045-2017 «Мука ржаная хлебопекарная. Технические условия».

Процедура исследования

Исследование показателей качества отобранных и подготовленных образцов биозерновых культур и продуктов их переработки (мука) производилось в несколько этапов, включающих органолептический и физико-химический анализы.

Органолептический анализ проводился в условиях дневного освещения (интенсивность 400–600 лк) с использованием средних проб, отобранных в соответствии с требованиями нормативной документации. Для биозерновых культур анализировались

следующие параметры: состояние, запах и цвет; степень обесцвеченности; наличие сорной и зерновой примесей по средней пробе массой 50,0 г; содержание фузариозных зерен по пробе массой 50,0 г после очистки от крупной сорной примеси. Оценка органолептических показателей биоорганической муки включала анализ цвета, запаха, вкуса и выявление минеральных примесей во всех пробах.

Физико-химические исследования образцов биозерновых культур проводились следующим образом: влажность определялась методом высушивания при 105 °С до постоянного веса в навесках массой 5,0 г, отобранных из тщательно перемешанной средней пробы зерна массой 300 г; натура (масса 1 л зерна) измерялась с использованием стандартной воронки и мерного цилиндра; массовая доля белка определялась методом Кьельдаля по навескам массой 0,5 г, взятым из средней пробы зерна массой 50,0 г после ручной очистки от сорной примеси и помола на лабораторной мельнице; число падения измерялось в пробах массой 6,7 г для биопшеницы и 6,5 г для биоржи, отобранных из средней пробы массой 300 г после предварительной очистки и размола; кислотность по болтушке определялась титрованием водной суспензии муки 0,1 н. раствором гидроокиси натрия по пробам массой 5,0 г, отобранным из десяти разных мест тщательно перемешанной средней пробы зерна массой 50,0 г. Для биопшеницы дополнительно определялись стекловидность ручным методом по средней пробе массой 50,0 г и количество клейковины промывкой теста до получения чистой клейковины в навесках массой 25,0 г, выделенных из проб зерна массой 60,0 г после очистки, размола и тщательного перемешивания.

Анализ продуктов переработки включал определение влажности методом высушивания муки в воздушно-тепловом шкафу при 130 °С в течение 40 мин в навесках массой 5,0 г, отобранных из разных мест тщательно перемешанных средних проб; числа падения по методике, аналогичной для зерна; кислотного числа жира методом титрования по пробам массой 10,0 г.

Анализ данных

Все измерения проводились в трехкратной повторности для обеспечения статистической достоверности результатов. При статистической обработке

данных рассчитывали среднее арифметическое значение, стандартное отклонение (SD). Достоверность различий между группами оценивалась с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $P < 0,05$. Математическая обработка данных осуществлялась с применением программного пакета Microsoft Office Excel 2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Органолептический анализ образцов биопшеницы, биоржи и продуктов их переработки

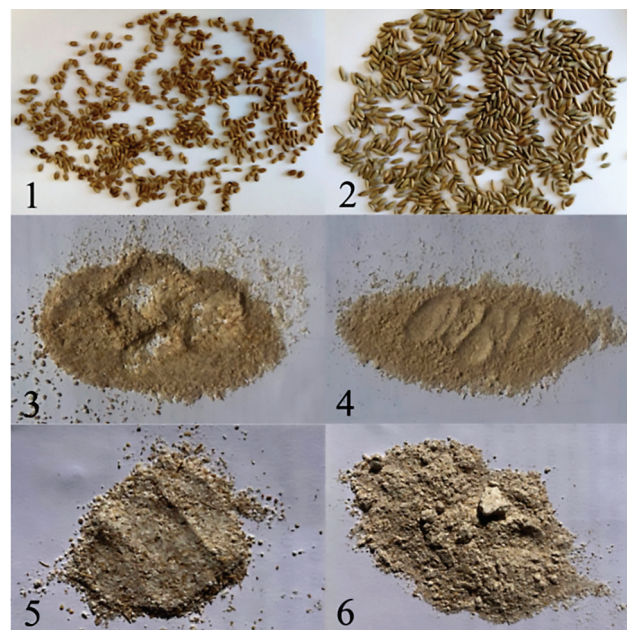
На Рисунке 1 представлен внешний вид исследуемых образцов.

Рисунок 1

Внешний вид исследуемых образцов

Figure 1

The Appearance of the Studied Samples



Примечание. 1 – биопшеница (образец № 1); 2 – биорожь (образец № 2); 3 – органическая мука из биопшеницы (размер сита 1,0 мм; образец № 3); 4 – органическая мука из биопшеницы (размер сита 0,5 мм; образец № 4); 5 – органическая мука из биоржи (размер сита 1,0 мм; образец № 5); 6 – органическая мука из биоржи (размер сита 0,5 мм; образец № 6)

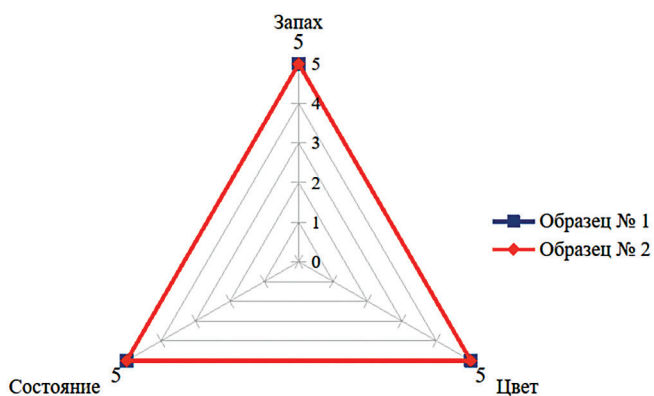
Note. 1 – organic wheat (sample No. 1); 2 – organic rye (sample No. 2); 3 – organic wheat flour (1.0 mm sieve size; sample No. 3); 4 – organic wheat flour (0.5 mm sieve size; sample No. 4); 5 – organic rye flour (sieve size 1.0 mm; sample No. 5); 6 – organic rye flour (sieve size 0.5 mm; sample No. 6)

Рисунок 2

Профилограмма органолептического анализа образцов биозерновых культур

Figure 2

Profigram of Organoleptic Analysis of Samples of Organic Grain Crops



Примечание. Оценка производилась по 5-балльной шкале, где 5 – полное соответствие показателя требованиям нормативной документации; 1 – полное несоответствие.

Note. The assessment was carried out on a 5-point scale, where 5 – full compliance of the indicator with the requirements of regulatory documentation; 1 – complete non-compliance.

Органолептическая оценка зерна является обязательной процедурой в системе контроля качества зернового сырья для пищевой промышленности.

На Рисунке 2 представлена профилограмма органолептического анализа образцов биозерновых культур.

Таблица 1

Органолептические показатели образцов биозерновых культур в соответствии с нормативной документацией

Table 1

Organoleptic Parameters of Samples of Organic Grain Crops in Accordance with Regulatory Documentation

Наименование показателя	Образец № 1		Образец № 2	
	характеристика	соответствие ГОСТ 9353-2016	характеристика	соответствие ГОСТ 16990-2017
Обесцвеченность	Первая степень	Соответствует	Первая степень	Соответствует
Сорная примесь, %	Не обнаружено	Соответствует	0,04 ± 0,2	Соответствует
Испорченные зерна, %	3,8 ± 0,7	Не соответствует	0,60 ± 0,3	Соответствует
Зерновая примесь, %	Не обнаружено	Соответствует	Не обнаружено	Соответствует
Фузариозные зерна, %	1,0 ± 0,3	Соответствует	1,20 ± 0,36	Не соответствует

В Таблице 1 представлены результаты органолептического анализа образцов биозерновых культур с оценкой их соответствия требованиям нормативной документации.

Визуальная оценка зерна биопшеницы (Рисунок 1, образец № 1) показала, что зерна имеют эллиптическую форму размером от 3 мм до 6 мм, цвет колеблется от светло-золотистого до насыщенного коричневого. Присутствуют отдельные зерна с признаками поражения. Образец не имеет посторонних запахов, механические примеси отсутствуют (Рисунок 2, образец № 1). Зерна биоржи (Рисунок 1, образец № 2) имеют продолговатую вытянутую форму размером до 10 мм, цвет варьируется от светло-коричневого до зеленоватого и серого. Большинство зерен не имеют видимых повреждений и следов заражения. Наблюдается минимальное количество сорной примеси, визуально зерно выглядит здоровым (Рисунок 2, образец № 2).

Анализ данных Таблицы 1 показал, что в образце биопшеницы выявлено превышение нормативного значения по количеству испорченных зерен, в образце биоржи обнаружено превышение содержания фузариозных зерен, что может быть связано с особенностями органических методов выращивания, ограничивающих применение химических средств защиты растений от болезней и вредителей. По другим органолептическим показателям образцы биозерновых культур соответствуют требованиям действующих стандартов.

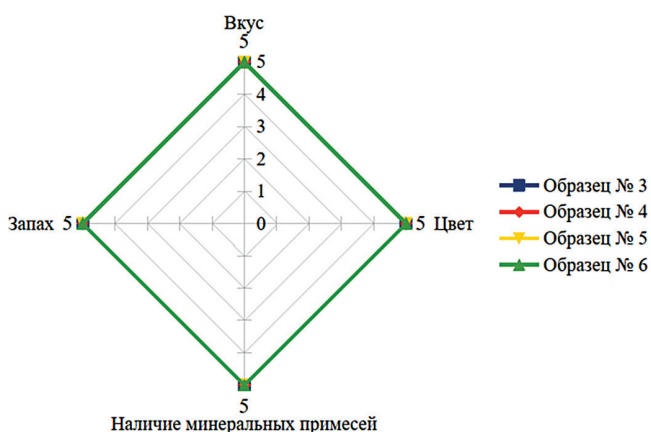
На Рисунке 3 представлена профилограмма органолептического анализа образцов биоорганической муки.

Рисунок 3

Профилограмма органолептического анализа образцов биоорганической муки

Figure 3

Profilogram of Organoleptic Analysis of Organic Flour Samples



Примечание. Оценка производилась по 5-балльной шкале, где 5 – полное соответствие показателя требованиям нормативной документации; 1 – полное несоответствие.

Note. The assessment was carried out on a 5-point scale, where 5 – full compliance of the indicator with the requirements of regulatory documentation; 1 – complete non-compliance.

При оценке внешнего вида образцов биоорганической муки было выявлено, что мука, просеянная через сито с размером ячеек 1,0 мм (Рисунок 1, образец № 3 и образец № 5), имеет более крупные частицы, что создает визуальную неоднородную структуру с выраженными темными вкраплениями

на светлом фоне эндосперма. Мука, полученная просеиванием через сито с размером ячеек 0,5 мм (Рисунок 1, образец № 4 и образец № 6), характеризуется большей однородностью, в ней практически не наблюдается крупных частиц. Во всех образцах отсутствуют минеральные примеси и посторонние привкусы, запахи (Рисунок 3).

Физико-химический анализ образцов биопшеницы, биоржи и продуктов их переработки

В Таблице 2 представлены физико-химические показатели образцов биозерновых культур.

По данным показателям образцы биопшеницы и биоржи соответствуют нормативным требованиям для данных видов культур.

В Таблице 3 представлены физико-химические показатели образцов биоорганической муки.

Анализ данных Таблицы 3 показал, что при уменьшении размера ячеек сита с 1,0 мм до 0,5 мм наблюдается тенденция к снижению влажности и числа падения, а также повышению кислотного числа жира как для муки из биопшеницы, так и для муки из биоржи. Данные исследования физико-химических показателей образцов биоорганической муки находятся в установленных пределах, регламентируемых соответствующей нормативной документацией.

Таблица 2

Физико-химические показатели образцов биозерновых культур в соответствии с нормативной документацией

Table 2

Physicochemical Parameters of Organic Grain Samples in Accordance with Regulatory Documentation

Наименование показателя	Образец № 1		Образец № 2	
	характеристика	соответствие ГОСТ 9353-2016	характеристика	соответствие ГОСТ 16990-2017
Массовая доля влаги, %	12,0 ± 0,3	Соответствует	10,00 ± 0,3	Соответствует
Натура, г/л	833,0 ± 5,0	Соответствует	681,00 ± 5,0	Соответствует
Стекловидность, %	65,3 ± 5,0	Соответствует		Соответствует
Количество клейковины, %	32,2 ± 0,5	Соответствует	–	Соответствует
Массовая доля белка, %	14,2 ± 0,24	Соответствует	7,80 ± 0,16	Соответствует
Число падения, с	207,0 ± 7	Соответствует	228,00 ± 5	Соответствует
Кислотность по болтушке, °	1,7 ± 0,2	Соответствует	2,00 ± 0,2	Соответствует

Таблица 3

Физико-химические показатели образцов биоорганической муки в соответствии с нормативной документацией

Table 3

Physicochemical Parameters of Organic Flour Samples in Accordance with Regulatory Documentation

Наименование показателя	Образец № 3	Образец № 4	Соответствие ГОСТ 26574-2017	Образец № 5	Образец № 6	Соответствие ГОСТ 7045-2017
Влажность, %	11,20 ± 0,2	10,70 ± 0,2	Соответствует	8,00 ± 0,2	8,00 ± 0,2	Соответствует
Число падения, с	215,00 ± 10	200,00 ± 3	Соответствует	226,00 ± 4	208,00 ± 8	Соответствует
Кислотное число жира, мг КОН/1 г	16,83 ± 1,68	17,96 ± 1,8	Соответствует	57,33 ± 5,73	67,33 ± 6,73	Соответствует

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Качество зерна в условиях органического производства

Проведенный сравнительный анализ полученных данных показал, что органически выращенные зерновые культуры и продукты их переработки в целом соответствуют требованиям действующей нормативной документации. По физико-химическим показателям все образцы полностью соответствуют регламентированным нормам, тогда как по органолептическим параметрам выявлены отклонения по количеству испорченных зерен в биопшенице и содержанию фузариозных зерен в биоржи.

Установленные для биопшеницы значения натуры (833 г/л), стекловидности (65,3%) и количества клейковины (32,2%) свидетельствуют о ее технологической пригодности для получения качественных хлебопродуктов с приемлемыми структурно-механическими свойствами.

Показатели массовой доли белка в зерне биопшеницы (14,2%) и биоржи (7,8%), полученные в данном исследовании, соответствуют требованиям, предъявляемым к сырью для хлебопекарного производства и сопоставимы с данными Tomczyńska-Mleko et al. (2022), где для яровой мягкой пшеницы, возделываемой в органических условиях зафиксированы значения 14,04–15,23%. Показатель числа падения находится в оптимальном диапазоне (200,0–228,0 с), обеспечивающем сбалансированное соотношение ферментативной активности и структурных свойств крахмала, что является ключевым условием для формирования качественных характеристик готового хлеба, включая достаточный объем, эластичность мякиша и оптимальные органолептические показатели (Малкандуев, 2022).

Однако полученные значения ниже, чем в работе Feledyn-Szewczyk et al. (2021), где для органической пшеницы и продуктов переработки на её основе наблюдали значения 256–314 с. Такие расхождения могут указывать на различия в климатических условиях выращивания или сортовой принадлежности зерна. Как отмечают Bernhoft et al. (2012), число падения значительно варьируется в зависимости от погодных условий в период созревания и способов хранения.

Содержание влаги в биопшенице (12,0%), обнаруженное нами, ниже данных, встречающихся в работе Fernández-Canto et al. (2024), которые отмечали 13,26%, что может быть связано с различиями в технологии сушки и условиях хранения. Однако наши результаты согласуются с исследованиями Khokhar et al. (2024), где для пшеницы, выращенной в органических условиях на ферме Латиф при Сельскохозяйственном университете Синда в Тандоджаме, были получены аналогичные значения (11,5–12,0%).

Анализ технологических характеристик зерна подтвердил помольную и хлебопекарную ценность исследованных образцов, что согласуется с выводами других авторов (Feledyn-Szewczyk et al., 2021; Lacko-Bartošová et al., 2022): зерновые культуры, выращенные в ограниченных условиях, в целом соответствуют требованиям качества для мукомольной и хлебопекарной промышленности.

Фитопатологические риски в органически выращенных зерновых культурах

Выявленные отклонения по количеству испорченных зерен для образца биопшеницы (3,8% при норме не более 3,0%) и фузариозных зерен

для биоржи (1,2% при норме не более 1,0%) могут указывать на потенциально повышенную уязвимость культур, выращенных в условиях органического земледелия, к фитопатогенным агентам, что обусловлено ограничениями в применении синтетических пестицидов и удобрений. Полученные данные подтверждают выводы Bernhoft et al. (2012) и Radzikowski et al. (2023) о необходимости разработки специальных стратегий защиты органических посевов от болезней. Эффективная минимизация фитосанитарных рисков в органическом земледелии требует комплексного подхода, включающего оптимизацию севооборотов с увеличением интервалов между посевами одной культуры; подбор сортов с естественной устойчивостью к патогенам; применение биологических препаратов на основе антагонистических микроорганизмов; точное соблюдение сроков уборки урожая. Исследования Feledyn-Szewczyk et al. (2021) и Peigné et al. (2014) демонстрируют, что правильно организованная органическая система земледелия с высоким биоразнообразием и оптимальной аэрацией посевов может обеспечить более низкую инфекционную нагрузку по сравнению с традиционными системами при условии использования адаптированных сортов и соблюдения агротехнологий. Перспективным направлением является селекция сортов, специально адаптированных к условиям органического земледелия, что позволит снизить зависимость от внешних факторов защиты.

Влияние степени помола на физико-химические свойства муки

Полученные экспериментальные данные подтвердили влияние степени помола на качественные характеристики биоорганической муки. Уменьшение размера частиц от 1,0 до 0,5 мм приводит к формированию более однородной структуры муки благодаря удалению крупных фракций. Изменения фиксировались по показателям влажности (снижение на 0,5% для муки из биопшеницы), числу падения (снижение на 15 с для биопшеничной и 18 с для биоржаной муки) и кислотному числу жира (увеличение на 1,13 мг КОН/1 г для биопшеничной и на 10,0 мг КОН/1 г биоржаной муки). Наблюдаемые изменения обусловлены активацией ферментативных и липолитических процессов вследствие механического повреждения крахмальных зерен и клеточных мембран в ходе интенсивного помола

и просеивания. Снижение числа падения указывает на повышение активности α -амилазы и может напрямую влиять на реологические свойства теста, под воздействием высокоактивных протеаз клейковина становится слишком слабой, и тесто сильно расплывается, ухудшается структура мякиша, что особенно критично для биоржаной муки, тогда как рост кислотного числа жира свидетельствует об усилении гидролитических процессов в липидах, что потенциально сокращает сроки хранения муки. Полученные результаты согласуются с данными Pang et al. (2021), свидетельствующими об увеличении содержания поврежденного крахмала при уменьшении размера частиц муки.

Зафиксированные значения параметров находятся в пределах, установленных нормативными документами для данной категории продукции, однако подчеркивают необходимость тщательного подбора и регулировки технологических процессов обработки зерна для получения качественной муки.

Ограничения исследования

Проведенное исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать. Использовано только одно место отбора проб, что не позволяет оценить региональные особенности качества органического зерна в различных климатических зонах России. Также отсутствует сравнение с традиционно выращенными культурами, что затрудняет оценку специфического влияния органических методов возделывания на качество зерна и муки. В работе не проводился анализ сортовых различий. Наконец, малый объем выборки снижает статистическую значимость и обобщаемость полученных выводов. Для получения более достоверных результатов необходимы исследования с расширенной выборкой, включающей различные сорта культур, выращенных в разных регионах России с применением как органических, так и традиционных методов земледелия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило технологическую пригодность органически выращенных зерновых культур для хлебопекарного производства и выявило специфические особенности

их качества. Научная значимость работы заключается в комплексной оценке качества биопшеницы и биоржи в условиях ограниченного распространения органического земледелия в России и недостаточной изученности данного вопроса в отечественной научной литературе. Получена сравнительная характеристика органолептических и физико-химических показателей органического зерна и муки различной степени помола в соответствии с требованиями действующей нормативной документации.

С научной точки зрения показано, что органическое производство обеспечивает получение зерна с оптимальными технологическими характеристиками, однако требует особого внимания к фитосанитарному состоянию культур из-за ограничений в применении синтетических средств защиты, разработки специализированных агротехнологий для органического сектора, учитывающих биологические особенности сортов и региональные особенности фитопатологической обстановки.

С прикладной точки зрения выявленные параметры качества подтверждают пригодность органического зерна для производства хлебобулочных изделий на основе биозернового компонента. Установлено, что степень помола оказывает влияние на функциональные свойства муки, снижение числа падения напрямую влияет на вязкость теста и объем готового хлеба, а увеличение кислотного числа жира может сократить сроки хранения изделий. Полученные данные позволяют оптимизировать технологии производства хлебобулочных изделий из биоорганической муки, варьируя степень помола для достижения необходимых реологических характеристик теста и потребительских свойств конечной продукции.

С методической точки зрения результаты исследования демонстрируют возможность использования существующих нормативных документов для оценки качества органического зерна и продуктов его переработки при условии включения дополнительных параметров контроля фитосанитарного состояния.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: многофакторный анализ влияния почвенно-климатических условий и сортовых особенностей на качество органического зерна; количественная оценка содержания микро-

токсинов в образцах с повышенным уровнем фузариозного поражения; расширение спектра исследований за счет альтернативных видов культур; проведение комплексного сравнительного анализа органического и традиционного зерна с одинаковыми сортовыми характеристиками для объективной оценки влияния систем земледелия на технологические свойства сырья.

Результаты исследования вносят вклад в развитие устойчивого сельского хозяйства в России, способствуя созданию научно обоснованных рекомендаций по производству экологически чистого сырья для пищевой промышленности. Органические зерновые культуры представляют особую ценность для производства функциональных хлебобулочных изделий благодаря естественному содержанию биологически активных веществ и отсутствию остаточных количеств синтетических пестицидов и удобрений, что соответствует современным запросам на здоровое питание и обеспечение продовольственной безопасности населения в условиях растущего спроса на экологически чистую продукцию.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Виктория Владимировна Федорова: проведение исследования, визуализация, создание рукописи и ее редактирование.

Марианна Сергеевна Воронина: концептуализация, разработка методологии, научное руководство исследованием, создание рукописи и её редактирование.

Елизавета Павловна Рящикова: проведение исследования, визуализация.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Victoria V. Fedorova: investigation; visualization; writing – review & editing.

Marianna S. Voronina: conceptualization; methodology; supervision; writing – review & editing.

Elizaveta P. Ryashchikova: investigation; visualization.

ЛИТЕРАТУРА

- Буценко, И. Н., & Анисимов, Д. П. (2024). Россия на мировом рынке зерна: статистический обзор. *Экономика и бизнес: теория и практика*, 4-1(110), 101–105. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-0450-2024-4-1-101-105>
- Войтюк, В. А., Кондратьева, О. В., & Слинко, О. В. (2024). Органическое сельское хозяйство в России: вызовы и возможности. *АгроЭкоИнженерия*, 3(120), 19–32. <http://dx.doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32>
- Гурджиев, Г., Ахмедов, А., Садыков, Б., & Мамудова, Л. (2025). Устойчивое развитие сельского хозяйства: интеграция традиционных методов и современных технологий. *IN SITU*, 2, 42–44.
- Данько, Н. Н. (2023). Анализ российского рынка хлеба и хлебобулочных изделий. *Экономика и бизнес: теория и практика*, 12-1(106), 54–57. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-0450-2023-12-1-54-57>
- Доценко, А. Е., & Емельянов, Г. А. (2024). Устойчивое земледелие: правовые инструменты для поддержки органического сельского хозяйства. *Юриспруденция в теории и на практике: актуальные вопросы и современные аспекты: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции* (с. 33–36). Пенза: Наука и Просвещение.
- Жапаров, Г. Д., Момунбеков Г. Д., & Тазабекова Г. А. (2022). Переход от традиционного сельского хозяйства к органическому как инновация в сельском хозяйстве Кыргызской Республики. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*, (3), 181–185. <http://dx.doi.org/10.26104/NNTIK.2022.46.20.031>
- Князева, Д. Д. (2021). Потребление хлеба и хлебобулочных изделий в Российской Федерации. *Наука без границ*, 3(55), 67–73.
- Криничная, Е. П. (2022). Органическое сельское хозяйство России: современное состояние, ключевые проблемы развития и направления государственной поддержки. *Вестник аграрной науки*, 3(96), 99–106. <http://dx.doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.99>
- Малкандуев, Х. А., Шамурзаев, Р. И., & Малкандуева, А. Х. (2022). Понятие и требования к качеству зерна пшеницы. *Известия КБНЦ РАН*, 6(110), 203–216. <http://dx.doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-203-216>
- Ползиков, Д. А., & Алещенко, В. В. (2024). О стратегии развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года. *Проблемы прогнозирования*, (4), 149–165. <http://dx.doi.org/10.47711/0868-6351-205-149-165>
- Поморцев, А. В., Дорофеев, Н. В., Зорина, С. Ю., Катышева, Н. Б., Соколова, Л. Г., Журавкова, А. С., & Михайлова, Е. В. (2023). Оценка популяционных и гибридных сортов озимой ржи в условиях Восточной Сибири. *Агрономия*, 13, 1431. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy13051431>
- Саратцева, Е. А., & Дабахов М. В. (2024). Органическое сельское хозяйство: перспективы развития в России с учетом международного рынка. *Вестник Московского университета*, 79(2), 136–146. <http://dx.doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-136-146>
- Хусайнов, Х. А., Завалин, А. А., Чеботарь, В. К., & Елмурзаева, Ф. Д. (2025). Современное развитие и эффективность биологизации земледелия в России. *Международный сельскохозяйственный журнал*, 68(5), 563–566. http://dx.doi.org/10.55186/25876740_2025_68_5_563
- Шахрай, Т. А., Воробьева, О. В., & Викторова, Е. П. (2021). Основные тенденции развития рынка функциональных хлебобулочных изделий. *Новые технологии*, 17(3), 51–58. <http://dx.doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>
- Agama-Acevedo, E., Pacheco-Vargas, G., Gutierrez-Meraz, F., Tovar, J., & Bello-Perez, L. A. (2019). Dietary fiber content, texture, and in vitro starch digestibility of different white bread crusts. *Journal of Cereal Science*, 89, 102824. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102824>
- Benayad, A., Taghouti, M., Benali, A., Aboussaleh, Y., & Benbrahim, N. (2021). Nutritional and technological assessment of durum wheat-faba bean enriched flours, and sensory

- quality of developed composite bread. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 635–642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.053>
- Bergman, C., & Pandhi, M. (2022). Organic rice production practices: Effects on grain end-use quality, healthfulness, and safety. *Foods*, 12(1), 73. <http://dx.doi.org/10.3390/foods12010073>
- Bernhoft, A., Torp, M., Clasen, P.E., Løes, A.K., & Kristoffersen, A.B. (2012). Influence of agronomic and climatic factors on Fusarium infestation and mycotoxin contamination of cereals in Norway. *Food Additives and Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 29, 1129–1140. <http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2012.672476>
- Chebet, A. (2021). Systematic literature review on organic farming for sustainable agricultural production: Review article. *International Journal of Contemporary Research and Review*, 12(03), 20355–20360. <http://dx.doi.org/10.15520/ijerr.v12i03.891>
- Engindeniz, S., & Bolatova, Z. (2019). A study on consumption of composite flour and bread in global perspective. *British Food Journal*, 123, 1962–1973. <http://dx.doi.org/10.1108/BFJ-10-2018-0714>
- Feledyn-Szewczyk, B., Cacak-Pietrzak, G., Lenc, L., Gromadzka, K., & Dziki, D. (2021). Milling and baking quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) from organic farming. *Agriculture*, 11, 765. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture11080765>
- Fernández-Canto, N., García-Gómez, M. B., Vázquez-Odériz, M. L., Lombardero-Fernández, M., Pereira-Lorenzo, S., & Cobos, Á. et al. (2024). Autochthonous wheat grown in organic and conventional systems: nutritional quality of flour and bread. *Foods*, 13(7), 1120. <https://doi.org/10.3390/foods13071120>
- Kettlewell, P., Byrne, R., & Jeffery, S. (2023). Wheat area expansion into northern higher latitudes and global food security. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 351, 108499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2023.108499>
- Khokhar, A., Soomro, A. H., Depar, U., & Khaskheli, S. (2024). Comparative analysis of organic and conventional growing systems on physicochemical characteristics and nutritional quality of wheat. *RADS Journal of Food Biosciences*, 2(2), 81–86. <https://doi.org/10.37962/jfbs.v2i2.24>
- Lacko-Bartošová, M., Lacko-Bartošová, L., Kaur, A., & Moudrý, J. (2022). Comparative assessment of agro-morphological and quality traits of ancient wheat cultivars grown under organic farming. *Agriculture*, 12, 1476. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture12091476>
- Mesta-Corral, M., Gómez-García, R., Balagurusamy, N., León, C. T., & Hernández-Almanza, A. Y. (2024). Technological and nutritional aspects of bread production: An overview of current status and future challenges. *Foods*, 13, 2062. <http://dx.doi.org/10.3390/foods13132062>
- Pal, P., Dey, A., Samanta, S., Ahmed, R., Das, S., Dash, S. K., Das, B., & Purewal, S. S. (2025). Satiety status and health benefiting features of rye-based products. In S. S. Purewal (Ed.), *Rye: Processing, Nutritional Profile and Commercial Uses* (pp. 157–177). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-86613-5_7
- Pang, J., Guan, E., Yang Y., Li, M., & Bian, K. (2021). Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality. *Food Science and Nutrition*, 9(9), 4691–4700. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.2008>
- Peigné, J., Messmer, M., Aveline, A., Berner, A., Mäder, P., & Carcea, M. et al. (2014). Wheat yield and quality as influenced by reduced tillage in organic farming. *Organic Agriculture*, 4, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1007/s13165-013-0055-x>
- Radzikowski, P., Jończyk, K., Feledyn-Szewczyk, B., & Jóźwicki, T. (2023). Assessment of resistance of different varieties of winter wheat to leaf fungal diseases in organic farming. *Agriculture*, 13, 875. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13040875>
- Tomczyńska-Mleko, M., Kwiatkowski, C. A., Harasim, E., Leśniowska-Nowak, J., Mleko, S., & Terpiłowski, K. et al. (2022). Influence of farming system and forecrops of spring wheat on protein content in the grain and the physicochemical properties of unsonicated and sonicated gluten. *Molecules*, 27(12), 3926. <https://doi.org/10.3390/molecules27123926>

REFERENCES

- Butsenko, I. N., & Anisimov, D. P. (2024). Russia in the global grain market: A statistical overview. *Economics and Business: Theory and Practice*, 4-1(110), 101–105. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-0450-2024-4-1-101-105>
- Voityuk, V. A., Kondratieva, O. V., & Slinko, O. V. (2024). Organic agriculture in Russia: Challenges and opportunities. *Agroecoengineering*, 3(120), 19–32. <http://dx.doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-19-32>
- Gurdjieff, G., Akhmedov, A., Sadykov, B., & Mamudova, L. (2025). Sustainable agricultural development: Integration of traditional methods and modern technologies. *IN SITU*, 2, 42–44.
- Danko, N. N. (2023). Analysis of the Russian bread and bakery products market. *Economics and Business: Theory and Practice*, 12-1(106), 54–57. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-0450-2023-12-1-54-57>
- Dotsenko, A. E., & Yemelyanov, G. A. (2024). Sustainable agriculture: Legal instruments to support organic agriculture. *Jurisprudence in theory and in practice: current issues and modern aspects: collection of articles of the XIX International Scientific and Practical Conference, Penza, August 25, 2024* (p. 33–36). Penza: Science and Education (IP Gulyaev G. Yu.).
- Japarov, G. D., Momunbekov, G. D., & Tazabekova, G. A. (2022). The transition from traditional agriculture to organic agriculture as an innovation in agriculture in the Kyrgyz Republic. *Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan*, (3), 181–185. <http://dx.doi.org/10.26104/NNTIK.2022.46.20.031>
- Knyazeva, D. D. (2021). Consumption of bread and bakery products in the Russian Federation. *Science Without Borders*, 3(55), 67–73.
- Krinichnaya, E. P. (2022). Organic agriculture in Russia: Current state, key development issues and areas of government support. *Bulletin of Agrarian Science*, 3(96), 99–106. <http://dx.doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.99>
- Malkanduev, H. A., Shamurzaev, R. I., & Malkandueva, A. H. (2022). The concept and requirements for the quality of wheat grain. *Izvestiya KBSC RAS*, 6(110), 203–216. <http://dx.doi.org/10.35330/1991-6639-2022-6-110-203-216>
- Polzikov, D. A., & Aleshchenko, V. V. (2024). On the strategy for the development of organic production in the Russian Federation until 2030. *Problems of Forecasting*, (4), 149–165. <http://dx.doi.org/10.47711/0868-6351-205-149-165>
- Pomortsev, A. V., Dorofeev, N. V., Zorina, S. Yu., Katysheva, N. B., Sokolova, L. G., Zhuravkova, A. S., & Mikhailova, E. V. (2023). Assessment of population and hybrid varieties of winter rye in the conditions of Eastern Siberia. *Agronomy*, 13, 1431. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy13051431>
- Sarattseva, E. A., & Dabakhov M. V. (2024). Organic farming: Development prospects in Russia, taking into account the international market. *Bulletin of the Moscow University*, 79(2), 136–146. <http://dx.doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-136-146>
- Khusainov, H. A., Zavalin, A. A., Chebotar, V. K., & Elmurzaeva, F. D. (2025). Modern development and effectiveness of biologization of agriculture in Russia. *International Agricultural Journal*, 68(5), 563–566. http://dx.doi.org/10.55186/25876740_2025_68_5_563
- Shakhray, T. A., Vorobyeva, O. V., & Viktorova, E. P. (2021). The main trends in the development of the functional bakery products market. *New Technologies*, 17(3), 51–58. <http://dx.doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>
- Agama-Acevedo, E., Pacheco-Vargas, G., Gutierrez-Meraz, F., Tovar, J., & Bello-Perez, L. A. (2019). Dietary fiber content, texture, and in vitro starch digestibility of different white bread crusts. *Journal of Cereal Science*, 89, 102824. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102824>
- Benayad, A., Taghouti, M., Benali, A., Aboussaleh, Y., & Benbrahim, N. (2021). Nutritional and technological assessment of durum wheat-faba bean enriched flours, and sensory quality of developed composite bread. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 635–642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.10.053>

- Bergman, C., & Pandhi, M. (2022). Organic rice production practices: Effects on grain end-use quality, healthfulness, and safety. *Foods*, 12(1), 73. <http://dx.doi.org/10.3390/foods12010073>
- Bernhoft, A., Torp, M., Clasen, P.E., Løes, A.K., & Kristoffersen, A.B. (2012). Influence of agronomic and climatic factors on Fusarium infestation and mycotoxin contamination of cereals in Norway. *Food Additives and Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 29, 1129–1140. <http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2012.672476>
- Chebet, A. (2021). Systematic literature review on organic farming for sustainable agricultural production: Review article. *International Journal of Contemporary Research and Review*, 12(03), 20355–20360. <http://dx.doi.org/10.15520/ijcr.v12i03.891>
- Engindeniz, S., & Bolatova, Z. (2019). A study on consumption of composite flour and bread in global perspective. *British Food Journal*, 123, 1962–1973. <http://dx.doi.org/10.1108/BFJ-10-2018-0714>
- Feledyn-Szewczyk, B., Cacak-Pietrzak, G., Lenc, L., Gromadzka, K., & Dziki, D. (2021). Milling and baking quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) from organic farming. *Agriculture*, 11, 765. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture11080765>
- Fernández-Canto, N., García-Gómez, M. B., Vázquez-Odériz, M. L., Lombardero-Fernández, M., Pereira-Lorenzo, S., & Cobos, Á. et al. (2024). Autochthonous wheat grown in organic and conventional systems: nutritional quality of flour and bread. *Foods*, 13(7), 1120. <https://doi.org/10.3390/foods13071120>
- Kettlewell, P., Byrne, R., & Jeffery, S. (2023). Wheat area expansion into northern higher latitudes and global food security. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 351, 108499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2023.108499>
- Khokhar, A., Soomro, A. H., Depar, U., & Khaskheli, S. (2024). Comparative analysis of organic and conventional growing systems on physicochemical characteristics and nutritional quality of wheat. *RADS Journal of Food Biosciences*, 2(2), 81–86. <https://doi.org/10.37962/jfbs.v2i2.24>
- Lacko-Bartošová, M., Lacko-Bartošová, L., Kaur, A., & Moudrý, J. (2022). Comparative assessment of agro-morphological and quality traits of ancient wheat cultivars grown under organic farming. *Agriculture*, 12, 1476. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture12091476>
- Mesta-Corral, M., Gómez-García, R., Balagurusamy, N., León, C. T., & Hernández-Almanza, A. Y. (2024). Technological and nutritional aspects of bread production: An overview of current status and future challenges. *Foods*, 13, 2062. <http://dx.doi.org/10.3390/foods13132062>
- Pal, P., Dey, A., Samanta, S., Ahmed, R., Das, S., Dash, S. K., Das, B., & Purewal, S. S. (2025). Satiety status and health benefiting features of rye-based products. In S. S. Purewal (Ed.), *Rye: Processing, Nutritional Profile and Commercial Uses* (pp. 157–177). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-86613-5_7
- Pang, J., Guan, E., Yang Y., Li, M., & Bian, K. (2021). Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality. *Food Science and Nutrition*, 9(9), 4691–4700. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.2008>
- Peigné, J., Messmer, M., Aveline, A., Berner, A., Mäder, P., & Carcea, M. et al. (2014). Wheat yield and quality as influenced by reduced tillage in organic farming. *Organic Agriculture*, 4, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1007/s13165-013-0055-x>
- Radzikowski, P., Jończyk, K., Feledyn-Szewczyk, B., & Józwicki, T. (2023). Assessment of resistance of different varieties of winter wheat to leaf fungal diseases in organic farming. *Agriculture*, 13, 875. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13040875>
- Tomczyńska-Mleko, M., Kwiatkowski, C. A., Harasim, E., Leśniowska-Nowak, J., Mleko, S., & Terpiłowski, K. et al. (2022). Influence of farming system and forecrops of spring wheat on protein content in the grain and the physicochemical properties of unsonicated and sonicated gluten. *Molecules*, 27(12), 3926. <https://doi.org/10.3390/molecules27123926>

ОБ АВТОРАХ

Федорова Виктория Владимировна, магистрант кафедры высшей биотехнологической школы Самарского государственного технического университета (СамГТУ), (443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1179-1663>, SPIN-код: 1713-9807, AuthorID: 1333429, vikulya_fedorova_2002@mail.ru

Воронина Марианна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии хранения и переработки плодоовощной и растениеводческой продукции Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева (РГАУ-МСХА), (127434, Россия, Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1537-6751>, Scopus ID: 57223024454, SPIN-код: 5754-6668, AuthorID: 857344, marianna419@rambler.ru

Рящикова Елизавета Павловна, студент кафедры высшей биотехнологической школы Самарского государственного технического университета (СамГТУ), (443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0381-527X>, liza.r.201106@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Victoria V. Fedorova, Master's student at the Department of Biotechnology High School of Samara State Technical University (SSTU), (244 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1179-1663>, SPIN-код: 1713-9807, AuthorID: 1333429, vikulya_fedorova_2002@mail.ru

Marianna S. Voronina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Storage and Processing of Fruit and Vegetable and Crop Products, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU-MTAA), (127434, Russia, Moscow, Timiryazevskaya str., 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1537-6751>, Scopus ID: 57223024454, SPIN-код: 5754-6668, AuthorID: 857344, marianna419@rambler.ru

Elizaveta P. Ryashchikova, student of the Department of Biotechnology High School of Samara State Technical University (SSTU), (244 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0381-527X>, liza.r.201106@gmail.com

Применение гиперспектральной визуализации и искусственного интеллекта для контроля свежести рыбного сырья при холодильном хранении

¹ Череповецкий государственный университет, Вологодская область, г. Череповец, Российская Федерация

² Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация

³ Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, Астраханская область, г. Астрахань, Российская Федерация

⁴ Университет Абдула Малика Аль Саади, г. Тетуан, Марокко

М. Н. Кутузов¹, М. А. Белова^{1,2}, О. В. Новиченко^{3,1},
И. А. Никитин^{2,1}, Х. Заруал⁴, Д. Д. Вилкова¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Михаил Николаевич Кутузов
E-mail: kutuzov35@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кутузов, М.Н., Белова, М.А., Новиченко, О.В., Никитин, И.А., Заруал, Х., & Вилкова, Д.Д. (2025). Применение гиперспектральной визуализации и искусственного интеллекта для контроля свежести рыбного сырья при холодильном хранении. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 127-142. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.681>

ПОСТУПИЛА: 04.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Материалы подготовлены в рамках проекта «Разработка экспресс-аналитических методов на основе больших данных спектрального анализа для определения сроков хранения и безопасности пищевого рыбного сырья», <https://rscf.ru/project/23-76-10038/> за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-76-10038.

АННОТАЦИЯ

Введение: Мониторинг свежести охлажденной рыбы остается одной из наиболее сложных задач рыбоперерабатывающей отрасли. Существующие стандартные методы контроля являются деструктивными и не способны отразить пространственную неоднородность распределения маркеров порчи. Перспективным направлением является разработка неразрушающих методов анализа, таких как гиперспектральная визуализация (HSI), позволяющая получать пространственную и спектральную информацию для каждого пикселя изображения.

Цель: Целью настоящего исследования является оценка эффективности использования гиперспектральной визуализации для бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по признаку раннего (до 48 ч) и позднего (более 48 ч) срока хранения.

Материалы и методы: Исследование проводилось на образцах филе радужной форели, хранившихся при температуре $+2 \pm 2$ °C в течение 16 суток. Для получения гиперспектральных изображений использовалась камера FigSpec FS-23 (диапазон 400–1000 нм). Проводился анализ главных компонент (PCA), а для бинарной классификации образцов была разработана нейросетевая модель на основе фреймворка TensorFlow и высокоуровневого API Keras.

Результаты: Выявлена характерная нелинейная динамика коэффициента отражения в процессе хранения. Метод PCA показал, что первая главная компонента объясняет 93,8 % дисперсии данных. Нейросетевая модель продемонстрировала 90 % точности при бинарной классификации образцов.

Выводы: Подтверждена эффективность метода гиперспектральной визуализации для неразрушающего контроля свежести рыбного сырья. Разработанный подход позволяет достоверно дифференцировать свежие и несвежие образцы и может быть рекомендован для внедрения в систему входного контроля на рыбоперерабатывающих предприятиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

радужная форель; гиперспектральная визуализация; хранение; качество; анализ главных компонент; нейронные сети; бинарная классификация



Application of Hyperspectral Imaging and Artificial Intelligence for Freshness Assessment of Fish Raw Material during Refrigerated Storage

¹ Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda region, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

³ Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation

⁴ Abdelmalek Essaadi University, Tétouan, Morocco

Mikhail N. Kutuzov¹, Maria A. Belova^{1,2}, Olga V. Novichenko^{3,1}, Igor A. Nikitin^{2,1}, Hicham Zaroual⁴, Daria D. Vilkova¹

CORRESPONDENCE:

Mikhail N. Kutuzov

E-mail: kutuzov35@gmail.com

FOR CITATIONS:

Kutuzov, M.N., Belova, M.A., Novichenko, O.V., Nikitin, I.A., Zaroual, H., & Vilkova, D.D. (2025). Application of Hyperspectral Imaging and Artificial Intelligence for Freshness Assessment of Fish Raw Material during Refrigerated Storage. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 127-142. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.681>

RECEIVED: 04.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by Russian Science Foundation, grant number 23-76-10038, Project title: Development of rapid methods to determine the shelf-life and safety of edible fish raw material based on spectral analysis big data (access: <https://rscf.ru/en/project/23-76-10038/>)

ABSTRACT

Introduction: Monitoring the freshness of refrigerated fish remains one of the persistent difficulties in the fish processing industry. Existing reference methods for assessing refrigerated fish freshness are destructive and inherently unable to reflect the spatial distribution of spoilage markers. Hyperspectral imaging (HSI) has emerged as a powerful non-destructive tool that captures both spatial and spectral data at the pixel scale.

Purpose: The aim of this study is to evaluate the effectiveness of hyperspectral imaging for the binary classification of refrigerated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets into early (≤ 48 h) and late (> 48 h) storage stages.

Materials and Methods: The study was conducted on rainbow trout fillets stored at $+2 \pm 2$ °C for 16 days. Hyperspectral images were acquired using a FigSpec FS-23 camera (spectral range 400–1000 nm). Principal component analysis (PCA) was performed, and a neural network model for binary classification of samples was developed using the TensorFlow framework and the high-level Keras API.

Results: A characteristic nonlinear dynamics of reflectance was observed during storage. PCA showed that the first principal component accounted for 93.8% of the data variance. The neural network model achieved 90% accuracy in binary classification of the samples.

Conclusion: The results demonstrate the potential of hyperspectral imaging as a non-destructive tool for assessing fish freshness. The developed method provides accurate discrimination between fresh and non-fresh samples and can be recommended for adoption in industrial incoming inspection protocols.

KEYWORDS

rainbow trout; hyperspectral imaging; storage; quality; principal component analysis; neural networks; binary classification



ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг свежести охлажденной рыбы в режиме реального времени остается одной из наиболее сложных задач для рыбоперерабатывающей отрасли. Высокая скорость порчи, обусловленная активностью аутохтонной микрофлоры и ферментативными процессами, приводит к значительным экономическим потерям и создает риски для потребителей. Согласно ГОСТ 814-2019¹, рекомендуемый срок хранения охлажденной рыбы во льду составляет не более 10–12 суток в зависимости от сезона, способа разделки и типа упаковки, однако фактический период сохранения свежести является динамической величиной. Он зависит от ряда факторов: исходного состояния сырья, соблюдения холодовой цепи и микробиологических показателей.

Процессы порчи носят гетерогенный характер, приводя к образованию зон с различной степенью деградации. Локальные очаги бактериального обсеменения или окислительной деградации липидов могут возникать быстрее глобального ухудшения качества продукта. Как отмечают Tahsin et al. (2017) и Абрамова et al., (2018), традиционные методы оценки свежести рыбы, такие как микробиологические посева, определение летучих оснований, перекисного числа и др., являются деструктивными, требуют много времени и не отражают пространственную неоднородность продукта. Важность учета пространственной неоднородности порчи была продемонстрирована в исследовании на филе лосося, где гиперспектральная визуализация выявила значительные различия в скорости деградации между головной и хвостовой частями, причем периферийные области хвоста подвергались порче быстрее (Hardy et al., 2024). Это приводит к принятию решений на основе усредненных данных и повышает риски поставки небезопасной продукции (Донскова, 2023). По данным Роспотребнадзора, около 18% рыбной продукции на рынке не соответствует санитарным требованиям (Воробьев, 2021). В связи с вышесказанным актуальной задачей является разработка неинвазивных методов, позволяющих оперативно оценивать качество и безопасность рыбной продукции на всех этапах логистической цепочки.

В последние годы активно развиваются программно-аппаратные системы на основе биосенсоров, компьютерного зрения и искусственного интеллекта, позволяющие сократить время анализа с нескольких суток до минут (García et al., 2022; Hardy et al., 2024). Как отмечено в недавнем обзоре, к таким перспективным «искусственным чувствам» относятся гиперспектральная визуализация (HyperSpectral Imaging, HSI), электронные носы и языки, причем компьютерное зрение (включая HSI) является единственным методом, обеспечивающим полностью неразрушающий контроль (Madhubhashini et al., 2024; M.-F. Cheng et al., 2025). Особый интерес представляют портативные устройства, сочетающие простоту эксплуатации с высокой аналитической надежностью.

Метод гиперспектральной визуализации интегрирует возможности визуализации и спектроскопии, позволяя получать пространственную и спектральную информацию для каждого пикселя изображения. В отличие от точечной абсорбционной спектроскопии, HSI обеспечивает визуализацию композиционного распределения в образце с высоким разрешением, что особенно эффективно для анализа гетерогенных объектов, таких как охлажденная рыба (Pulcini et al., 2021; Sun et al., 2023). Как отмечено в обзоре (Zhang et al., 2022), гиперспектральная визуализация демонстрирует большой потенциал для быстрого и неинвазивного анализа свежести и общего качества рыбы.

HSI успешно применяется для оценки качества и безопасности различных пищевых продуктов, включая мясо (Jiang et al., 2019; Cheng et al., 2019), морепродукты (Dai et al., 2016; Chen et al., 2021; Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019a), фрукты и овощи (Lu et al., 2020; Naqvi et al., 2025). Для рыбного сырья продемонстрирована высокая корреляция спектральных данных с ключевыми показателями свежести, такими как содержание летучих оснований (TVB-N), величина ТВАРС, количество мезофильных микроорганизмов (КМАФАнМ), сенсорные характеристики (Kim et al., 2024; Moosavi-Nasab et al., 2021; Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c). Однако детальное изучение пространственно-временной динамики этих изменений на протяжении всего срока хранения, а также разработка на её основе точных

¹ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. (2019). *Рыба охлажденная. Технические условия (ГОСТ 814–2019)*. <https://docs.cntd.ru/document/1200167776>

прогностических моделей остаются актуальными направлениями исследований. Кроме того, данный метод перспективен для создания портативных систем в условиях реального времени при непосредственном использовании на производстве и в магазинах розничной торговли.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности использования гиперспектральной визуализации для бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по признаку раннего (до 48 ч) или позднего (более 48 ч) срока хранения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Исследование проводилось на филе радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), выращенной в условиях аквакультуры на одном из рыбноводных предприятий Подмоскovie. Транспортировка рыбы в лабораторию осуществлялась в изотермических контейнерах со льдом в течение 2 ч. После доставки образцы промывали проточной водой для удаления слизи и разделявали на филе. Подготовленные образцы филе помещали в изотермические контейнеры со льдом и хранили в холодильной камере при температуре $+2 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 16 суток. Методы и инструменты

Для получения изображений использовали гиперспектральную камеру FigSpec FS-23 (Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd, Китай). Съемка проводилась в спектральном диапазоне 400–1000 нм. Согласно технической спецификации, камера регистрирует данные в 1200 спектральных каналах с разрешением (FWHM) 2,5 нм и использует CMOS-детектор. Угол поля зрения объектива составлял 25° . Расстояние от объектива камеры до образца устанавливалось в диапазоне 65–70 см. Для равномерного освещения использовали галогенный прожектор мощностью 500 Вт (Рисунок 1).

Управление камерой, сбор и предварительная обработка данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения FigSpec Cam (Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd, Китай). Гиперспектральные изображения регистрировались ежедневно в течение 16 дней эксперимента.

Рисунок 1

Гиперспектральная камера FigSpec FS-23

Figure 1

Hyperspectral Camera FigSpec FS-23



Примечание. А – внешний вид камеры FigSpec FS-23; Б – тестирование камеры на пробном объекте для подбора параметров съемки

Note. A – External view of the FigSpec FS-23 camera. B – Camera calibration on a test specimen for imaging parameter optimization

Перед каждой сессией съемки выполнялась калибровка по белому эталону.

Для снижения вычислительной нагрузки и упрощения последующей обработки объем данных уменьшали. Количество спектральных каналов в исходных гиперспектральных изображениях было уменьшено с 1200 до 300 путем усреднения данных каждых четырех соседних каналов.

Предобработка спектральных данных

Для исключения фонового сигнала и шума при анализе данных для каждого гиперспектрального изображения создавалась маска области интереса (Region of Interest – ROI), соответствующая мышечной ткани без учета краевых артефактов и фона. На основе выделенной ROI для каждого образца строилась тепловая карта с единой шкалой интенсивности отражения, визуализирующая про-

странственное распределение спектрального отклика. Обработка данных выполнялась с использованием библиотек Matplotlib, Spectral и NumPy для языка программирования Python 3.

Метод главных компонент

Для снижения размерности спектральных данных и выявления скрытых закономерностей, связанных с изменением свежести, был применен метод главных компонент (PCA). Входная матрица данных формировалась следующим образом: для каждого образца (отдельное филе в конкретный день хранения) на основе гиперспектрального куба и маски области интереса (ROI) рассчитывался усредненный спектр отражения. Все пиксели внутри ROI усредняли по каждому спектральному каналу, в результате чего получался вектор размерности 300 после объединения исходных 1200 каналов.

С целью удаления шумовых участков, не несущих полезной информации, исключались первые и последние 10% спектральных каналов (по 30 с каждого края). Таким образом, рабочий диапазон сокращался до 240 каналов, соответствующих приблизительно интервалу 440–950 нм. Для подавления высокочастотного шума оставшиеся спектры сглаживались с помощью фильтра Савицкого — Голея со следующими параметрами: длина окна — 11, полином — 2-го порядка.

В результате для каждого из 64 снимков был получен вектор усредненного сглаженного спектра длиной 240. Все векторы объединялись в матрицу X размером 64×240 , где строки соответствовали снимкам, а столбцы — спектральным каналам.

Перед проведением PCA матрица X центрировалась и масштабировалась к единичной дисперсии с помощью метода стандартизации данных StandardScaler библиотеки Scikit-learn для языка программирования Python 3. Это обеспечило равный вклад всех спектральных каналов независимо от абсолютной интенсивности сигнала.

PCA выполнялся с использованием сингулярного разложения (SVD); число сохраняемых компонент было установлено равным 5. Для каждой компоненты вычисляли долю объясненной дисперсии, матрицу счетов (scores) и матрицу нагрузок (loadings).

Машинное обучение

Для бинарной классификации образцов по степени свежести была разработана нейросетевая модель на основе фреймворка TensorFlow и высокоуровневого API Keras. В качестве входных признаков использовались первые пять главных компонент, объясняющие совокупно более 99% общей дисперсии нормализованных данных.

Модель имела следующую архитектуру: входной слой (5 нейронов, соответствующих первым пяти главным компонентам), два скрытых полносвязных слоя (64 и 32 нейрона) с активацией ReLU, слой пакетной нормализации (BatchNormalization) и исключения (Dropout = 0,3). Выходной слой состоял из одного нейрона с сигмоидальной активацией для бинарной классификации.

Обучение проводилось с оптимизатором Adam (learning_rate = 0,001) в течение 100 эпох. Для предотвращения переобучения использовались: ранняя остановка (patience = 10), динамическое уменьшение скорости обучения (ReduceLROnPlateau) и регуляризация (Dropout, BatchNormalization). Данные разделялись на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) выборки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка морфологических и физических показателей

Все особи радужной форели соответствовали требованиям, предъявляемым к свежей рыбе. Наружные покровы без повреждений: чешуя блестящая, плотно прилегающая; слизь прозрачная, без крови и постороннего запаха; кожа упругая, с естественной пигментацией; плавники целые. Жабры равномерно красные, чистые; глаза прозрачные, выпуклые, без помутнений. Брюшная стенка не деформирована, анальное отверстие плотно закрыто. Мышечная ткань находилась в стадии выраженного окоченения, что свидетельствует о недавнем забое. Висцеральный жир присутствовал в незначительном количестве, внутренние органы без видимых патологий. Таким образом, исследуемые образцы признаны пригодными для проведения эксперимента.

Динамика спектральных характеристик

В течение 16-дневного эксперимента при хранении в холодильных условиях ежедневно регистрировали гиперспектральные изображения филе радужной форели. Для каждого образца рассчитывали усредненный коэффициент отражения в пределах области интереса (ROI), исключая фоновые участки и краевые артефакты. На Рисунке 2 представлена динамика коэффициента отражения образцов в процессе хранения (диапазон 400–1000 нм).

Установлено, что динамика коэффициента отражения имеет выраженный нелинейный характер. В начальный период хранения (0–1-й день) зафиксированы минимальные значения отражательной способности. В последующие два дня (2–3-й дни) наблюдался интенсивный рост показателя, достигший абсолютного максимума к 4-му дню. В интервале с 5-го по 7-й день спектральная зависимость коэффициента отражения оставалась на относительно стабильном уровне с незначительной тенденцией к снижению. Наиболее существенный спад коэффициента отражения пришелся на 8–10-й день. В заключительной фазе эксперимента (11–15-й день) вновь было зафиксировано устойчивое

увеличение спектральной зависимости коэффициента отражения, приближающееся к значениям, характерным для 4–5-го дня.

Описанная динамика воспроизводилась для всех исследованных образцов, что свидетельствует о типичности выявленных спектральных изменений для филе радужной форели в условиях холодильного хранения.

Метод главных компонент

Для снижения размерности спектральных данных и выявления скрытых закономерностей, связанных с изменением свежести, был применен метод главных компонент (РСА). Входная матрица размером 64×240 формировалась из усредненных и сглаженных спектров отражения всех гиперспектральных изображений.

На Рисунке 3 представлено пространственное распределение образцов. Было установлено, что первая главная компонента (PC1) объясняет 93,8% общей дисперсии нормализованных данных; вторая

Рисунок 2

Динамика коэффициента отражения филе радужной форели в процессе хранения

Figure 2

Change in Reflectance of Rainbow Trout Fillets during storage

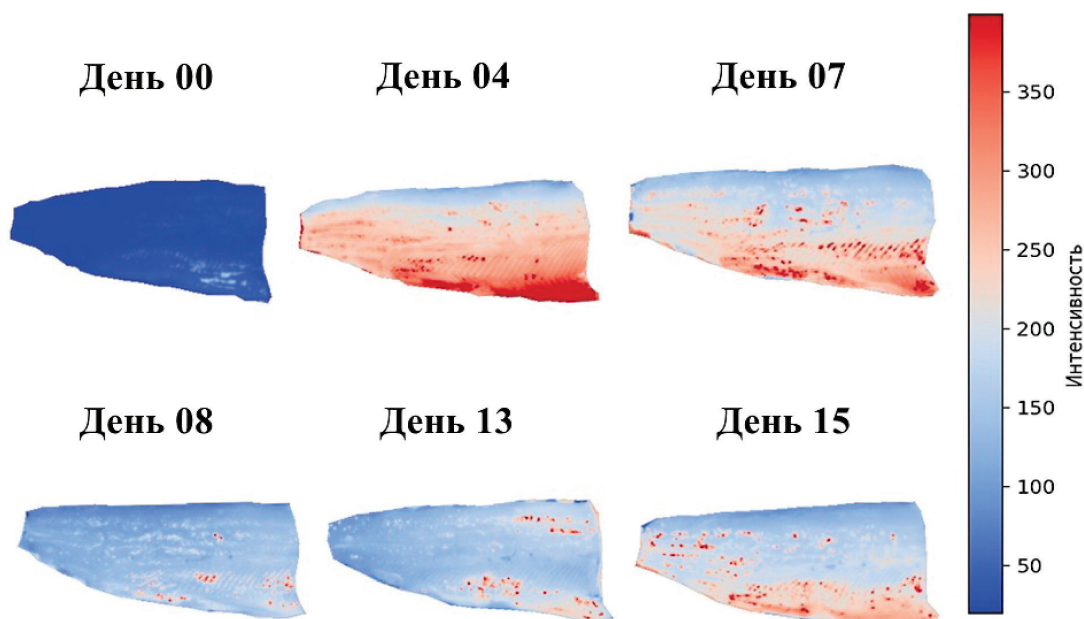
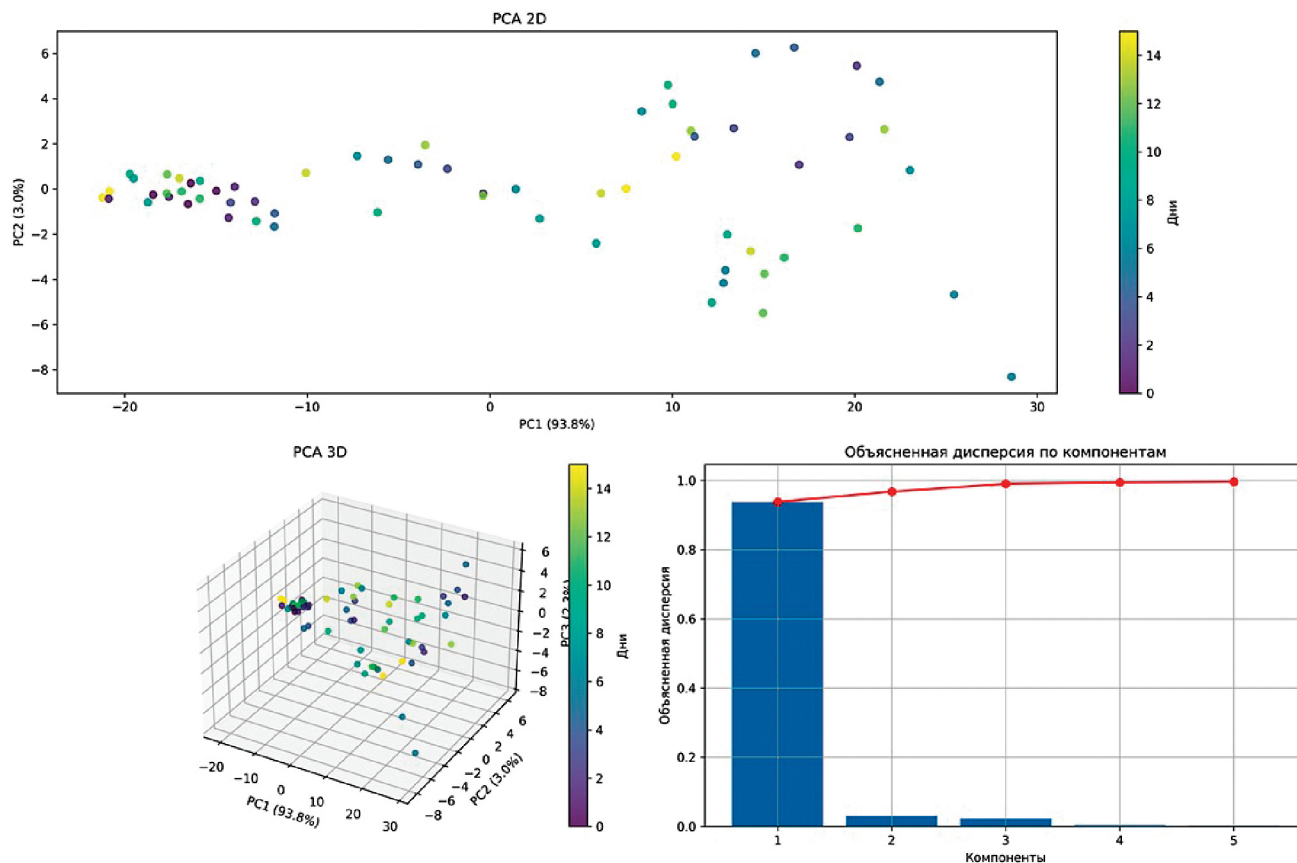


Рисунок 3

PCA-анализ филе радужной форели

Figure 3

Principal Component Analysis (PCA) of Rainbow Trout Fillets



(PC2) и третья (PC3) компоненты вносят вклад 3,0% и 2,3% соответственно.

Совокупный вклад первых трех компонент превышает 99%, что позволяет использовать их для компактного представления исходной спектральной информации без существенных потерь.

Анализ матрицы нагрузок позволил идентифицировать длины волн с наибольшим вкладом в каждую из первых трех главных компонент (Таблица 1). Положительные и отрицательные пики нагрузок соответствуют спектральным диапазонам, где изменения коэффициента отражения максимально коррелируют с данной компонентой.

На Рисунке 4 приведены графики нагрузок первых трех главных компонент, демонстрирующие зависимость весовых коэффициентов от длины волны.

Таблица 1

Длины волн с наибольшими нагрузками в модели PCA

Table 1

Wavelengths with the highest PCA loadings

Компонента	Положительные нагрузки, нм	Отрицательные нагрузки, нм
PC1	668, 670, 672, 690, 692	635, 637, 639, 756, 758
PC2	637, 639, 641, 758, 760	580, 582, 823, 825, 945
PC3	604, 606, 608, 610, 851	542, 544, 546, 548, 910

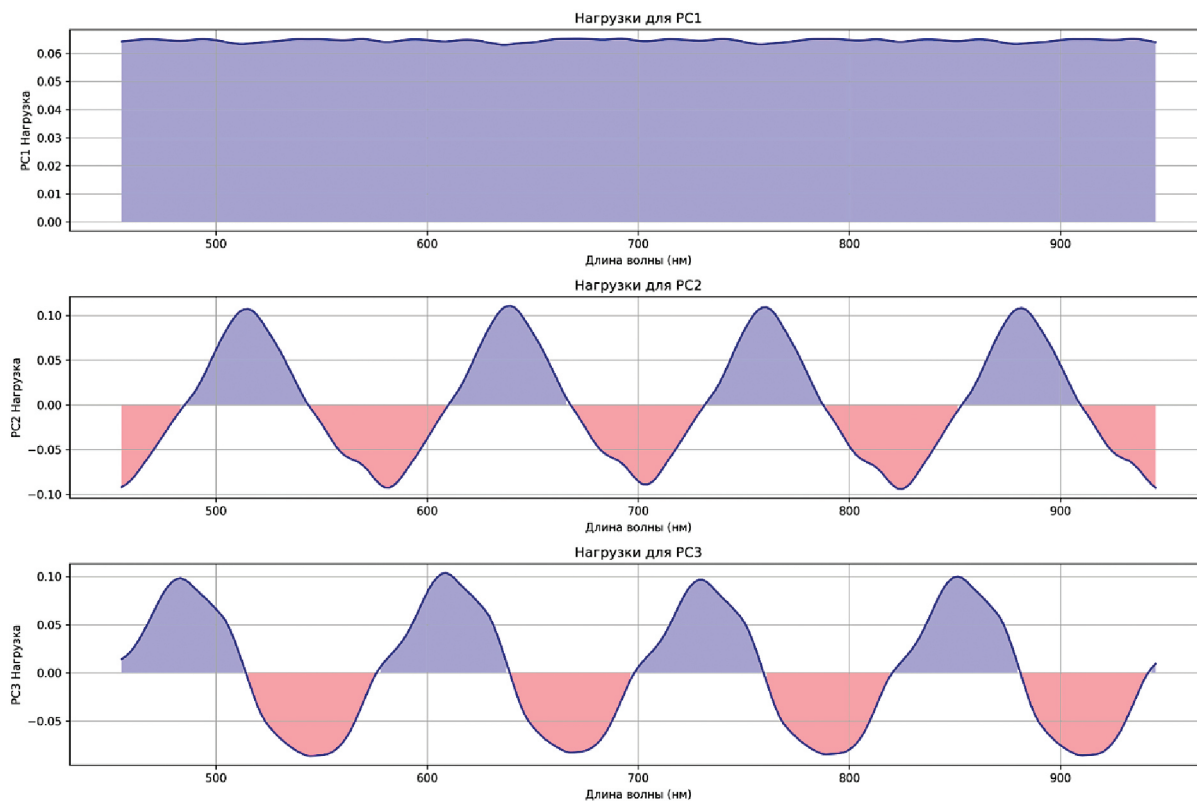
Анализ показал, что наиболее значимые для дифференциации образцов спектральные области сосредоточены в диапазонах 540–700 нм (видимый свет) и 750–950 нм (ближний инфракрасный диапазон).

Рисунок 4

График нагрузок первых трех главных компонент

Figure 4

Loadings of the First Three Principal Components



Нейросетевая модель

Для автоматизации определения свежести филе на основе спектральных данных была разработана нейросетевая модель бинарной классификации. В качестве входных признаков использовались первые пять главных компонент (PC1–PC5), полученные в результате PCA и объясняющие более 99 % дисперсии исходных спектров. Выборка из 64 образцов была разделена на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки. Архитектура модели включала два скрытых полносвязных слоя (64 и 32 нейрона) с активацией ReLU, слой пакетной нормализации и dropout (0,3) для предотвращения переобучения.

На тестовой выборке при дифференциации образцов раннего (0–1 сутки) и позднего (2–15 суток) сроков хранения модель достигла 90 % точности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование демонстрирует потенциал гиперспектральной визуализации для отслеживания биохимических изменений в филе радужной форели в процессе холодильного хранения. Ключевые изменения спектральных характеристик были зафиксированы и статистически интерпретированы с помощью анализа главных компонент (PCA).

Наблюдаемая нелинейная динамика коэффициента отражения (Рисунок 2) показывает сложные посмертные процессы в мышечной ткани. Первоначально низкие значения (0–1 сутки), вероятно, связаны с доминированием поглощения света миоглобином в его восстановленной форме и высокой общей влажностью поверхности, минимизирующей рассеяние света. Последующий резкий рост коэффициента отражения, достигший пика к 4-м суткам, может быть обусловлен комплексом факторов: начальным окислением миоглобина в метмиогло-

бин, изменением светорассеяния из-за деградации белкового матрикса и, что наиболее существенно, первичным окислением липидов с образованием гидропероксидов, которые влияют на оптические свойства тканей (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019a). Снижение показателя на 8–10-е сутки, за которым следует новый рост на 11–15-е сутки, соответствует переходу к стадии вторичного окисления липидов, характеризующейся накоплением карбонильных соединений (альдегидов, кетонов), и активным развитием микробиологической порчи, что приводит к значительному изменению химического состава и, соответственно, спектрально-го отклика продукта.

Аналогичные изменения спектральных характеристик в видимой и ближней ИК-областях, связанные с микробной порчей, были ранее зафиксированы при исследовании филе радужной форели (Khoshnoudi-Nia et al., 2018). Авторы этой работы также отмечали высокую корреляцию отдельных длин волн с содержанием КМАФАНМ.

Наблюдаемые нами изменения согласуются с данными других исследований, где основным дискриминатором между свежими и испорченными участками филе лосося также было ослабление полосы поглощения в области ~600 нм, связанное с изменениями в пигментации (Hardy et al., 2024).

Анализ главных компонент подтвердил, что основная спектральная изменчивость (93,8%) описывается первой компонентой (PC1). Столь высокий вклад PC1 указывает на доминирование одного фактора, определяющего изменения при хранении. С высокой долей вероятности им является процесс окисления липидов (Xu et al., 2016). Значимость второй и третьей компонент (3,0% и 2,3% соответственно), несмотря на их малый вклад, свидетельствует о наличии дополнительных, более тонких процессов, таких как изменения в гидратации ткани и микробная активность (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b).

Выявленные диапазоны длин волн с наибольшими нагрузками (Таблица 1) соответствуют известным биохимическим маркерам порчи. Положительные нагрузки PC1 в области 668–692 нм с высокой вероятностью связаны с окислением миоглобина (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b). Спектральные изменения в видимой об-

ласти (400–600 нм), зафиксированные в нашем исследовании, перекрываются с зонами поглощения ключевых пигментов рыбы, таких как астаксантин. Данная область ранее использовалась для его количественного определения с помощью мультиспектральной визуализации (Dissing et al., 2011). Это подтверждает, что наблюдаемые нами спектральные сдвиги являются комплексным откликом на несколько взаимосвязанных процессов порчи, включая изменения в пигментации.

Отрицательные нагрузки PC2 в областях ~825 нм и ~945 нм могут указывать на вторичные продукты окисления липидов и валентные колебания связей O—H и C—H (Qin et al., 2020). Данное предположение подтверждается исследованиями, проведенными на образцах рыбного филе, где пики в близких спектральных областях (~930 нм и ~1220 нм) были однозначно идентифицированы как третья гармоника растяжения C—H растяжения в метиленовой группе жира и вторая гармоника растяжения связи C—H жира соответственно (Chen et al., 2021). Диапазоны, ассоциированные с PC3, возможно, отражают изменения, связанные с содержанием влаги и микробной активностью (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b).

Пространственный анализ гиперспектральных изображений выявил четкую корреляцию между распределением липидов и спектральной зависимостью коэффициента отражения, при этом периферийные области образцов подвергались порче быстрее. Аналогичные данные с использованием мультиспектральной визуализации фиксировали авторы других исследований (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c). Полученные результаты согласуются с фундаментальными исследованиями, демонстрирующими тесную связь между спектральными свойствами поверхности форели и ее биохимическим составом, включая текстуру мышечной ткани, которая также может быть оценена с помощью гиперспектральной визуализации, что подтверждает возможность косвенной оценки сложных показателей свежести через анализ оптических характеристик (Dissing et al., 2011).

Установлено, что зоны с максимальным коэффициентом отражения соответствуют участкам с высоким содержанием жира, в частности теще. Это согласуется с оптическими свойствами тканей: липиды, как правило, обладают более высоким

коэффициентом отражения по сравнению с мышечными белками (Qin et al., 2020; Rye, 1991). Наличие жировых включений формирует характерный «мраморный» рисунок на тепловых картах, при этом именно в этих зонах, вероятно, протекают наиболее интенсивные процессы окисления.

Полученные результаты достоверны и согласуются с данными других исследований. Так, в работе на группе (Chen et al., 2021) была продемонстрирована высокая эффективность HSI в сочетании с методами PLS-DA и регрессии для классификации свежести и предсказания времени хранения, что подтверждает универсальность подхода для разных видов рыб. Это косвенно подтверждает, что наблюдаемые нами изменения коэффициента отражения являются универсальным индикатором биохимических преобразований в рыбном сырье.

Высокая точность бинарной классификации на уровне 90%, полученная с помощью нейросетевой модели, подтверждает, что метод гиперспектральной визуализации в сочетании с PCA позволяет выявить релевантные изменения в спектральных характеристиках между свежими и несвежими образцами. Разработанная нейросетевая модель демонстрирует потенциал глубокого обучения для задач контроля качества рыбной продукции, что совпадает с исследованиями, где глубокие нейронные сети успешно применялись для регрессионного прогнозирования показателей свежести (Moosavi-Nasab et al., 2021).

Полученный результат имеет важное прикладное значение, поскольку задача оперативного разделения сырья по сроку хранения является одной из наиболее востребованных при входном контроле на перерабатывающих предприятиях.

Ограничения исследования

Представленные результаты получены в лабораторных условиях на ограниченной выборке образцов филе радужной форели, полученных от одного аквакультурного предприятия, что не позволяет в полном объеме оценить влияние варибельности сырья и производственных факторов на воспроизводимость классификационной модели. Нейросетевая модель продемонстрировала точность 90% на тестовой выборке, однако её обобщающая спо-

собность требует дополнительной валидации на независимых данных. Прямая корреляция спектральных признаков с референтными биохимическими и микробиологическими показателями в работе не устанавливалась, поэтому интерпретация изменений как маркеров порчи носит предварительный характер. Метод отработан в стабильных лабораторных условиях; для внедрения в производство необходима адаптация к технологической среде (скорость конвейера, освещение, температурный режим) и разработка промышленного прототипа мультиспектральной системы. Перечисленные ограничения обозначают направления дальнейших исследований: расширение выборки, внешняя валидация, верификация референтными методами и опытно-промышленная апробация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокий потенциал метода гиперспектральной визуализации в сочетании с хемометрическим анализом для неразрушающего контроля свежести охлажденного филе радужной форели.

Установлено, что в процессе хранения наблюдается характерная динамика коэффициента отражения, имеющая нелинейный характер. Наименьшие значения были зафиксированы в начальный период до 48 ч (0–1-е сутки), что позволяет уверенно дифференцировать свежие образцы. Последующие изменения коэффициента отражения (рост к 4-м суткам, спад и новый рост на поздних этапах) статистически значимо связаны с ключевыми стадиями порчи: первичным и вторичным окислением липидов, денатурацией белков и развитием микробной активности, что согласуется с исследованиями, демонстрирующими тесную связь между спектральными свойствами и биохимическим составом рыбного сырья (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c).

Метод главных компонент (PCA) позволил идентифицировать ключевые спектральные диапазоны, несущие наибольшую информацию для дифференциации образцов. Высокий вклад первой главной компоненты (93,8%) свидетельствует о доминировании единого фактора, определяющего изменения при хранении, — процесса окисления липидов. При этом вклад последующих компонент подтверждает наличие дополнительных, хотя и менее выражен-

ных, процессов, таких как изменение влажности и микробная порча.

Для решения задачи экспресс-контроля качества была разработана нейросетевая модель бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по сроку хранения. Модель продемонстрировала точность 90% в дифференциации объектов с периодом хранения до 48 ч и более 48 ч, что подтверждает её прикладную ценность для использования в технологическом цикле.

Результаты работы позволяют рекомендовать метод гиперспектральной визуализации для внедрения в систему входного контроля на предприятиях рыбоперерабатывающей отрасли, особенно в случаях, когда срок от вылова до переработки не должен превышать 48 ч. Использование данной технологии позволит перейти от выборочного деструктивного анализа к неразрушающему мониторингу качества сырья. Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие разработанного подхода в сторону мультиспектральной системы, способной одновременно оценивать несколько показателей свежести, что позволит перейти к комплексной автоматизированной оценке качества сырья.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Кутузов Михаил Николаевич: Формальный анализ; Разработка программного обеспечения; Визуализация; Валидация результатов; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

Белова Мария Алексеевна: Разработка методологии; Проведение исследования; Написание черновика рукописи

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамова, Л. С., Козин, А. В., Погребисская (Азарова), А. Л. (2018). Методы оценки качества пищевой рыбной продукции. *Контроль Качества Продукции*, 6, 25–31.
- Воробьев, В. В. (2021). Стратегические аспекты устойчивого развития рыбохозяйственного комплекса России. *Рыбное Хозяйство*, 5, 23–29. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-5-23-29>
- Донскова, Л. А. (2023). Потери в рыбном секторе в контексте устойчивого развития: обеспечение качества и безопасности как факторы снижения. *Экономика и Бизнес: Теория и Практика*, 2 (96), 136–141. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-2-136-141>

Новиченко Ольга Викторовна: Формальный анализ; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

Никитин Игорь Алексеевич: Разработка концепции; Курирование данных

Хишам Заруал: Формальный анализ; Разработка методологии; Разработка концепции

Вилкова Дарья Дмитриевна: Административное руководство исследовательским проектом; Получение финансирования; Разработка методологии; Проведение исследования; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Kutuzov Mikhail Nikolaevich: Formal Analysis; Software; Visualization; Validation; Writing – Review & Editing

Belova Maria Alexeevna: Methodology; Investigation; Writing – Original Draft Preparation

Novichenko Olga Victorovna: Formal Analysis; Writing – Review & Editing

Nikitin Igor Alexeevich: Conceptualization; Data Curation

Zaroual Hicham: Formal Analysis; Methodology; Conceptualization

Vilkova Daria Dmitrievna: Project Administration; Funding Acquisition; Methodology; Investigation; Writing – Review & Editing

- Chen, Z., Wang, Q., Zhang, H., & Nie, P. (2021). Hyperspectral imaging (HSI) technology for the non-destructive freshness assessment of pearl gentian grouper under different storage conditions. *Sensors*, 21(2), 583. <https://doi.org/10.3390/s21020583>
- Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., & Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), 170. <https://doi.org/10.3390/technologies13050170>
- Cheng, W., Sørensen, K. M., Engelsens, S. B., Sun, D.-W., & Pu, H. (2019). Lipid oxidation degree of pork meat during frozen storage investigated by near-infrared hyperspectral imaging: Effect of ice crystal growth and distribution. *Journal of Food Engineering*, 263, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.013>
- Dai, Q., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Pu, H. (2016). Prediction of total volatile basic nitrogen contents using wavelet features from visible/near-infrared hyperspectral images of prawn (*Metapenaeus ensis*). *Food Chemistry*, 197, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.073>
- Dissing, B. S., Nielsen, M. E., Ersbøll, B. K., & Frosch, S. (2011). Multispectral Imaging for determination of astaxanthin concentration in salmonids. *PLoS ONE*, 6(5), e19032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019032>
- García, M. R., Ferez-Rubio, J. A., & Vilas, C. (2022). Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: A review. *Foods*, 11(15), 2312. <https://doi.org/10.3390/foods11152312>
- Hardy, M., Moser, B., Haughey, S. A., & Elliott, C. T. (2024). Does the fish rot from the head? Hyperspectral imaging and machine learning for the evaluation of fish freshness. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 245(105059). <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.105059>
- Jiang, H., Wang, W., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Yang, Y., & Zhao, X. (2019). Hyperspectral imaging for a rapid detection and visualization of duck meat adulteration in beef. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2205–2215. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01577-6>
- Kamani, M. H., Safari, O., Mortazavi, S. A., Mehraban Sang Atash, M., & Azghadi, N. M. (2017). Using an image processing based technique and predictive models for assessing lipid oxidation in rainbow trout fillet. *Food Bioscience*, 19, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.05.005>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019a). Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1875–1883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1043>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019b). Nondestructive determination of microbial, biochemical, and chemical changes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage using hyperspectral imaging technique. *Food Analytical Methods*, 12, 1635–1647. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01494-8>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019c). Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Scientific Reports*, 9, 14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
16. Khoshnoudi-Nia, S., Moosavi-Nasab, M., Nassiri, S. M., & Azimifar, Z. (2018). Determination of total viable count in rainbow-trout fish fillets based on hyperspectral imaging system and different variable selection and extraction of reference data methods. *Food Analytical Methods*, 11(8), 2220–2233. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1320-0>
- Khoshtaghaza, M. H., Khojastehnazhand, M., Mojaradi, B., Goodarzi, M., & Saeys, W. (2016). Texture quality analysis of rainbow trout using hyperspectral imaging method. *International Journal of Food Properties*, 19(5), 974–983. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042111>
- Kim, S. S., Yun, D.-Y., Lee, G., Park, S.-K., Lim, J.-H., Choi, J.-H., Park, K.-J., & Cho, J. S. (2024). Prediction and visualization of total volatile basic nitrogen in yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) using shortwave infrared hyperspectral imaging. *Foods*, 13(20), 3228. <https://doi.org/10.3390/foods13203228>
- Lu, Y., Saeys, W., Kim, M., Peng, Y., & Lu, R. (2020). Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>

- Madhubhashini, M. N., Liyanage, C. P., Alahakoon, A. U., & Liyanage, R. P. (2024). Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness determination: A review. *Journal of Food Science*, 89(1), 33–50. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16865>
- Moosavi-Nasab, M., Khoshnoudi-Nia, S., Azimifar, Z., & Kamyab, S. (2021). Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 5094. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y>
- Naqvi, L. H., Balasubramaniam, B., Li, J., Liu, L., & Li, B. (2025). Four-dimensional hyperspectral imaging for fruit and vegetable grading. *Agriculture*, 15(15), 1702. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151702>
- Pulcini, D., Capoccioni, F., Franceschini, S., Martinoli, M., Faccenda, F., Secci, G., Perugini, A., Tibaldi, E., & Parisi, G. (2021). Muscle pigmentation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets rich in natural carotenoids from microalgae and crustaceans. *Aquaculture*, 543. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de34e46eef00c2ce9ff25b>
- Qin, J., Vasefi, F., Hellberg, R. S., Akhbardeh, A., Isaacs, R. B., Yilmaz, A. G., Hwang, C., Baek, I., Schmidt, W. F., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish fillet substitution and mislabeling using multimode hyperspectral imaging techniques. *Food Control*, 114, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107234>
- Rye, M. (1991). Prediction of carcass composition in Atlantic salmon by computerized tomography. *Aquaculture*, 99(1), 35–48. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90286-G](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90286-G)
- Sun, D., Zhou, C., Hu, J., Li, L., & Ye, H. (2023). Off-flavor profiling of cultured salmonids using hyperspectral imaging combined with machine learning. *Food Chemistry*, 408, 135166. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135166>
- Tahsin, K.N., Soad, A.R., Ali, A.M., & Moury, I.J. (2017). A review on the techniques for quality assurance of fish and fish products. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7), 4190–4206. <https://www.ijarset.com/upload/2017/july/5-IJARSET-KAZI.pdf>
- Wang, C., Wang, S., He, X., Wu, L., Li, Y., & Guo, J. (2020). Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction and visualization of palmitic acid and oleic acid contents in lamb meat. *Meat Science*, 169, 108194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108194>
- Xu, J.-L., Riccioli, C., & Sun, D.-W. (2016). Efficient integration of particle analysis in hyperspectral imaging for rapid assessment of oxidative degradation in salmon fillet. *Journal of Food Engineering*, 169, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.015>
- Yao, K., Sun, J., Zhou, X., Nirere, A., Tian, Y., & Wu, X. (2020). Nondestructive detection for egg freshness grade based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7) <https://doi.org/10.1111/jfpe.13422>
- Zhang, Z., Sun, Y., Sang, S., Jia, L., & Ou, C. (2022). Emerging approach for fish freshness evaluation: Principle, application and challenges. *Foods*, 11(13), 1897. <https://doi.org/10.3390/foods11131897>

REFERENCES

- Abramova, L. S., Kozin, A. V., Pogrebisskaya (Azarova), A. L. (2018). Metody` ocenki kachestva pishhevoj ry`bnoj produkcii. *Kontrol` Kachestva Produkcii*, 6, 25–31. (In Russ.).
- Vorobyov, V. V. (2021). Strategic aspects of sustainable development fisheries complex of Russia. *Fisheries*, 5, 23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-5-23-29>
- Donskova, L.A. (2023). Losses in the fishing sector in the context of sustainable development: Ensuring quality and safety as factors of reduction. *Economy and Business: Theory and Practice*, 2(96), 136–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-2-136-141>
- Chen, Z., Wang, Q., Zhang, H., & Nie, P. (2021). Hyperspectral imaging (HSI) technology for the non-destructive freshness assessment of pearl gentian grouper under different storage conditions. *Sensors*, 21(2), 583. <https://doi.org/10.3390/s21020583>

- Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., & Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), 170. <https://doi.org/10.3390/technologies13050170>
- Cheng, W., Sørensen, K. M., Engelsen, S. B., Sun, D.-W., & Pu, H. (2019). Lipid oxidation degree of pork meat during frozen storage investigated by near-infrared hyperspectral imaging: Effect of ice crystal growth and distribution. *Journal of Food Engineering*, 263, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.013>
- Dai, Q., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Pu, H. (2016). Prediction of total volatile basic nitrogen contents using wavelet features from visible/near-infrared hyperspectral images of prawn (*Metapenaeus ensis*). *Food Chemistry*, 197, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.073>
- Dissing, B. S., Nielsen, M. E., Ersbøll, B. K., & Frosch, S. (2011). Multispectral Imaging for determination of astaxanthin concentration in salmonids. *PLoS ONE*, 6(5), e19032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019032>
- García, M. R., Ferez-Rubio, J. A., & Vilas, C. (2022). Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: A review. *Foods*, 11(15), 2312. <https://doi.org/10.3390/foods11152312>
- Hardy, M., Moser, B., Haughey, S. A., & Elliott, C. T. (2024). Does the fish rot from the head? Hyperspectral imaging and machine learning for the evaluation of fish freshness. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 245(105059). <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.105059>
- Jiang, H., Wang, W., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Yang, Y., & Zhao, X. (2019). Hyperspectral imaging for a rapid detection and visualization of duck meat adulteration in beef. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2205–2215. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01577-6>
- Kamani, M. H., Safari, O., Mortazavi, S. A., Mehraban Sang Atash, M., & Azghadi, N. M. (2017). Using an image processing based technique and predictive models for assessing lipid oxidation in rainbow trout fillet. *Food Bioscience*, 19, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.05.005>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019a). Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1875–1883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1043>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019b). Nondestructive determination of microbial, biochemical, and chemical changes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage using hyperspectral imaging technique. *Food Analytical Methods*, 12, 1635–1647. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01494-8>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019c). Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Scientific Reports*, 9, 14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
- Khoshtaghaza, M. H., Khojastehnazhand, M., Mojaradi, B., Goodarzi, M., & Saeys, W. (2016). Texture quality analysis of rainbow trout using hyperspectral imaging method. *International Journal of Food Properties*, 19(5), 974–983. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042111>
- Kim, S. S., Yun, D.-Y., Lee, G., Park, S.-K., Lim, J.-H., Choi, J.-H., Park, K.-J., & Cho, J.-S. (2024). Prediction and visualization of total volatile basic nitrogen in yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) using shortwave infrared hyperspectral imaging. *Foods*, 13(20), 3228. <https://doi.org/10.3390/foods13203228>
- Lu, Y., Saeys, W., Kim, M., Peng, Y., & Lu, R. (2020). Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>

- Madhubhashini, M. N., Liyanage, C. P., Alahakoon, A. U., & Liyanage, R. P. (2024). Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness determination: A review. *Journal of Food Science*, 89(1), 33–50. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16865>
- Moosavi-Nasab, M., Khoshnoudi-Nia, S., Azimifar, Z., & Kamyab, S. (2021). Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 5094. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y>
- Naqvi, L. H., Balasubramaniam, B., Li, J., Liu, L., & Li, B. (2025). Four-dimensional hyperspectral imaging for fruit and vegetable grading. *Agriculture*, 15(15), 1702. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151702>
- Pulcini, D., Capoccioni, F., Franceschini, S., Martinoli, M., Faccenda, F., Secci, G., Perugini, A., Tibaldi, E., & Parisi, G. (2021). Muscle pigmentation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets rich in natural carotenoids from microalgae and crustaceans. *Aquaculture*, 543. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de34e46eef00c2ce9ff25b>
- Qin, J., Vasefi, F., Hellberg, R. S., Akhbardeh, A., Isaacs, R. B., Yilmaz, A. G., Hwang, C., Baek, I., Schmidt, W. F., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish fillet substitution and mislabeling using multimode hyperspectral imaging techniques. *Food Control*, 114, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107234>
- Rye, M. (1991). Prediction of carcass composition in Atlantic salmon by computerized tomography. *Aquaculture*, 99(1), 35–48. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90286-G](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90286-G)
- Sun, D., Zhou, C., Hu, J., Li, L., & Ye, H. (2023). Off-flavor profiling of cultured salmonids using hyperspectral imaging combined with machine learning. *Food Chemistry*, 408, 135166. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135166>
- Tahsin, K.N.; Soad, A.R.; Ali, A.M.; Moury, I.J. (2017). A review on the techniques for quality assurance of fish and fish products. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7), 4190–4206. <https://www.ijarset.com/upload/2017/july/5-IJARSET-KAZI.pdf>
- Wang, C., Wang, S., He, X., Wu, L., Li, Y., & Guo, J. (2020). Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction and visualization of palmitic acid and oleic acid contents in lamb meat. *Meat Science*, 169, 108194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108194>
- Xu, J.-L., Riccioli, C., & Sun, D.-W. (2016). Efficient integration of particle analysis in hyperspectral imaging for rapid assessment of oxidative degradation in salmon fillet. *Journal of Food Engineering*, 169, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.015>
- Yao, K., Sun, J., Zhou, X., Nirere, A., Tian, Y., & Wu, X. (2020). Nondestructive detection for egg freshness grade based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7) <https://doi.org/10.1111/jfpe.13422>
- Zhang, Z., Sun, Y., Sang, S., Jia, L., & Ou, C. (2022). Emerging approach for fish freshness evaluation: Principle, application and challenges. *Foods*, 11(13), 1897. <https://doi.org/10.3390/foods11131897>

ОБ АВТОРАХ

Михаил Николаевич Кутузов, научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-9782>, Scopus ID: 58868237500, SPIN-код: 6578-1392, kutuzov35@gmail.com

Мария Алексеевна Белова, младший научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), аспирант Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова (115054, Российская Федерация, Московская область, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6466-3854>, Scopus ID: 58164533700, Researcher ID: HKN-1441-2023, SPIN-код: 4562-1661, mabelova@chsu.ru

Ольга Викторовна Новиченко, канд. технич. наук, доцент кафедры биотехнологии, аквакультуры, почвоведения и управления земельными ресурсами Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (414056, Российская Федерация, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20А), ведущий научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4282-9728>, Scopus ID: 55996873800, Researcher ID: AAU-9650-2021, SPIN-код: 7656-9566, ollevi@bk.ru

Игорь Алексеевич Никитин, д-р технич. наук, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова (115054, Российская Федерация, Москва, Стремянный переулок, д. 36), главный научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-5911>, Scopus ID: 57208018552, Researcher ID: B-3266-2017, SPIN-код: 9342-6517, nikito.igor@gmail.com

Хишам Заруал, PhD, проф., доцент факультета наук и технологий университета Абдула Малика Аль Саади (93000, Марокко, г. Тетуан, Quartier M'haneche II, avenue 9 Avril, B.P. 2117), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-5354>, Scopus ID: 57211598033, aa.hzaroual@gmail.com

Вилкова Дарья Дмитриевна, PhD инженер биологических систем, ведущий научный сотрудник кафедры биологии, заведующий лабораторией прикладной биотехнологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-8709>, Scopus ID: 57212526679, Researcher ID: GVT-8608-2022, SPIN-код: 1912-6020, dariavilkova333@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Mikhail Nikolaevich Kutuzov, Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-9782>, Scopus ID: 58868237500, SPIN-код: 6578-1392, kutuzov35@gmail.com

Maria Alexeevna Belova, Junior Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), postgraduate student, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny Lane, Moscow, Moscow region, 115054, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6466-3854>, Scopus ID: 58164533700, Researcher ID: HKN-1441-2023, SPIN-код: 4562-1661, mabelova@chsu.ru

Olga Victorovna Novichenko, Cand. Techn. Sci., Associate Professor of Chair of Biotechnology, Aquaculture, Soil Science and Land Management, Astrakhan Tatishchev State University (20A, Tatischev str., Astrakhan, Astrakhan region, 414056, Russian Federation), Leading Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4282-9728>, Scopus ID: 55996873800, Researcher ID: AAU-9650-2021, SPIN-код: 7656-9566, ollevi@bk.ru

Igor Alexeevich Nikitin, Doctor of Technical Sciences; Head of the Chief of Food Technologies and Bioengineering, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny Lane, Moscow, Moscow region, 115054, Russian Federation), Chief Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-5911>, Scopus ID: 57208018552, Researcher ID: B-3266-2017, SPIN-код: 9342-6517, nikito.igor@gmail.com

Hicham Zaroual, PhD, Professor, Assistant Professor at Faculty of Sciences and Technologies, Abdelmalek Essaadi University (Quartier M'haneche II, avenue 9 Avril, B.P. 2117, Tétouan, 93000, Morocco), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-5354>, Scopus ID: 57211598033, aa.hzaroual@gmail.com

Vilkova Daria Dmitrievna, PhD of Engineering of Biological Functions, Leading Researcher of Chair of Biology, Head of the Laboratory of Applied Biotechnology Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-8709>, Scopus ID: 57212526679, Researcher ID: GVT-8608-2022, SPIN-код: 1912-6020, dariavilkova333@gmail.com

Оптимизация сушки выжимок черной смородины с использованием метода поверхности отклика

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Орловская область, Орловский МО, Российская Федерация

Ю. В. Анохин¹, О. Ю. Еремина¹, Е. С. Салина²,
Н. С. Левгерова², И. А. Сидорова²

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Юрий Владимирович Анохин
E-mail: yura.anohin69@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Анохин, Ю.В., Еремина, О.Ю., Салина, Е.С., Левгерова, Н.С., & Сидорова, И.А. (2025). Оптимизация сушки выжимок черной смородины с использованием метода поверхности отклика. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 143-168.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.682>

ПОСТУПИЛА: 09.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Выжимки черной смородины используются достаточно ограниченно в пищевой промышленности. Доступным способом их переработки является ИК-сушка, однако длительный нагрев способствует окислению и разрушению биологически активных веществ, что обуславливает необходимость подбора оптимальных параметров проведения ИК-сушки выжимок черной смородины для максимально возможного сохранения биологически активных веществ.

Цель: Математическое моделирование и расчет оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки выжимок черной смородины, обеспечивающих максимально возможное сохранение БАВ в рамках предложенной модели.

Материалы и методы: Для определения значений оптимальных параметров, при которых достигается максимальное сохранение биологически активных веществ в выжимках черной смородины, был использован трехуровневый трехфакторный метод поверхностного отклика в сочетании с планом Бокса – Бенкена. Сушку проводили в универсальном инфракрасном шкафу серии «Универсал-СД-2П», в котором реализован комбинированный радиационно-конвективный способ сушки продуктов.

Результаты: В результате анализа экспериментальных данных с использованием метода поверхности отклика и плана Бокса – Бенкена были построены математические модели, описывающие влияние параметров ИК-сушки на сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов, антоцианов и выход сухих веществ в выжимках черной смородины. На основе этих моделей рассчитаны оптимальные параметры процесса: продолжительность – 4 ч, температура – 60 °С, толщина слоя – 6,2 мм. Прогнозируемое содержание БАВ в сухих выжимках при оптимальных условиях составляет: аскорбиновой кислоты – 122,47 мг/100 г, катехинов – 2568,1 мг/100 г, антоцианов – 540,65 мг/100 г. При содержании сухих веществ 93,6 % полученный продукт обладает достаточной микробиологической стабильностью и пригоден к длительному хранению. Сопоставление расчетных оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины (4 ч, 60 °С, толщина слоя 6,2 мм), определенных методом поверхности отклика, с фактическими данными, полученными ранее при сушке в режиме 4 ч, 60 °С и толщине слоя 3,8 мм, показывает частичное соответствие модельных прогнозов и экспериментальных результатов.

Выводы: Разработанные в ходе исследования математические модели и оптимизированные параметры сушки (продолжительность, температура и толщина слоя) позволяют целенаправленно получать сушеные выжимки черной смородины с заданным химическим составом, что в дальнейшем открывает возможность их использования в качестве пищевого ингредиента-обогапителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

побочные продукты переработки; пищевые ингредиенты; математическая модель ИК-сушки; оптимизация параметров ИК-сушки; аскорбиновая кислота; катехины; антоцианы

Optimization of Drying Parameters for Blackcurrant Pomace Using Response Surface Methodology

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation

² Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Orel M. D., Orel Region, Russian Federation

Yuri V. Anokhin¹, Olga Yu. Eremina¹, Elena S. Salina²,
Nadezhda S. Levgerova², Irina A. Sidorova²

CORRESPONDENCE:

Yuri V. Anokhin

E-mail: yura.anohin69@gmail.com

FOR CITATIONS:

Anokhin, Yu.V., Eremina, O.Yu., Salina, E.S., Levgerova, N.S., & Sidorova, I.A. (2025). Optimization of drying parameters for blackcurrant pomace using response surface methodology. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 143-168. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.682>

RECEIVED: 09.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Blackcurrant pomace is utilized only to a limited extent in the food industry. One accessible method for its processing is infrared (IR) drying; however, prolonged thermal exposure promotes oxidation and degradation of biologically active compounds. This necessitates the determination of optimal IR drying parameters that enable the maximum possible preservation of bioactive constituents in blackcurrant pomace.

Purpose: To develop a mathematical model and determine the optimal operational parameters of the IR drying process for blackcurrant pomace that ensure maximal retention of bioactive compounds within the proposed modeling framework.

Materials and Methods: To identify the optimal parameter values that maximize the preservation of biologically active compounds in blackcurrant pomace, a three-level, three-factor response surface methodology (RSM) was applied using a Box–Behnken experimental design. Drying was carried out in a universal infrared drying chamber of the “Universal-SD-2P” series, which implements a combined radiation–convection drying mechanism.

Results: Based on the experimental data analyzed using response surface methodology and the Box–Behnken design, mathematical models were developed to describe the influence of IR drying parameters on the retention of ascorbic acid, catechins, anthocyanins, and on the yield of dry matter in blackcurrant pomace. Using these models, the optimal drying parameters were calculated as follows: drying time – 4 h, temperature – 60 °C, and layer thickness – 6.2 mm. Under these optimal conditions, the predicted concentrations of bioactive compounds in the dried pomace were: ascorbic acid – 122.47 mg/100 g, catechins – 2568.1 mg/100 g, and anthocyanins – 540.65 mg/100 g. With a dry matter content of 93.6%, the resulting product exhibits sufficient microbiological stability and is suitable for long-term storage. A comparison between the calculated optimal drying parameters (4 h, 60 °C, layer thickness 6.2 mm) and previously obtained experimental data from drying performed at 4 h, 60 °C, and a layer thickness of 3.8 mm indicates partial agreement between the model predictions and empirical observations.

Conclusion: The mathematical models developed in this study, together with the optimized drying parameters (time, temperature, and layer thickness), enable the targeted production of dried blackcurrant pomace with a specified chemical composition. This creates opportunities for its subsequent use as a functional food enrichment ingredient.

KEYWORDS

fruit processing by-products; food ingredients; infrared drying mathematical model; optimization of IR drying parameters; ascorbic acid; catechins; anthocyanins

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития общества одной из основных задач пищевой и перерабатывающей промышленности является расширение ассортимента продуктов питания, обогащенных за счет использования побочных продуктов переработки. Исследования подтверждают, что остатки плодов и ягод, в том числе выжимки и кожура, являются отличным источником ценных компонентов, таких как макронутриенты (белки и углеводы) и фитохимические вещества (полифенолы и каротиноиды). Плодовые и ягодные выжимки — это твердый побочный продукт, остающийся после отжима сока или концентрата, который представляют собой значительную и часто недоиспользуемую фракцию. При производстве сока и пюре 10–35 % сырой фруктовой массы превращается в выжимки, которые обычно выбрасывают, несмотря на их богатый нутриентный состав. Их использование открывает широкие перспективы в пищевой, фармацевтической и косметической отраслях. В последние годы большое внимание уделяется сельскохозяйственным отходам как сырью для получения антиоксидантов и пищевых волокон (Tama, & Karaś, 2025; Ritika et al., 2023; Sha et al., 2023; Lustenberger et al., 2022; Coman et al., 2019; Ibrahim et al., 2017; Asif et al., 2016).

С другой стороны, разработка технологий переработки таких побочных продуктов может значительно повысить конкурентоспособность мировой пищевой промышленности при минимальном воздействии на окружающую среду (Mildner-Szkudlarz et al., 2016). В рамках этой тенденции фруктовые выжимки выделяются как перспективные ингредиенты для переработки, обладающие двойным преимуществом: они способствуют сокращению отходов и придают пищевым продуктам функциональные свойства (Blicharz-Kania et al., 2025; Ciurlă et al., 2024; Szymanowska et al., 2021; Mildner-Szkudlarz et al., 2016).

Выжимки черной смородины, представляющие собой побочные продукты производства сока черной смородины, содержат пищевые волокна, аскорбиновую кислоту (АК), полифенолы, антоцианы, флавоноиды и фенольные кислоты, обладающие антиоксидантными свойствами (Ritika et al., 2023; Coman et al., 2019; Vagiri et al., 2011; Szajdek et al., 2008;).

Основной проблемой при переработке выжимок черной смородины, является их быстрая порча в связи с высокой начальной влажностью сырья (около 70%). Инфракрасная сушка (ИК-сушка) выжимок считается одним из наиболее доступных способов устранения данной проблемы (Еремина и соавт., 2024). Однако при термической обработке существует риск окисления и разрушения соединений, обладающих антиоксидантной активностью. В связи с этим ключевой задачей при проведении сушки влажных выжимок является максимальное возможное сохранение биологически активных веществ. Анализ научной литературы показывает, что наиболее важными параметрами при ИК-сушке являются: продолжительность сушки, температура и толщина слоя. Так, Акулич А. В. с соавт. предлагают сушить ягоды, используя режим конвективной и комбинированной сушки с ИК-нагревом при температуре 60–70 °С (Акулич & Гостинщикова, 2017).

Группа ученых под руководством Michalska A. сушили выжимки черной смородины конвективным способом при температуре от 50 до 90 °С (Michalska et al., 2017), а Blicharz-Kania с соавт. использовали конвекционную печь для высушивания выжимок красной смородины, малины, черноплодной рябины и яблок. Сушка проводилась при температуре 60 °С до содержания влаги менее 10 % (Blicharz-Kania et al., 2025).

Кольман О. Я. с соавт. предлагают сушить выжимки ягод при равномерном слое толщиной 10 мм на сетчатых противнях, используя радиационно-конвективный способ сушки при температуре 70 °С в течение 4 ч до остаточной влажности 20–17 % (Кольман и соавт., 2015). Однако такие параметры проведения сушки не могут обеспечить микробиологической стабильности сушеных выжимок, что связано с их относительно высокой остаточной влажностью, наличием высоких потерь при измельчении высоковязкого влажного материала и невозможностью использования порошков в составе комплексных функциональных пищевых смесей, для которых остаточное содержание влаги регламентируется на уровне не более 12%.

Для снижения влажности различных видов сушеных фруктов и ягод Ермолаев В. А. с соавт. предлагают способ сушки при толщине слоя 5–7 мм и температуре 70–80 °С, обеспечивая остаточную влажность сырья 2,8–4% (Ермолаев и соавт., 2015).

Галиакберова Н. З. с соавт. предлагают способ сушки при схожих параметрах, однако предлагается снизить толщину слоя до 3–5 мм для достижения остаточной влажности сырья не более 6% (Галиакберова и соавт., 1996).

На основе анализа научной литературы и патентной документации в качестве исследуемых параметров процесса ИК-сушки были выбраны такие параметры, как температура, толщина слоя и продолжительность проведения процесса. Интервалы варьирования исследуемых параметров были определены следующим образом: температура — 60–70 °С с шагом 5 °С; продолжительность 4–6 часов с шагом 1 ч; толщина слоя — 3–7 мм с шагом 2 мм.

Для подбора оптимальных параметров проведения процесса в настоящее время применяется методология поверхностного отклика (RSM), которая представляет собой набор математических и статистических методов, используемых для моделирования и последующего анализа сложных взаимосвязей между несколькими независимыми переменными и реакциями, которые они производят на зависимую переменную Y . Важным шагом при планировании эксперимента RSM является выбор подходящего плана эксперимента, который оптимально использует ресурсы и обеспечивает надежную информацию. К распространенным и наиболее часто используемым планам относятся факторный эксперимент, центральный композитный план (CCD) и план Бокса — Бенкена (BBD) (Eremina et al., 2021; Vetrova et al., 2021; Hussain et al., 2021). Данные методики активно применяются в пищевой промышленности для повышения эффективности параметров и нахождения оптимума (Цыганов, Никитина, 2024; Дерканосова и соавт., 2015; Анохин и соавт., 2025; Kumar et al., 2020). Нами был выбран план Бокса — Бенкена (BBD), так как он позволяет быстро и с минимальными затратами построить точную модель второго порядка именно вблизи предполагаемой области оптимума.

Целью данного исследования является математическое моделирование и расчет оптимальных параметров процесса ИК-сушки выжимок черной смородины, направленные на максимально возможное сохранение БАВ в рамках предложенной модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве объектов исследования были использованы свежесвыработанные выжимки ягод черной смородины смеси сортов Орловская серенада (50%) и отборного сеянца 3556-16-81 (50%) с начальной средней влажностью $67,01 \pm 2,12\%$.

Данные сорта черной смородины произрастают в Орловской области и используются в вышеприведенном соотношении сортовых смесей при производстве соков.

Оборудование

Сушку проводили в универсальном инфракрасном шкафу серии «Универсал-СД-2П», предназначенном для комбинированного радиационно-конвективного способа сушки продуктов.

Инструменты

Обработка результатов производилась в программах Microsoft Excel и Design-Expert 13.

Методы

Отбор проб производили в соответствии с ГОСТ 34125-2017.

Содержание сухих веществ определяли термogrавиметрическим методом согласно ГОСТ 33977.

Содержание АК определяли йодометрическим методом в соответствии с требованиями ГОСТ 24556.

Фенольные соединения (катехины и антоцианы) определяли фотометрическим методом с использованием фотоколориметра КФК-3-01-«ЗОМЗ» при длине волны 540 нм. Замеры осуществляли в двух повторностях.

Процедура исследования

Для определения значений оптимальных параметров, обеспечивающих максимальное сохранение биологически активных веществ в выжимках черной смородины, был использован трехуровневый трехфакторный метод поверхностного отклика в сочетании с планом Бокса — Бенкена. В Таблице 1 указаны уровни, диапазон независимых переменных, а также параметры, включающие продолжительность сушки (час), температуру сушки (°C) и толщину слоя (мм).

В контексте трехфакторной трехуровневой экспериментальной схемы, выполненной по принципу Бокса — Бенкена, уравнение, описывающее взаимосвязь между независимыми переменными (факторами) и зависимой переменной (результатом) может быть представлено в виде полинома второго порядка (1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2, \quad (1)$$

где Y — зависимая переменная;

A, B, C — независимые переменные (факторы);

β_0 — свободный член;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — коэффициенты для линейных членов;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ — коэффициенты для взаимодействий между факторами;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ — коэффициенты для квадратичных членов.

Свободный член является расчетным значением отклика в условном центре эксперимента.

Линейные коэффициенты показывают направление и силу линейного влияния фактора на отклик

(зависимую переменную). Отрицательный знак указывает на обратную зависимость: при увеличении фактора значение отклика уменьшается, и наоборот. Чем больше абсолютное значение коэффициента, тем сильнее влияние.

Коэффициенты взаимодействия показывают, как совместное изменение двух факторов влияет на отклик. Это нелинейный эффект. Если коэффициент положительный, то одновременное увеличение (или уменьшение) обоих факторов приводит к росту отклика сверх того, что можно ожидать от их простого суммирования. Отрицательный знак свидетельствует об ослаблении эффекта.

Квадратичные коэффициенты описывают нелинейность влияния фактора. Отрицательный коэффициент указывает на наличие максимума кривой отклика (оптимума), положительный — на наличие минимума. Это ключевые коэффициенты для поиска оптимальных условий.

ИК-сушка выжимок черной смородины и исследование содержания сухих веществ (Y_1), аскорбиновой кислоты (Y_2), катехинов (Y_3), антоцианов (Y_4) производилась на базе ФГБНУ ВНИИСПК д. Жилина Орловского муниципального округа Орловской области.

Каждая комбинация факторов была выполнена в двух независимых повторностях, представляющих собой отдельные циклы сушки с использованием нового образца сырья, что позволило оценить воспроизводимость процесса.

Для исключения систематических погрешностей, связанных с дрейфом условий, порядок проведения опытов был рандомизирован с помощью генератора случайных чисел.

Таблица 1

Пределы изменения экспериментальных факторов

Table 1

Limits of Change of Experimental Factors

Характеристика	Уровни факторов эксперимента		
	A, Продолжительность, ч	B, Температура, °C	C, Толщина слоя, мм
Основной уровень (0)	5	65	5
Интервал варьирования	1	5	2
Верхний уровень (+1)	6	70	7
Нижний уровень (-1)	4	60	3

В процессе подготовки сырья проводили тщательное перемешивание партии выжимок черной смородины с последующим контролем начальной влажности ($67,01 \pm 2,12\%$) перед каждой сушкой для обеспечения однородности исходных условий.

Оборудование (ИК-шкаф «Универсал-СД-2П») калибровали перед началом серии экспериментов.

Трёхмерные (3D) графики поверхностей отклика были созданы с помощью программы Design-Expert 13, чтобы наглядно продемонстрировать влияние экспериментальных уровней переменных на отклик, взаимосвязь или взаимодействие между двумя независимыми переменными, а также оценить уровень переменных для оптимизации сохранения биологически активных веществ в выжимках черной смородины. На каждой поверхности 3D-графика представлены две переменные, при этом третья переменная зафиксирована на уровне 0. На поверхностях отклика синий цвет указывает на наименьшее содержание (мг/100 г) биологически активных веществ, а красный — на наибольшее.

Анализ данных

Для подтверждения значимости модели и оценки силы влияния каждого фактора, а также их взаимодействий, использовался дисперсионный анализ (ANOVA). Достоверность результатов оценивалась по t-критерию Стьюдента при $p \leq 0,05$.

Для проверки предпосылок регрессионного анализа выполнена диагностика остатков: построены графики остатков и прогнозируемых значений. Результаты диагностики подтвердили нормальность распределения остатков, их гомоскедастичность и отсутствие автокорреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения совместного влияния параметров сушки на сохранность биологически активных веществ был реализован план Бокса–Бенкена, включающий 15 опытов. Полная матрица планирования эксперимента с кодированными значениями независимых и зависимых переменных представлена в Таблице 2.

Таблица 2

План и выходные значения эксперимента

Table 2

Experimental Design and Output Values

Номер опыта	A	B	C	$Y_1, \%$	$Y_2, \text{мг/100 г}$	$Y_3, \text{мг/100 г}$	$Y_4, \text{мг/100 г}$
1	4,00	60,00	5,00	94,54	128,48	2545,5	522,5
2	6,00	60,00	5,00	95,68	98,8	2288	480
3	4,00	70,00	5,00	95,02	81,72	833,07	285,8
4	6,00	70,00	5,00	98,96	52,8	545,75	240,5
5	4,00	65,00	3,00	94,83	95,16	2231,25	380
6	6,00	65,00	3,00	97,03	75,4	1787,5	347,5
7	4,00	65,00	7,00	93,36	85,08	2293,75	422,5
8	6,00	65,00	7,00	94,51	65,6	1804,67	393,3
9	5,00	60,00	3,00	95,87	116,72	2568,17	465,8
10	5,00	70,00	3,00	96,25	81,04	726,5	265
11	5,00	60,00	7,00	92,35	115,28	2154	540
12	5,00	70,00	7,00	95,87	70,4	850,75	300
13	5,00	65,00	5,00	95,86	89,3	1449,33	358
14	5,00	65,00	5,00	95,63	95,1	1595,83	352,8
15	5,00	65,00	5,00	94,94	91,11	1334,75	1334,75
Среднее значение				95,38	89,5	1667,3	381,3
Стандартное отклонение				1,52	20,20	687,52	90,89
Минимальное значение				92,35	52,8	545,75	240,5
Максимальное значение				98,96	128,48	2568,17	540

Оценка содержания сухих веществ

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание сухих веществ представлены в Таблице 3. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9743$, а тест на отсутствие адекватности (Lack of Fit) не показал значимых результатов ($p = 0,55$). Установлено, что модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для определения оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,928 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Адекватность модели так же подтверждалась методом анализа остатков. На графике зависимости остатков от предсказанных значений (Рисунок 1) наблюдается их случайное распределение вблизи нулевой линии без выраженных паттернов, что свидетельствует о линейности подобранной модели и гомоскедастичности (постоянстве дисперсии) ошибок.

Факторы А (продолжительность), В (температура) и С (толщина слоя), влияющие на отклик (Drymass), являются высокозначимыми ($p < 0,05$). Также значимыми оказались факторы взаимодействия АВ

Таблица 3

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (сухие вещества)

Table 3

Response Surface Analysis of Variance Method (Drymass)

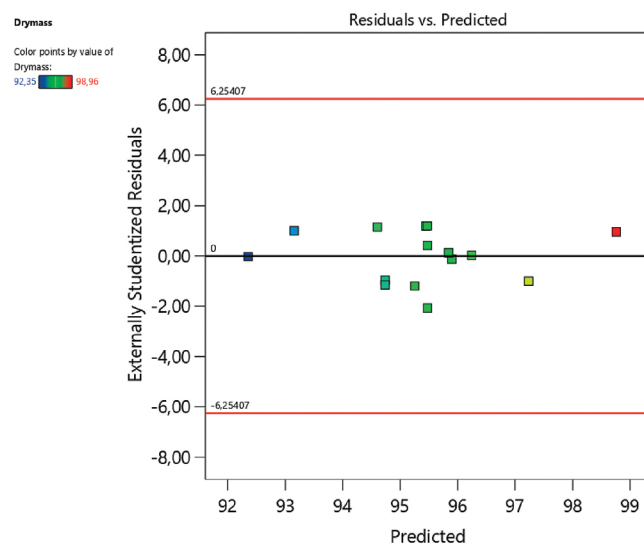
Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратичное значение	F-значение	P-значение
Модель	31,67	9	3,52	21,05	0
А-Продолжительность	8,88	1	8,88	53,13	0
В-Температура	7,33	1	7,33	43,86	0
С-Толщина слоя	7,78	1	7,78	46,54	0
АВ	1,96	1	1,96	11,72	0,02
АС	0,28	1	0,28	1,65	0,26
ВС	2,46	1	2,46	14,74	0,01
А ²	0,16	1	0,16	0,98	0,37
В ²	0,49	1	0,49	2,91	0,15
С ²	2,1	1	2,1	12,57	0,02
Остаток	0,84	5	0,17	—	—
Недостаток подгонки	0,38	3	0,13	0,55	0,7
Чистая ошибка	0,46	2	0,23	—	—
Общее количество	32,51	14	—	—	—
	$R^2 = 0,9743$	Adjusted $R^2 = 0,928$	Adeq Precision = 19,1839		C.V.% = 0,4287

Рисунок 1

График остаточных и предсказанных остатков (сухие вещества)

Figure 1

Plot of Residual and Predicted Residues (Dry Matter)



Примечание. Ось Х (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода сухих веществ,%; ось Y (вертикальная): внешние стьюдентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted dry matter yield values,%. Y-axis (vertical): external standardized residues (standardized residues), dimensionless value.

и BC , а также квадратичный член C^2 . Факторы взаимодействия AC и квадратичные члены A^2 и B^2 были статистически незначимы ($p > 0,05$).

Согласно F -значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости линейных факторов следующий: B (температура) $>$ C (толщина слоя) $>$ A (продолжительность). Это означает, что среди линейных эффектов температура оказывает наибольшее влияние на отклик, следующими по значимости факторами являются толщина слоя и продолжительность. Следует отметить, что F -значения факторов C и A очень близки, что указывает на сопоставимую силу их влияния.

Содержание сухих веществ в сухих выжимках черной смородины, в зависимости от параметров ИК-сушки, варьировалось от 92,35% до 98,96%. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием сухих веществ представлена в виде поверхностей отклика и их проекций на Рисунке 2.

Как следует из 3D-графика (Рисунок 2), минимальное содержание сухих веществ (92,35) в выжимках черной смородины получено во временном диапазоне от 4 до 4,5 ч при температуре от 60 до 62 °С. Наибольшее содержание сухих веществ (98,96)

было достигнуто во временном диапазоне от 5,5 до 6 ч при температуре от 68 до 70 °С.

Полученные результаты содержания сухих веществ согласуются с данными исследования Blejan et al. (2023): было зафиксировано содержание сухих веществ $89,71 \pm 0,78\%$ при температуре 57 °С и продолжительности сушки 6–7 ч. В свою очередь, Sójka & Król (2009) сообщили о содержании сухих веществ в диапазоне от $94,0 \pm 0,2$ до $96,8 \pm 0,6\%$.

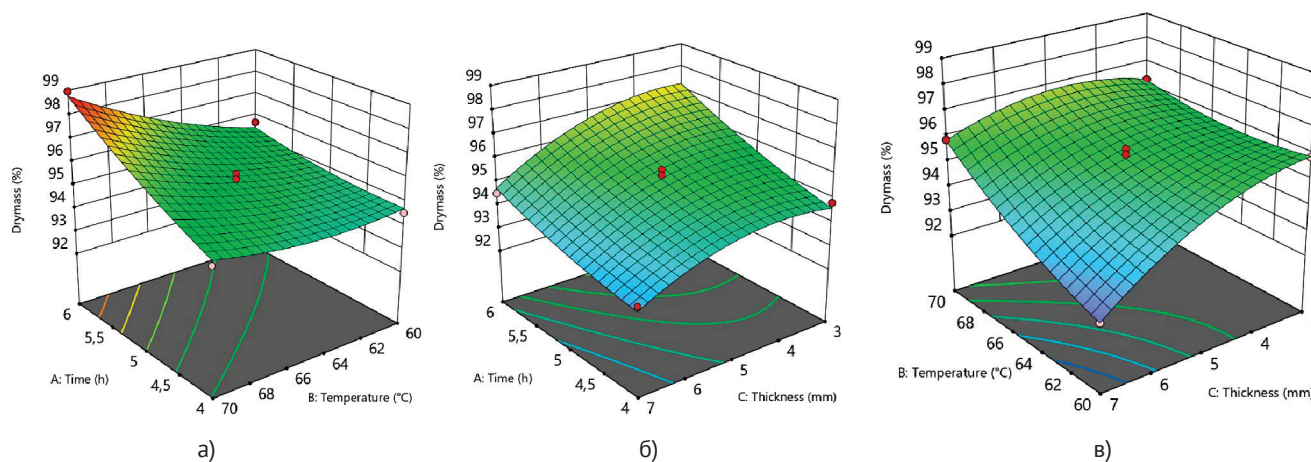
Анализ показателя сухой массы демонстрирует, что наибольшее положительное влияние на величину этого параметра оказывает повышение температуры процесса. Наибольшие значения сухой массы (до 98,96%) наблюдаются при комбинации высокой температуры (70 °С) и увеличенной продолжительности сушки (6 ч) при средней толщине слоя (5 мм). Это указывает на более полное удаление влаги в данных условиях. Вторым значимым фактором является время сушки: увеличение продолжительности с 4 до 6 ч при прочих равных условиях закономерно приводит к росту выхода сухого вещества. Толщина слоя проявляет обратную зависимость: увеличение толщины с 3 до 7 мм негативно сказывается на эффективности удаления влаги, что наиболее ярко видно при низких температурах

Рисунок 2

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания сухих веществ в сушеных выжимках черной смородины

Figure 2

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Dry Matter Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а – влияние продолжительности ИК-сушки и температуры; б – влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя; в – влияние температуры и толщины слоя

Note. а – influence of IR drying duration and temperature; б – influence of IR drying duration and layer thickness; в – influence of temperature and layer thickness

и коротком времени сушки, где зафиксирован минимальный выход сухой массы (92,35 %).

Таким образом, для максимизации выхода сухих веществ необходимо применять высокие температуры и достаточную продолжительность сушки при минимально возможной толщине слоя, обеспечивающей при этом экономическую эффективность процесса.

Содержание сухих веществ в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (2):

$$Y_1 = 95,48 + 1,05 \cdot A + 0,9575 \cdot B - 0,9863 \cdot C + 0,7 \cdot AB - 0,2625 \cdot AC + 0,7850 \cdot BC + 0,2104 \cdot A^2 + 0,3629 \cdot B^2 - 0,7546 \cdot C^2, \quad (2)$$

где Y_1 — содержание сухих веществ в сушеных выжимках;
 A — продолжительность сушки, ч;
 B — температура проведения сушки, °С;
 C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание сухих веществ при заданных значениях параметров и проанализировать как влияние каждого параметра в отдельности, так и эффект взаимодействия.

В уравнении, описывающем выход сухих веществ, положительные линейные коэффициенты времени (A , +1,05) и температуры (B , +0,9575) свидетельствуют о том, что увеличение этих параметров в исследованном диапазоне способствует росту выхода сухой массы. Отрицательный коэффициент толщины слоя (C , -0,9863) показывает, что увеличение этого параметра существенно снижает эффективность сушки, вероятно, из-за ухудшения тепло- и массообмена. Положительные коэффициенты взаимодействия AB (+0,7) и BC (+0,7850) означают, что совместное увеличение продолжительности и температуры сушки, а также температуры и толщины слоя (несмотря на отрицательное влияние толщины в отдельности) дает синергетический эффект, дополнительно повышая выход. Квадратичные члены, особенно значительный отрицательный коэффициент при C^2 (-0,7546), указывают на наличие нелинейных эффектов и возможное существование оптимальной точки по толщине слоя, отклонение от которой ведет к снижению эффективности.

Оценка содержания аскорбиновой кислоты

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание аскорбиновой кислоты представлены в Таблице 4. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9841$, а тест

Таблица 4

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (аскорбиновая кислота)

Table 4

Response Surface Analysis of Variance Method (Ascorbic Acid)

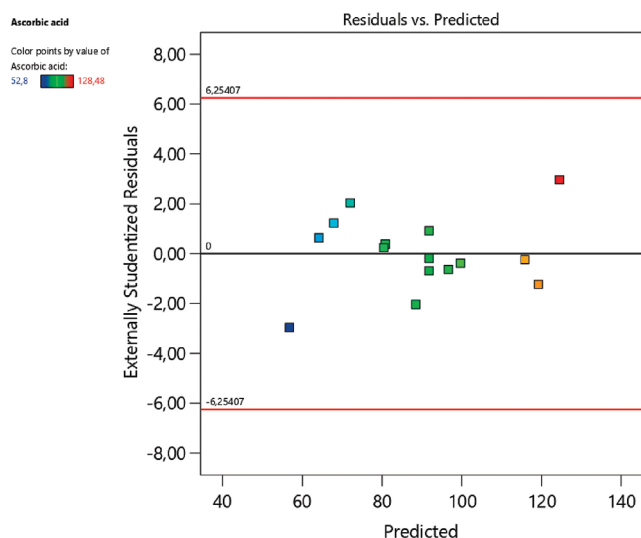
Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратичное значение	F-значение	P-значение
Модель	5620,16	9	624,46	34,43	0
A-Продолжительность	1196,58	1	1196,58	65,98	0
B-Температура	3754,98	1	3754,98	207,06	< 0.0001
C-Толщина слоя	127,68	1	127,68	7,04	0,05
AB	0,14	1	0,14	0,01	0,93
AC	0,02	1	0,02	0	0,98
BC	21,16	1	21,16	1,17	0,33
A ²	264,79	1	264,79	14,6	0,01
B ²	185,17	1	185,17	10,21	0,02
C ²	34,54	1	34,54	1,9	0,23
Остаток	90,67	5	18,13	—	—
Недостаток подгонки	73,06	3	24,35	2,77	0,28
Чистая ошибка	17,61	2	8,81	—	—
Общее количество	5710,83	14	—	—	—
	$R^2 = 0,9841$	Adjusted $R^2 = 0,9555$	Adeq Precision = 19,4965		C.V.% = 4,76

Рисунок 3

График остаточных и предсказанных остатков (аскорбиновая кислота)

Figure 3

Plot of Residual and Predicted Residues (Ascorbic Acid)



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода аскорбиновой кислоты,%; ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted ascorbic acid yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

на отсутствие соответствия (Lack of Fit) – незначимым ($p = 0,28$). Таким образом, модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для определения оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9555 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Для подтверждения адекватности полученной математической модели был проведен анализ остатков. Визуальный анализ графика остатков в зависимости от предсказанных значений (Рисунок 3) не выявил систематических паттернов (воронкообразной или дугообразной формы), что указывает на выполнение условия гомоскедастичности.

Факторы B (температура), A (продолжительность), A^2 и B^2 , влияющие на отклик, были высокозначимыми ($p < 0,05$). Фактор C (Толщина слоя) оказался значимым на границе ($p = 0,05$), в то время как все факторы взаимодействия (AB, AC, BC) и квадратичный член C^2 были статистически незначимы ($p > 0,05$).

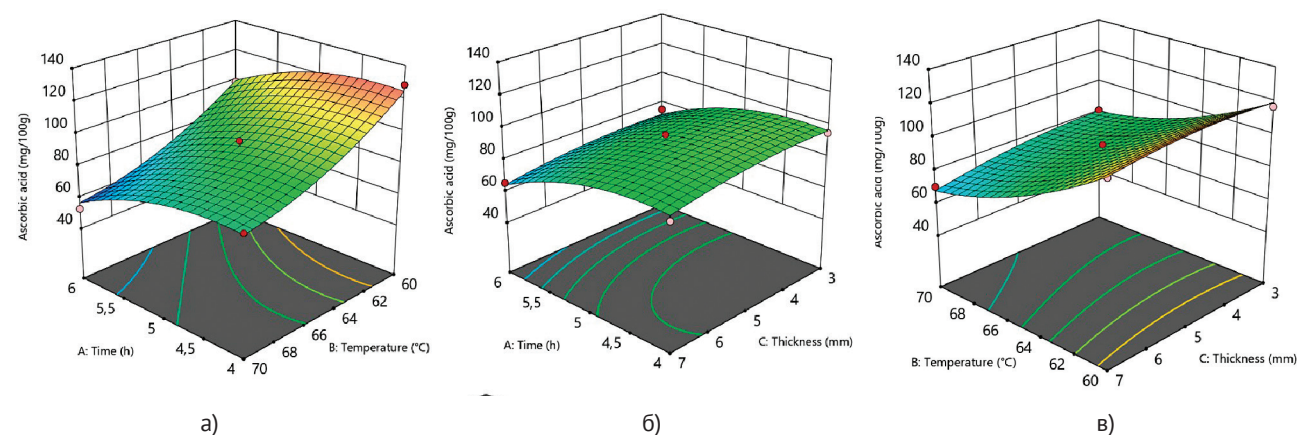
Согласно F -значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости линейных факторов следующий: B (температура) $>$ A (продолжительность) $>$ C (толщина слоя). Среди исследуемых факторов температура демонстрирует наибольшее

Рисунок 4

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания АК в сушеных выжимках черной смородины

Figure 4

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Ascorbic Acid Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а – влияние продолжительности ИК-сушки и температуры, б – влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя, в – влияние температуры и толщины слоя

Note. а – the effect of IR drying duration and temperature, б – the effect of IR drying duration and layer thickness, с – the effect of temperature and layer thickness

влияние на отклик, за ней по убыванию располагаются продолжительность и толщина слоя.

Содержание АК в сухих выжимках черной смородины, в зависимости от параметров ИК-сушки, варьировалось от 52,8 до 128,48 мг/100 г. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием АК представлена в виде поверхностей отклика и их проекций на Рисунке 4.

Анализ 3D-графика (Рисунок 4) показывает, что наименьшее содержание АК (52,8) в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 5,5 до 6 ч при температуре от 66 до 70 °С. Влияние толщины слоя носит нелинейный характер: при тонком слое разрушение АК происходит быстрее, тогда как при очень толстом слое возможна неравномерная сушка. Наибольшее содержание АК (128,48) было зафиксировано во временном диапазоне от 4 до 5,5 часов при температуре от 60 до 62 °С.

Представленные результаты указывает на высокую чувствительность АК к параметрам сушки. В аналогичных исследованиях, посвященных сушке выжимок черной смородины, Василенко З. В. с соавт. отмечают, что потери АК составляют почти 50% по сравнению с сырыми выжимками (Василенко и соавт., 2016).

Результаты определения содержания АК в выжимках черной смородины согласуются по нижней границе с данным группы исследователей под руководством Rubinskienė M., однако диапазон результатов их исследования по содержанию АК оказался значительно шире — от $129,9 \pm 16,5$ до $220,5 \pm 8,8$ мг/100 г (Rubinskienė et al., 2005).

На основании результатов, представленных в Таблице 4 и на Рисунке 4, можно сделать следующие выводы. Важным фактором, влияющим на сохранность АК, является температура: при повышении температуры с 60 °С до 70 °С содержание АК падает приблизительно на 30–45 мг. Так, при продолжительности сушки 5 ч и толщине слоя 3 мм (опыты 9 и 10) повышение температуры на 10 °С приводит к падению АК с 116,72 до 81,04 мг/100 г. В ходе дисперсионного анализа (Таблица 4) определено, что вторым по значимости фактором, влияющим на сохранность АК, является продолжительность сушки. Например, увеличение продолительно-

сти сушки с 4 до 6 ч при прочих равных условиях также приводит к значительным потерям АК (опыты 1–8). Наименее выраженным является влияние толщины слоя, эффект носит нелинейный характер и зависит от взаимодействия с другими параметрами. При низкой температуре (60 °С) и увеличении толщины с 3 до 7 мм содержание АК составляет 116,72 и 115,28 мг/100 г соответственно.

Таким образом, АК является высокочувствительным индикатором режима сушки. Основным деструктурирующим фактором является высокая температура. Для максимального сохранения АК необходимо использовать щадящие режимы сушки при минимальной температуре (60 °С) и продолжительности (4 ч). Толщина слоя оказывает наименьшее влияние в изученных пределах, однако очень тонкий слой (3 мм) при низкотемпературных режимах, по-видимому, является предпочтительным для сохранения АК.

Содержание АК в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (3):

$$Y_2 = 91,84 - 12,23 \cdot A - 21,67 \cdot B - 4 \cdot C + 0,19 \cdot AB + 0,07 \cdot AC - 2,30 \cdot BC - 8,47 \cdot A^2 + 7,08 \cdot B^2 - 3,06 \cdot C^2, \quad (3)$$

где Y_2 — содержание АК в сушеных выжимках;
 A — продолжительность сушки, ч;
 B — температура проведения сушки, °С;
 C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание АК при заданных значениях параметров и проанализировать влияние и взаимовлияние параметров.

Линейный коэффициент влияния продолжительности сушки на сохраняемость АК ($-12,23 \cdot A$) отрицателен. Так, увеличение продолжительности сушки приводит к значительному разрушению вещества. Величина линейного коэффициента температуры ($-21,67 \cdot B$) свидетельствует о сильном отрицательном воздействии на сохраняемость АК. Толщина слоя имеет слабое отрицательное влияние ($-4 \cdot C$), увеличение толщины слоя снижает сохраняемость АК, но незначительно. Коэффициенты взаимодействия (AB , AC и BC) также демонстрируют незначительное влияние по сравнению с линей-

ными эффектами. Наиболее заметным из них является отрицательное взаимодействие температуры и толщины слоя сушки ($-2,30 \cdot BC$), что снижает содержание АК. Квадратичные эффекты взаимодействия свидетельствуют о том, что продолжительность сушки и толщина слоя ($-8,47 \cdot A^2$ и $-3,86 \cdot C^2$) дают отрицательный эффект. Это подтверждает, что зависимость сохраняемости АК от продолжительности и толщины слоя имеет выраженный максимум (оптимум). Таким образом, длительная сушка и использование очень толстого слоя приводят к повышенным потерям АК. Положительное значение квадратичного коэффициента температуры ($+7,08 \cdot B^2$) свидетельствует о том, что кривая зависимости от температуры имеет не максимум, а минимум (вогнутая форма). Однако, учитывая очень сильное отрицательное линейное влияние температуры, на практике это может означать, что АК разрушается при любой температуре выше определенного порога, и этот процесс лишь немного замедляется в некотором диапазоне.

Следовательно, наши исследования подтверждают выводы авторов о чувствительности АК к некоторым параметрам сушки. Полученное уравнение позволяет провести оптимизацию ИК-сушки для максимизации сохранности АК.

Оценка содержания катехинов

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание катехинов представлены в Таблице 5. Общая модель оказалась статистически высокозначимой ($p = 0,0003$), $R^2 = 0,9876$, а тест на отсутствие соответствия (Lack of Fit) — незначимым ($p = 0,5548$). Это свидетельствует о том, что модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для анализа и оптимизации процесса. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9652 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Адекватность подобранной модели так же проверяли методом анализа остатков. Визуальный анализ графиков остатков от предсказанных значений (Рисунок 5) не выявил систематических паттернов, что свидетельствует о выполнении допущений о линейности и постоянстве дисперсии (гомоскедастичности).

Значимыми факторами, влияющими на отклик, являются B (температура) и A^2 (квадратичный эффект продолжительности), оба фактора с чрезвычайно высокой значимостью ($p < 0,01$). A (продолжительность), B^2 (квадратичный эффект температуры) и C^2 (квадратичный эффект толщины слоя) — значимы ($p < 0,05$). Линейный эффект фактора C (толщина слоя) и все факторы взаимодействия (AB , AC , BC) оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

Таблица 5
Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (катехины)

Table 5
Response Surface Analysis of Variance Method (Catechins)

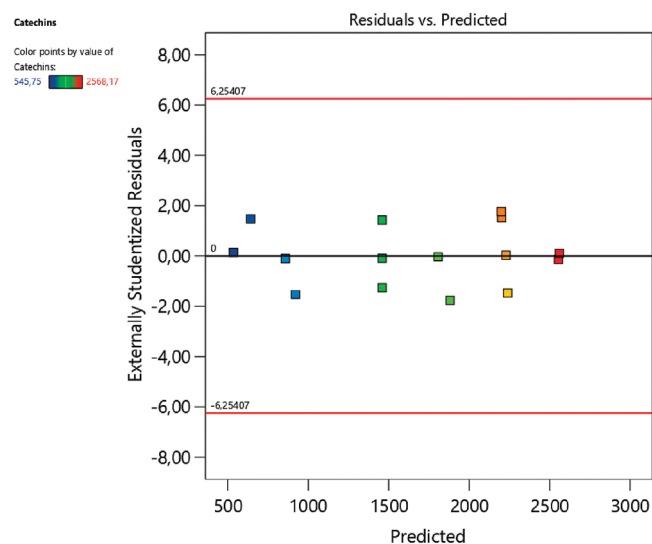
Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратичное значение	F-значение	P-значение
Модель	6,535E + 06	9	7,262E + 05	44,20	0,0003
A-Продолжительность	2,729E + 05	1	2,729E + 05	16,61	0,0096
B-Температура	5,444E + 06	1	5,444E + 06	331,41	< 0.0001
C-Толщина слоя	5525,63	1	5525,63	0,3364	0,5871
AB	222,31	1	222,31	0,0135	0,9119
AC	513,70	1	513,70	0,0313	0,8666
BC	72474,02	1	72474,02	4,41	0,0897
A ²	2,767E + 05	1	2,767E + 05	16,85	0,0093
B ²	1,205E + 05	1	1,205E + 05	7,34	0,0424
C ²	3,225E + 05	1	3,225E + 05	19,63	0,0068
Остаток	82138,67	5	16427,73		
Недостаток подгонки	47887,47	3	15962,49	0,9321	0,5548
Чистая ошибка	34251,20	2	17125,60		
Общее количество	6,618E + 06	14			
	$R^2 = 0,9876$	Adjusted $R^2 = 0,9652$	Adeq Precision = 19,3474		C.V.% = 7,69

Рисунок 5

График остаточных и предсказанных остатков (катехины)

Figure 5

Plot of Residual and Predicted Residues (Catechins).



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода катехинов,%. ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина.

Note. X-axis (horizontal): model-predicted catechin yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

Согласно *F*-значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости основных факторов следующий: *B* (температура) > *A* (продолжительность) > *C* (толщина слоя). Это означает, что температура оказывает наибольшее влияние на отклик, за которым с существенным отрывом следует продолжительность, в то время как влияние толщины слоя в его линейной форме является незначительным.

В результате исследования влияния ИК-сушки на содержание катехинов в выжимках черной смородины установлено, что их содержание варьируется от 545,75 до 2568,17 мг/100 г в зависимости от заданных параметров, что свидетельствует о крайней чувствительности полифенолов к условиям тепловой обработки.

Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием катехинов представлена на Рисунке 6 в виде поверхностей отклика и их проекций.

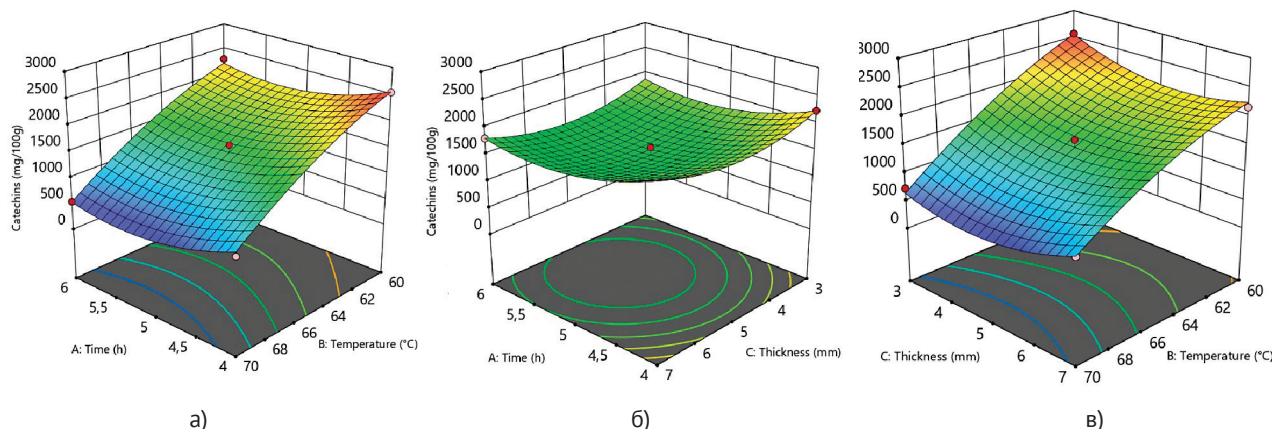
Из 3D-графика (Рисунок 6) следует, что минимальное содержание катехинов (545,75 мг/100 г) в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 4,3 до 6 ч при температуре от 68 до 70 °С. Максимальное содержание катехинов

Рисунок 6

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания катехинов в сушеных выжимках черной смородины

Figure 6

Three-Dimensional (3D) Response Surface Graphs of Catechin Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а – влияние продолжительности ИК-сушки и температуры; б – влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя; в – влияние температуры и толщины слоя

Note. а – influence of IR drying duration and temperature; б – influence of IR drying duration and layer thickness; в – influence of temperature and layer thickness

(2568,17 мг/100 г) было получено во временном диапазоне от 4,5 до 5 ч при температуре от 60 до 62 °С.

Исследование влияния температуры на содержание катехинов в выжимках черной смородины проводили З. В. Василенко с соавт. Ими было установлено, что содержание катехинов в экстрактах, полученных при температуре 50 °С, составляет $707,00 \pm 6,5$ мг/100 г. Исследователи также приводят данные о деградации катехинов, согласно которым экстракты, полученные при 70 °С, не содержали катехинов (Василенко и соавт., 2020).

Стоит отметить, что в научной литературе встречается очень большой разброс данных по содержанию катехинов в выжимках черной смородины, что указывает на высокую лабильность данного показателя. Так, Untea A. E. с соавт. приводят довольно низкие значения содержания катехинов — 25,3 мг/100 г (Untea et al., 2024), в то время как в работе Громовой И. А. приводятся значительно более высокие показатели содержания катехинов — 382 мг/100 г (Громова и соавт., 2021). В работе Blejan . М., содержание катехинов в выжимках черной смородины составило 1253 ± 1 мг/100 г (Blejan et al., 2023).

Полученные результаты показывают важность температуры сушки как фактора, влияющего на содержание катехинов в выжимках. Причем эту зависимость можно охарактеризовать как значительную отрицательную, что было подтверждено в ходе дисперсионного анализа (Таблица 5). Например, при продолжительности сушки 4 ч и толщине слоя 5 мм (опыты 1 и 3) рост температуры с 60 °С до 70 °С приводит к падению содержания с 2545,5 до 833,07 мг/100 г. Это связано с термическим разложением и окислением полифенолов. На содержание катехинов влияет и продолжительность сушки: увеличение времени сушки усугубляет их деградацию. Влияние толщины слоя носит опосредованный характер взаимодействия температуры и времени. При низкой температуре (60 °С) более тонкий слой (3 мм, опыт 9) показывает лучшее сохранение катехинов по сравнению с толстым (7 мм, опыт 11) — 2568,17 и 2154 мг/100 г соответственно. Однако при высокой температуре картина может меняться. Толстый слой может замедлять как прогрев, так и удаление влаги, продлевая время окислительных процессов. Оптимальными условиями для сохранения катехинов является температура 60 °С, продолжительность ИК-сушки до 4 ч, толщина слоя около 3 мм.

Содержание катехинов в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (4):

$$Y_3 = 1459,97 - 184,71 \cdot A - 824,95 \cdot B - 26,28 \cdot C - 7,46 \cdot AB - 11,33 \cdot AC + 134,6 \cdot BC + 273,77 \cdot A^2 - 180,66 \cdot B^2 + 295,55 \cdot C^2, \quad (4)$$

где Y_3 — содержание катехинов в сушеных выжимках;

A — продолжительность сушки, ч;

B — температура проведения сушки, °С;

C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание катехинов при заданных значениях параметров.

Линейные коэффициенты исследуемых факторов имеют отрицательные значения (4). Исходя из представленного уравнения, наибольшее негативное влияние на сохраняемость катехинов оказывает повышение температуры сушки ($-824,95 \cdot B$), наименьшее — изменение толщины слоя ($-26,28 \cdot C$).

Коэффициент взаимодействия температуры и толщины слоя ($+134,6 \cdot BC$) свидетельствует о сильном положительном влиянии. Несмотря на то, что увеличение температуры и толщины слоя по отдельности разрушают катехины, их совместное увеличение частично компенсирует этот негативный эффект. Вероятно, в толстом слое при высокой температуре процессы идут несколько иначе, в частности, доступ кислорода может быть ограничен. Взаимодействие продолжительности сушки и температуры ($-7,46 \cdot AB$), а также продолжительности сушки и толщины слоя ($-11,33 \cdot AC$) проявляется как слабый отрицательный эффект.

Квадратичные эффекты взаимодействия продолжительности сушки ($+273,77 \cdot A^2$) и толщины слоя ($+295,55 \cdot C^2$) оказывают сильное положительное влияние. Это указывает на сложную, выпуклую форму зависимости с минимумом. Однако в контексте сильных отрицательных линейных эффектов это, скорее всего, означает, что после определенной точки падения содержание катехинов может немного возрастать благодаря деполимеризации и высвобождению мономеров, но их общий уровень остается низким. Эффект увеличения температуры ($-180,66 \cdot B^2$) является отрицательным,

что в сочетании с сильным отрицательным линейным эффектом подтверждает наличие ярко выраженного максимума (оптимума) по температуре.

Таким образом, катехины так же, как и АК, сильно зависят от температурного режима, что обуславливает необходимость использования низкотемпературных режимов сушки.

Оценка содержания антоцианов

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание антоцианов представлены в Таблице 6. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9966$, а отсутствие соответствия (Lack of Fit) незначимо ($p = 0,34 > 0,05$). Результаты показывают, что модель статистически значима и с высокой точностью соответствует экспериментальным данным, что позволяет использовать ее для определения оптимальных условий процесса. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9906 указывает на исключительную надежность и высокую точность модели. На Рисунке 7 представлен график зависимости остатков от предсказанных значений. Визуальный анализ показывает, что точки располагаются случайным образом без выраженной тенденции, дисперсия остатков постоянна (гомоскедастичность).

Таблица 6

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (антоцианы).

Table 6

Response Surface Analysis of Variance Method (Anthocyanins)

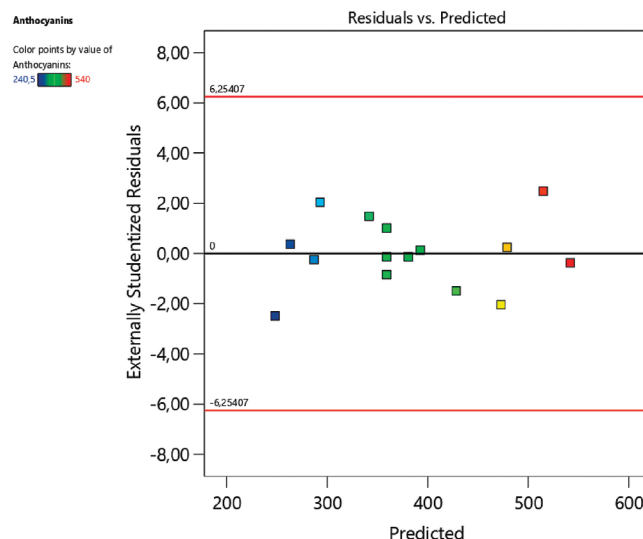
Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратичное значение	F-значение	P-значение
Модель	1,15E + 05	9	12806,88	164,56	< 0,0001
A-Продолжительность	2793,78	1	2793,78	35,9	0
B-Температура	1,05E + 05	1	1,05E + 05	1350,61	< 0,0001
C-Толщина слоя	4875,78	1	4875,78	62,65	0
AB	1,96	1	1,96	0,03	0,88
AC	2,72	1	2,72	0,04	0,86
BC	384,16	1	384,16	4,94	0,08
A ²	245	1	245	3,15	0,14
B ²	833,08	1	833,08	10,7	0,02
C ²	1283,69	1	1283,69	16,49	0,01
Остаток	389,12	5	77,82	-	-
Недостаток подгонки	296,4	3	98,8	2,13	0,34
Чистая ошибка	92,73	2	46,36	-	-
Общее количество	1,16E + 05	14	-	-	-
	$R^2 = 0,9966$	Adjusted $R^2 = 0,9906$	Adeq Precision = 40,7643		C. V. % = 2,31

Рисунок 7

График остаточных и предсказанных остатков (антоцианы)

Figure 7

Plot of Residual and Predicted Residues (Anthocyanins)



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода антоцианов,%; ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted anthocyanin yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

Значимыми факторами, влияющими на отклик, являются: *B* (температура), *A* (продолжительность) и *C* (толщина слоя) — все три фактора чрезвычайно значимы ($p < 0,01$); B^2 (квадратичный эффект температуры) и C^2 (квадратичный эффект толщины слоя) — значимы на уровне $p < 0,05$; факторы взаимодействия (*AB*, *AC*, *BC*) и квадратичный эффект A^2 оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

Согласно *F*-значению, которое отражает силу влияния факторов, порядок их значимости следующий: *B* (температура) > *C* (толщина слоя) > *A* (продолжительность). Это указывает на то, что температура оказывает наибольшее и доминирующее влияние на отклик, в то время как толщина слоя и продолжительность имеют умеренное, но существенное воздействие.

В результате исследования влияния сушки выжимок черной смородины на сохраняемость антоцианов, установлено, что содержание антоцианов варьировалось от 240,5 до 540 мг/100 г в зависимости от параметров ИК-сушки. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием антоцианов представлена на Рисунке 8 в виде поверхностей отклика и их проекций.

3D-график (Рисунок 8) демонстрирует, что наименьшее содержание антоцианов (240,5 мг/100 г)

в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 5 до 6 часов и температуре от 68 до 70 °С. Наибольшее содержание антоцианов (540 мг/100 г) было получено во временном диапазоне от 4 до 4,5 часов и при температуре от 60 до 62 °С.

Влияние температуры на сохраняемость антоцианов в выжимках черной смородины проводили Василенко З. В. с соавт., которыми было установлено, что содержание антоцианов в экстрактах, полученных при температуре 50 °С составляет $41,00 \pm 0,2$ мг/100 г, при повышении температуры до 70 °С выход антоцианов снижается (Василенко и соавт., 2020).

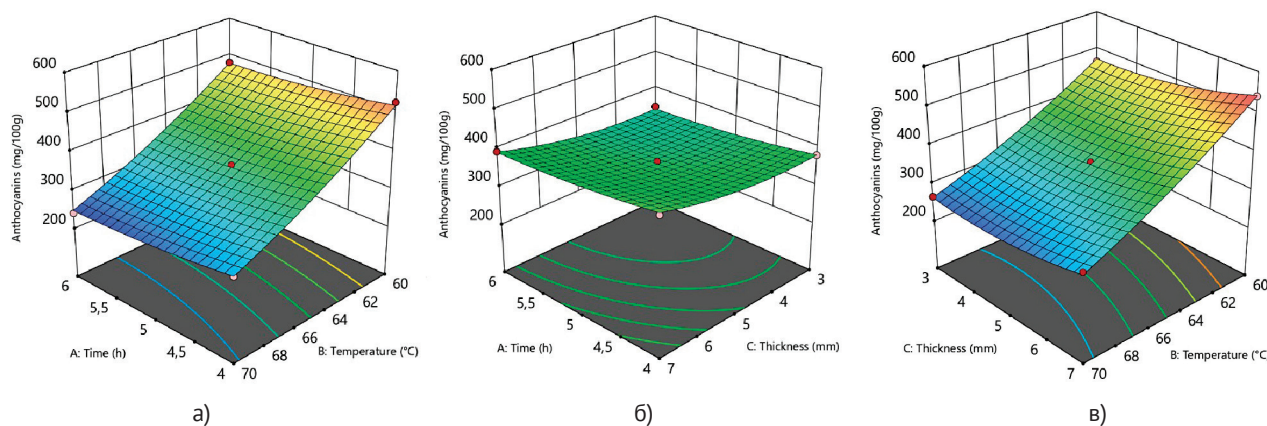
Представленные экспериментальные результаты согласуются с данными исследований группы ученых под руководством Syjka M. ($344,6-1046,1$ мг/100 г) (Syjka et al., 2009), Blejan A. M. (368 ± 7 мг/100 г) (Blejan et al., 2023). Rubinskienė M. и соавт. приводят более высокие значения содержания антоцианов в выжимках черной смородины ($745-1542$ мг/100 г) (Rubinskienė et al., 2005), что согласуется с результатами исследований под руководством Громовой И. ($777,52$ мг/100 г) (Громова и соавт., 2021). Группа польских ученых в своих работах указывает на более низкое содержание антоцианов — $113,78 \pm 4,55$ мг/100 г (Pieszka et al., 2015).

Рисунок 8

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания антоцианов в сушеных выжимках черной смородины

Figure 8

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Anthocyanin Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а — влияние продолжительности сушки и температуры, б — влияние продолжительности сушки и толщины слоя, в — влияние температуры и толщины слоя

Note. а — effect of drying time and temperature, b — effect of drying time and layer thickness, c — effect of temperature and layer thickness

Результаты, представленные в Таблице 6 и на Рисунке 8, свидетельствуют о сильном отрицательном влиянии температуры на сохраняемость антоцианов, т. е. повышение температуры ведет к снижению содержания антоцианов (опыты 1, 3, 9–12). В ходе дисперсионного анализа было определено, что вторым по значимости фактором является толщина слоя (Таблица 6). При низкой температуре (60 °С) увеличение толщины слоя с 3 до 7 мм (опыты 9 и 11) приводит не к падению, а к росту содержания антоцианов (465,8 и 540 мг/100 г соответственно). С одной стороны, в более толстом слое создаются условия (меньший доступ кислорода, более мягкий тепловой режим в глубине слоя), которые благоприятствуют сохранению этих веществ, с другой стороны, термическое разрушение клеточных стенок при нагреве обеспечивает увеличение содержания антоцианов, что отмечается некоторыми авторами (Алексеевко и соавт., 2019; Макаров и соавт., 2018). Этот эффект исчезает при высокой температуре (70 °С), где разрушительное действие тепла превалирует. Продолжительность сушки является третьим по значимости фактором. Увеличение времени сушки при той же температуре снижает выход антоцианов (опыты 1–4).

Антоцианы демонстрируют промежуточную стабильность между АК и катехинами. Для их сохранения также предпочтительны низкие температуры (60 °С) и непродолжительное время сушки (4 ч). Ключевой находкой является положительное влияние увеличения толщины слоя до 7 мм на сохранность антоцианов в щадящем температурном режиме. Это позволяет рекомендовать более толстый слой (7 мм) для максимизации сохраняемости данной группы веществ.

Содержание антоцианов в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (5):

$$Y_4 = 359,03 - 18,69 \cdot A - 114,62 \cdot B + 24,69 \cdot C - 0,7 \cdot AB + 0,825 \cdot AC - 9,8 \cdot BC + 8,15 \cdot A^2 + 15,02 \cdot B^2 + 18,65 \cdot C^2, \quad (5)$$

где Y_4 — содержание антоцианов в сушеных выжимках;

A — продолжительность сушки, ч;

B — температура проведения сушки, °С;

C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание антоцианов при заданных значениях параметров.

Линейный коэффициент влияния продолжительности сушки ($-18,69 \cdot A$) носит отрицательный характер, т. е. увеличение времени высушивания незначительно снижает содержание антоцианов. Линейный коэффициент влияния температуры ($-114,62 \cdot B$) характеризуется значительным отрицательным эффектом: повышение температуры снижает выход антоцианов. В свою очередь, линейный коэффициент влияния толщины слоя ($+24,69 \cdot C$) характеризуется положительным эффектом, следовательно, увеличение толщины слоя способствует сохранению антоцианов.

Коэффициенты взаимодействия между продолжительностью и температурой ($-0,7 \cdot AB$), продолжительностью и толщиной слоя ($0,825 \cdot AC$) отличаются слабым взаимодействием друг с другом. Наиболее заметным является взаимодействие температуры и толщины слоя ($-9,8 \cdot BC$), которое носит отрицательный характер, что несколько ослабляет положительный эффект от толщины при высоких температурах.

Все квадратичные эффекты взаимодействия характеризуются положительным влиянием ($+8,15 \cdot A^2$), ($+15,02 \cdot B^2$), ($+18,65 \cdot C^2$). Это указывает на то, что зависимости имеют U -образную форму (выпуклые с минимумом). Для антоцианов существует комбинация факторов, при которой их потери минимальны, а после прохождения этой точки минимума выход может даже несколько увеличиваться.

Антоцианы характеризуются большей термической стабильностью, чем катехины и аскорбиновая кислота. Наиболее важно для их сохранения избегать высоких температур, при этом увеличение толщины слоя является благоприятным фактором.

Механизм деградации биологически активных веществ

Представленные данные позволяют раскрыть механизмы деградации биологически активных веществ в условиях ИК-сушки. Аскорбиновая кислота проявляет высокую чувствительность к температурно-временному фактору: её деградация проис-

ходит преимущественно за счет термического окисления и участия в реакциях неферментативного побурения. Напротив, антоцианы демонстрируют большую стабильность при увеличении толщины слоя, что связано с ограничением доступа кислорода и формированием градиента температуры в толстом слое, защищающего внутренние объемы от перегрева. Катехины, как наиболее термолабильные соединения, требуют минимально возможной температуры и времени сушки. Полученные уравнения регрессии количественно подтверждают эти закономерности, показывая, что оптимизация параметров сушки позволяет найти компромисс между скоростью процесса и сохранностью ценных компонентов.

Оптимизация сушки для максимизации выхода биологически активных веществ

Основной задачей подбора оптимальных параметров является максимизация сохранения биологически активных веществ в выжимках черной смородины, для чего была решена система уравнений (формулы 2–5).

С использованием метода поверхности отклика и плана Бокса — Бенкена были построены математические модели, описывающие влияние параметров ИК-сушки на сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов, антоцианов и выход сухих веществ в выжимках черной смородины. На основе этих моделей были рассчитаны оптимальные параметры процесса: продолжительность — 4 ч, температура — 60 °С, толщина слоя — 6,2 мм. Прогнозируемое содержание БАВ в сухих выжимках при данных условиях составляет: аскорбиновая кислота — 122,47 мг/100 г, катехины — 2568,1 мг/100 г, антоцианы — 540,65 мг/100 г при содержании сухих веществ — 93,6 %, что обеспечивает микробиологическую стабильность и пригодность к длительному хранению полученного продукта. Полученные результаты носят модельный характер и требуют экспериментальной проверки в рамках валидационных исследований. Предложенные параметры могут служить основой для разработки технологических режимов сушки с целью получения функционального пищевого ингредиента.

Валидация данных

Сопоставление расчетных оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины (4 ч, 60 °С, толщина слоя 6,2 мм), определенных методом поверхности отклика в исследовании, с фактически данными, полученными ранее при сушке продолжительностью 4 ч, температуре 60 °С и толщине слоя 3,8 мм (Еремина и др. 2025), показывает частичное соответствие модельных прогнозов и экспериментальных результатов. Содержание аскорбиновой кислоты в реальных образцах (126,72 мг/100 г) хорошо согласуется с прогнозируемым значением (122,47 мг/100 г), что подтверждает адекватность модели по данному параметру. Однако наблюдаются существенные расхождения для полифенольных соединений: фактическое содержание катехинов (2026,50 мг/100 г) оказалось на 21 % ниже модельного прогноза (2568,1 мг/100 г), а содержание антоцианов (315,00 мг/100 г) — на 42 % ниже расчетного уровня (540,65 мг/100 г). Эти отклонения могут быть обусловлены различием толщины слоя в экспериментах (3,8 мм против оптимизированных 6,2 мм), что значительно влияет на кинетику тепломассопереноса и, как следствие, на сохранность термолабильных антоцианов и катехинов, а также природной вариабельностью сырья по сортовому составу и исходному содержанию БАВ. Таким образом, модель достаточно точно прогнозирует сохранность аскорбиновой кислоты, но для повышения точности прогноза по полифенолам требует уточнения с учетом фактора толщины слоя и возможной нелинейности её влияния в расширенном диапазоне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании методом поверхности отклика (плана Бокса–Бенкена) впервые для выжимок черной смородины определены оптимальные параметры ИК-сушки, обеспечивающие компромиссное сохранение основных групп биологически активных веществ: продолжительность 4 ч, температура 60 °С, толщина слоя 6,2 мм. При данных условиях модель прогнозирует содержание сухих веществ 93,6 %, аскорбиновой кислоты — 122,47 мг/100 г, катехинов — 2568,1 мг/100 г, антоцианов — 540,65 мг/100 г. Установлено, что наибольшее деструктивное влияние на все БАВ оказывает температура; толщина слоя влияет разнонаправленно

(положительно для антоцианов, отрицательно для катехинов и аскорбиновой кислоты).

Выдвинутая гипотеза о том, что оптимизация трёх ключевых факторов (продолжительность, температура, толщина слоя) позволяет повысить сохранность БАВ, полностью подтвердилась. Полученные математические модели ($R^2 = 0,974-0,997$) подтверждают, что все исследованные отклики описываются полиномами второго порядка, причём наличие значимых квадратичных членов (C^2 для сухих веществ, A^2 и B^2 для АК, A^2 и C^2 для катехинов, B^2 и C^2 для антоцианов) указывает на существование чётко выраженных оптимумов, а не линейных трендов.

Особого внимания заслуживает разнонаправленное влияние толщины слоя. Если для аскорбиновой кислоты и катехинов увеличение толщины слоя закономерно ухудшает сохранность (замедление тепло- и массопереноса, пролонгирование термического стресса), то для антоцианов при 60 °С наблюдается обратный эффект. Мы связываем это с двумя механизмами: во-первых, ограничением доступа кислорода в глубоких слоях, что снижает скорость окислительной деградации; во-вторых, с более полной экстракцией антоцианов из разрушенных нагревом клеточных стенок при умеренных температурах, что уже отмечалось в работах Алексеенко и соавт. (2019) и Макарова и соавт. (2018). При 70 °С данный положительный эффект нивелируется термодеструкцией.

Прогнозируемое содержание АК в оптимуме (122,47 мг/100 г) хорошо согласуется с данными Василенко и Могилевчик (2016), отмечавших потери АК около 50% относительно свежего сырья, и с результатами Rubinskienė et al. (2005) для нижней границы их диапазона (129,9 мг/100 г). Валидационный эксперимент (126,72 мг/100 г) подтвердил высокую предсказательную способность модели для данного витамина.

Диапазон экспериментальных значений содержания катехинов (545–2568 мг/100 г) полностью перекрывает литературные данные: Blejan et al. (2023) — 1253 мг/100 г, Громова и соавт. (2021) — 382 мг/100 г, Untea et al. (2024) — 25,3 мг/100 г. Столь широкая вариативность, по-видимому, обусловлена сортовыми особенностями, условиями экстракции и, главное, режимами сушки. Наши данные подтверждают

вывод Василенко и соавт. (2020) о практически полной деградации катехинов при 70 °С.

Полученный максимум содержания антоцианов (540 мг/100 г) соответствует верхней границе результатов Syjka & Król (2009) — 344–1046 мг/100 г — и значениям Blejan et al. (2023) — 368 мг/100 г. Более высокие концентрации, приводимые Rubinskienė et al. (2005) и Громовой и соавт. (2021) (до 1542 мг/100 г), вероятно, относятся к образцам, не подвергавшимся сушке, либо к экстрактам, полученным в щадящих условиях. Это подчёркивает значимость правильно подобранного режима тепловой обработки.

Достигнутое остаточное влагосодержание (~6,4%) соответствует требованиям к микробиологической стабильности и согласуется с рекомендациями Ермолаева и соавт. (2015) и Галиакберовой и соавт. (1996). Полученная модель позволяет достичь содержания сухих веществ 93,6%, что выше, чем в работе Blejan et al. (89,7%), и находится в диапазоне, указанном Syjka & Król (94,0–96,8%).

Помимо контролируемых факторов (времени, температуры, толщины слоя), на сохранность БАВ могли повлиять: сортовой состав, использование смеси сортов (50% Орловская серенада + 50% сеянец 3556-16-81) обеспечило типичную для промышленного сырья вариативность исходного содержания БАВ.

Фотометрическое определение катехинов и антоцианов без разделения на индивидуальные соединения дает суммарную оценку, что затрудняет прямое сопоставление с работами, где использована ВЭЖХ.

Частичное несоответствие прогноза по полифенолам (занижение на 21–42% при толщине слоя 3,8 мм) объясняется не только разницей в толщине слоя, но и тем, что модель, построенная на диапазоне 3–7 мм, может недостаточно точно описывать нелинейные эффекты вблизи границ факторного пространства. Это указывает на необходимость дополнительных экспериментов при толщине слоя более 6 мм.

Ограничение исследования

Исследование выполнено на выжимках фиксированного сортового состава одного года урожая,

что не позволяет экстраполировать результаты на другие сорта и агроклиматические условия без дополнительной проверки.

Диапазоны факторов. Оптимум по толщине слоя (6,2 мм) находится внутри исходного интервала, однако для подтверждения воспроизводимости эффекта положительного влияния толстого слоя на антоцианы необходимы эксперименты с расширенным диапазоном (например, 5–9 мм).

Несмотря на то, что каждый опыт выполнен в двух независимых биологических повторностях, план Бокса–Бенкена с тремя центральными точками обеспечивает устойчивые оценки, однако увеличение числа повторностей в центре плана повысило бы точность оценки чистой ошибки.

Расчётный оптимум (6,2 мм) экспериментально не проверен; представленная валидация относится к иной толщине слоя (3,8 мм). Это оставляет открытым вопрос о точности модели именно в найденной оптимальной точке.

В исследовании не оценивались такие важные показатели, как антиоксидантная активность (FRAP, DPPH), содержание пищевых волокон, органолептические свойства и микробиологические показатели готового продукта. Без учёта этих характеристик рекомендации по промышленному использованию являются предварительными.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на: экспериментальную верификацию оптимума с толщиной слоя 6,2 мм; изучение кинетики деградации индивидуальных антоцианов и флавонолов методом ВЭЖХ; оценку влияния предварительной обработки сырья (бланширование, криообработка) на сохранность БАВ и продолжительность сушки; разработку рецептур пищевых продуктов с использованием полученного порошка и исследование его функциональных свойств *in vitro* и *in vivo*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования методом поверхности отклика (план Бокса–Бенкена) впервые осуществлено математическое моделирование и статистическая оптимизация параметров ИК-сушки выжимок черной смородины. Установ-

лено, что наиболее значимым фактором, определяющим сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов и антоцианов, является температура; продолжительность сушки и толщина слоя также вносят существенный вклад, причём влияние толщины слоя на антоцианы носит положительный характер при низкотемпературных режимах.

Определены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие максимально возможное (в рамках исследованных диапазонов) сохранение биологически активных веществ: продолжительность 4 ч, температура 60 °С, толщина слоя 6,2 мм. Прогнозируемые показатели качества продукта при данных условиях: содержание сухих веществ — 93,6 %, аскорбиновой кислоты — 122,47 мг/100 г, катехинов — 2568,1 мг/100 г, антоцианов — 540,65 мг/100 г. Полученные уравнения регрессии ($R^2 > 0,97$) обладают высокой предсказательной способностью и могут быть использованы для целенаправленного проектирования состава сушеных выжимок.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на её основе возможна разработка импортозамещающей технологии получения отечественного функционального пищевого ингредиента с заданным содержанием природных антиоксидантов. Использование таких ингредиентов при производстве обогащенных продуктов питания позволит расширить ассортимент продукции здорового питания и снизить экологическую нагрузку за счёт вовлечения вторичных сырьевых ресурсов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной апробацией найденного оптимума, изучением стабильности БАВ при хранении полученного порошка, а также с разработкой рецептур и оценкой потребительских свойств обогащенных продуктов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Анохин Юрий Владимирович: концептуализация; разработка модели исследования; проведение исследования; верификация данных; написание и редактирование рукописи.

Еремина Ольга Юрьевна: концептуализация; разработка модели исследования; методология; научное руководство исследованием; рецензирование и редактирование рукописи.

Салина Елена Сергеевна: концептуализация; методология; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи.

Левгерова Надежда Станиславовна: методология, научное руководство исследованием; рецензирование и редактирование рукописи.

Сидорова Ирина Анатольевна: проведение исследования; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuri V. Anokhin: conceptualization; research model design; conducting the research; data verification; writing and editing the manuscript.

Olga Yu. Eremina: conceptualization; research model design; methodology; research supervision; reviewing and editing the manuscript.

Elena S. Salina: conceptualization; methodology; data verification; reviewing and editing the manuscript.

Nadezhda S. Levgerova: methodology; research supervision; reviewing and editing the manuscript.

Irina A. Sidorova: conducting the research; data verification; reviewing and editing the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

- Акулич, А. В., & Гостинщикова, Л. А. (2017). *Способ сушки ягоды устройство для его осуществления* (Патент ВУ 20746). Национальный центр интеллектуальной собственности.
- Алексеев Е. В., Бакуменко О. Е., Азарова М. М., Исабаев И. Б., & Курбанов М. Т. (2019). Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 10–27. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>
- Анохин, Ю. В., Еремина, О. Ю., Левгерова, Н. С., Салина, Е. С., & Сидорова, И. А. (2025). Оптимизация сушки выжимок облепихи с использованием метода поверхности отклика. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, 5, 31–39. <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2025-94-5-31-39>
- Василенко, З. В., & Могилевчик, Н. А. (2016). Минеральный и витаминный состав выжимок ягод. *Вестник Могилевского Государственного Университета Продовольствия*, 20(1), 20–23.
- Василенко, З. В., Омарова, Э., & Могилевчик, Н. А. (2020). Исследование влияния технологических факторов на извлечение фенольных соединений из выжимок ягод. *Потребительская кооперация*, 1, 42–46.
- Галиакберова, Н. З., Николаев, Н. А., & Галиакберов, З. К. (1996). *Способ получения порошков из растительного сырья* (Патент № 2064477). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Громова, И. А., Воронина, М. С., & Макарова, Н. В. (2021). Исследование химических характеристик продуктов и отходов переработки ягод черники и черной смородины. *Химия растительного сырья*, 1, 251–257. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021017020>
- Дерканосова, Н. М., Гинс, В. К., Лупанова, О. А., & Андропова, И. И. (2015). Разработка способов получения и применения натурального пищевого красителя. *Техника и технология пищевых производств*, 1(36), 18–23.
- Еремина, О. Ю., & Анохин, Ю. В. (2024). *Подбор оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины для снижения кислотности и максимизации содержания биологически*

- активных веществ*. Потребительский рынок: проблемы качества и безопасности товаров и услуг (с. 156–162). Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева.
- Еремина, О.Ю., Анохин, Ю.В. (2025). Исследование биологически активных веществ и оценка функциональных свойств сушеных выжимок черной смородины и облепихи. *Индустрия питания*, 10(4), 79–89. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-4-8>
- Ермолаев, В. А., Федоров, Д. Е., Соснина, О. Б., & Лифенцева, Л. В. (2015). *Способ вакуумной сушки фруктов и ягод* (Патент № 2541395). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Кольман, О. Я., Иванова, Г. В., & Никулина, Е. О. (2015). *Способ получения порошков из сушеных выжимок ягод брусники и клюквы* (Патент № 2555592). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Макаров С. С., Макаров С. Ю., & Панасюк А. Л. (2018). Влияние различных технологических факторов на состав антоцианов при производстве вина из черной смородины. *Техника и технология пищевых производств*, 48(3), 72–80. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-72-80>
- Цыганов М. С., & Никитина Е. В. (2024). Оптимизация ферментной модификации крахмала для коррекции текстуры обезжиренного кисломолочного продукта. *Пищевая промышленность*, 9(1), 60–72. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-7>
- Asif, A., Farooq, U., Akram, K., Hayat, Z., Shafi, A., Sarfraz, F., Sidhu, M. a. I., Rehman, H., & Aftab, S. (2016). Therapeutic potentials of bioactive compounds from mango fruit wastes. *Trends in Food Science & Technology*, 53, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.004>
- Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., & Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530>
- Blicharz-Kania, A., Pecyna, A., Zdybel, B., & Andrejko, D. (2025). Physicochemical, functional and nutritional characteristics of various types of fruit Pomace. *Processes*, 13(10), 3182. <https://doi.org/10.3390/pr13103182>
- Coman, V., Teleky, B., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Călinoiu, L., & Vodnar, D. C. (2019). Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 91, 157–225. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.07.001>
- Ciurlă, L., Enache, I., Buțerchi, I., Mihalache, G., Lipșa, F. D., & Patraș, A. (2024). A New Approach to Recover Bioactive Compounds from Apple Pomace: Healthy Jelly Candies. *Foods*, 14(1), 39. <https://doi.org/10.3390/foods14010039>
- Eremina, O. Y., Berezina, N. A., Vetrova, O. N., Seregina, N. V., & Gutsyna, A. A. (2021). Optimization of enzymatic hydrolysis of malt barley sprouts. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 640(2), 022043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022043>
- Hussain, S., Sharma, M., & Bhat, R. (2021). Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of Ultrasonic-Assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/foods10061330>
- Ibrahim, U. K., Kamarrudin, N., Suzihaque, M. U. H., & Hashib, S. A. (2017). Local fruit wastes as a potential source of natural antioxidant: An overview. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 206, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/206/1/012040>
- Kumar T., A. K., Pareek, S., Kaur, R., Sagar, N. A., Singh, L., Sami, R., Aljuraide, N. I., Elhakem, A., Alsharari, Z. D., Alruwais, R. S., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022). Optimization of Ultrasonic-Assisted enzymatic extraction of freeze-dried sea buckthorn (*hippophae rhamnoides l.*) berry oil using response surface methodology. *Sustainability*, 14(17), 10849. <https://doi.org/10.3390/su141710849>
- Lustenberger, S., Boczkaj, G., & Castro-Muñoz, R. (2022). Cannabinoids: Challenges, opportunities and current techniques towards its extraction and purification for edibles. *Food Bioscience*, 49, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101835>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., & Figiel, A. (2016). Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. *LWT*, 78, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.008>

- Mildner-Szkudlarz, S., Bajerska, J., Górnaś, P., Segliņa, D., Pilarska, A., & Jesionowski, T. (2016). Physical and bioactive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: a promising application of fruit by-products rich in biocompounds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(2), 165–173. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0539-4>
- Pieszka, M., Gogol, P., Pietras, M., & Pieszka, M. (2014). Valuable components of dried pomaces of chokeberry, black currant, strawberry, apple and carrot as a source of natural antioxidants and nutraceuticals in the animal diet. *Annals of Animal Science*, 15(2), 475–491. <https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
- Ritika, N., Rizwana, N., Shukla, S., Sondhi, A., Tripathi, A. D., Lee, J., Patel, S. K., & Agarwal, A. (2023). Valorisation of fruit waste for harnessing the bioactive compounds and its therapeutic application. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104302>
- Rubinskiene, M., Viskelis, P., Jasutiene, I., Viskeliene, R., & Bobinas, C. (2005). Impact of various factors on the composition and stability of black currant anthocyanins. *Food Research International*, 38(8–9), 867–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.027>
- Sha, S. P., Modak, D., Sarkar, S., Roy, S. K., Sah, S. P., Ghatani, K., & Bhattacharjee, S. (2023). Fruit waste: a current perspective for the sustainable production of pharmacological, nutraceutical, and bioactive resources. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1260071. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260071>
- Sójka, M., & Król, B. (2009). Composition of industrial seedless black currant pomace. *European Food Research and Technology*, 228(4), 597–605. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0968-x>
- Szajdek, A., & Borowska, E. J. (2008). Bioactive compounds and health-promoting properties of berry fruits: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63(4), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0097-5>
- Szymanowska, U., Karaś, M., & Bochnak-Niedźwiecka, J. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory potential and consumer acceptance of wafers enriched with freeze-dried raspberry pomace. *Applied Sciences*, 11(15), 6807. <https://doi.org/10.3390/app11156807>
- Tama, A., & Karaś, M. (2025). The Health-Promoting Potential of Fruit Pomace and its application in the confectionery industry. *Applied Sciences*, 15(10), 5790. <https://doi.org/10.3390/app15105790>
- Untea, A. E., Oancea, A., Vlaicu, P. A., Varzaru, I., & Saracila, M. (2024). Blackcurrant (fruits, pomace, and leaves) phenolic characterization before and after in vitro digestion, free radical scavenger capacity, and antioxidant effects on iron-mediated lipid peroxidation. *Foods*, 13(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/foods13101514>
- Vagiri, M., Johansson, E., & Rumpunen, K. (2012). Health promoting compounds in black currants – The start of A study concerning ontogenetic and genetic effects. *Acta Horticulturae*, 946, 427–431. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.946.71>
- Vetrova, O. N., Eremina, O. Y., Seregina, N. V., & Shuldeshova, N. V. (2021). Accumulation of dry substances in hydrolysate during the processing of barley malt sprouts with a celluloid enzyme complex. *BIO Web of Conferences*, 32, 03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213203005>

REFERENCES

- Akulich, A. V., & Gostinshchikova, L. A. (2017). *Method for drying berries and device for its implementation* (Belarus Patent No. BY 20746). National Center of Intellectual Property. (In Russ.).
- Alekseenko E.V., Bakumenko O.E., Azarova M.M., Isabayev I.B., Kurbanov M.T. (2019). The influence of pre-processing of berries cranberries on the extraction of anthocyanin pigments, the yield of juice and its antioxidant activity. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 10–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>
- Anokhin, Yu. V., Eremina, O. Yu., Levgerova, N. S., Salina, E. S., & Sidorova, I. A. (2025). Optimization of sea buckthorn pomace drying using the response surface method. *Technology and Commodity*

- Science of Innovative Food Products*, 5, 31–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2025-94-5-31-39>
- Vasilenko, Z. V., & Mogilevchik, N. A. (2016). Mineral and vitamin composition of berry pomace. *Bulletin of Mogilev State University of Food Science*, 20(1), 20–23. (In Russ.).
- Vasilenko, Z. V., Omarova, E., & Mogilevchik, N. A. (2020). Study of the influence of technological factors on the extraction of phenolic compounds from berry pomace. *Consumer Cooperatives*, 1, 42–46. (In Russ.).
- Galiakberova, N. Z., Nikolaev, N. A., & Galiakberov, Z. K. (1996). *Method for Obtaining Powders from Plant Raw Materials* (Patent № 2064477). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). (In Russ.).
- Gromova, I. A., Voronina, M. S., & Makarova, N. V. (2021). Investigation of chemical characteristics in waste of juice production of blueberries and black currants. *Chemistry of Plant Raw Material*, 1, 251–257. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021017020>
- Derkanosova, N. M., Gins, V. K., Lupanova, O. A., & Andropova, I. I. (2015). Development of methods for obtaining and using natural food coloring. *Food Production Engineering and Technology*, 1(36), 18–23. (In Russ.).
- Eremina, O. Yu., & Anokhin, Yu. V. (2024). Selecting optimal drying parameters for blackcurrant pomace to reduce acidity and maximize the content of biologically active substances. *Consumer Market: Quality and Safety Issues for Goods and Services* (pp. 156–162). Orel: Orel State University named after I.S. Turgenev. (In Russ.).
- Eremina, O.Yu., & Anokhin, Yu.V. (2025). Biologically active substances investigation and functional properties of dried pomace from black currants and sea buckthorn evaluation. *Индустрия питания*, 10(4), 79–89. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-4-8>
- Ermolaev, V. A., Fedorov, D. E., Sosnina, O. B., & Lifentseva, L. V. (2015). *Method for Vacuum Drying of Fruits and Berries* (Patent № 2541395). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent).
- Kolman, O. Ya., Ivanova, G. V., & Nikulina, E. O. (2015). *Method for Obtaining Powders from Dried Lingonberry and Cranberry Pomace* (Patent № 2555592). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). (In Russ.).
- Makarov, S., Makarov, S., & Panasyuk, A. (2018). Influence of various technological factors on the composition of anthocyanins in black currant wine production. *Food Processing Techniques and Technology*, 48(3), 72–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-72-80>
- Tsyganov, M., & Nikitina, E. (2024). Starch enzyme modification optimization for the texture correction of a Low-Fat fermented milk product. *Food Industry*, 9(1), 60–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-7>
- Asif, A., Farooq, U., Akram, K., Hayat, Z., Shafi, A., Sarfraz, F., Sidhu, M. a. I., Rehman, H., & Aftab, S. (2016). Therapeutic potentials of bioactive compounds from mango fruit wastes. *Trends in Food Science & Technology*, 53, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.004>
- Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., & Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530>
- Blicharz-Kania, A., Pecyna, A., Zdybel, B., & Andrejko, D. (2025). Physicochemical, functional and nutritional characteristics of various types of fruit Pomace. *Processes*, 13(10), 3182. <https://doi.org/10.3390/pr13103182>
- Coman, V., Teleky, B., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Călinoiu, L., & Vodnar, D. C. (2019). Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 91, 157–225. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.07.001>
- Ciurlă, L., Enache, I., Buțerchi, I., Mihalache, G., Lipșa, F. D., & Patraș, A. (2024). A New Approach to Recover Bioactive Compounds from Apple Pomace: Healthy Jelly Candies. *Foods*, 14(1), 39. <https://doi.org/10.3390/foods14010039>
- Eremina, O. Y., Berezina, N. A., Vetrova, O. N., Seregina, N. V., & Gutsyna, A. A. (2021). Optimization of enzymatic hydrolysis of malt barley sprouts. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 640(2), 022043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022043>
- Hussain, S., Sharma, M., & Bhat, R. (2021). Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of Ultrasonic-Assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/foods10061330>

- Ibrahim, U. K., Kamarrudin, N., Suzihaque, M. U. H., & Hashib, S. A. (2017). Local fruit wastes as a potential source of natural antioxidant: An overview. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 206, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/206/1/012040>
- Kumar T., A. K., Pareek, S., Kaur, R., Sagar, N. A., Singh, L., Sami, R., Aljuraide, N. I., Elhakem, A., Alsharari, Z. D., Alruwais, R. S., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022). Optimization of Ultrasonic-Assisted enzymatic extraction of freeze-dried sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Berry Oil Using Response Surface Methodology. *Sustainability*, 14(17), 10849. <https://doi.org/10.3390/su141710849>
- Lustenberger, S., Boczkaj, G., & Castro-Muñoz, R. (2022). Cannabinoids: Challenges, opportunities and current techniques towards its extraction and purification for edibles. *Food Bioscience*, 49, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101835>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., & Figiel, A. (2016). Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. *LWT*, 78, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.008>
- Mildner-Szkudlarz, S., Bajerska, J., Górnaś, P., Segliņa, D., Pilarska, A., & Jesionowski, T. (2016). Physical and bioactive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: a promising application of fruit by-products rich in biocompounds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(2), 165–173. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0539-4>
- Pieszka, M., Gogol, P., Pietras, M., & Pieszka, M. (2014). Valuable components of dried pomaces of chokeberry, black currant, strawberry, apple and carrot as a source of natural antioxidants and nutraceuticals in the animal diet. *Annals of Animal Science*, 15(2), 475–491. <https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
- Ritika, N., Rizwana, N., Shukla, S., Sondhi, A., Tripathi, A. D., Lee, J., Patel, S. K., & Agarwal, A. (2023). Valorisation of fruit waste for harnessing the bioactive compounds and its therapeutic application. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104302>
- Rubinskiene, M., Viskelis, P., Jasutiene, I., Viskeliene, R., & Bobinas, C. (2005). Impact of various factors on the composition and stability of black currant anthocyanins. *Food Research International*, 38(8–9), 867–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.027>
- Sha, S. P., Modak, D., Sarkar, S., Roy, S. K., Sah, S. P., Ghatani, K., & Bhattacharjee, S. (2023). Fruit waste: a current perspective for the sustainable production of pharmacological, nutraceutical, and bioactive resources. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1260071. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260071>
- Sójka, M., & Król, B. (2009). Composition of industrial seedless black currant pomace. *European Food Research and Technology*, 228(4), 597–605. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0968-x>
- Szajdek, A., & Borowska, E. J. (2008). Bioactive compounds and health-promoting properties of berry fruits: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63(4), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0097-5>
- Szymanowska, U., Karaś, M., & Bochnak-Niedźwiecka, J. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory potential and consumer acceptance of wafers enriched with freeze-dried raspberry pomace. *Applied Sciences*, 11(15), 6807. <https://doi.org/10.3390/app11156807>
- Tama, A., & Karaś, M. (2025). The health-promoting potential of fruit pomace and its application in the confectionery industry. *Applied Sciences*, 15(10), 5790. <https://doi.org/10.3390/app15105790>
- Untea, A. E., Oancea, A., Vlaicu, P. A., Varzaru, I., & Saracila, M. (2024). Blackcurrant (fruits, pomace, and leaves) phenolic characterization before and after in vitro digestion, free radical scavenger capacity, and antioxidant effects on iron-mediated lipid peroxidation. *Foods*, 13(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/foods13101514>
- Vagiri, M., Johansson, E., & Rumpunen, K. (2012). Health promoting compounds in black currants — The start of a study concerning ontogenetic and genetic effects. *Acta Horticulturae*, 946, 427–431. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.946.71>
- Vetrova, O. N., Eremina, O. Y., Seregina, N. V., & Shuldeshova, N. V. (2021). Accumulation of dry substances in hydrolysate during the processing of barley malt sprouts with a celluloid enzyme complex. *BIO Web of Conferences*, 32, 03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213203005>

ОБ АВТОРАХ

Юрий Владимирович Анохин, аспирант кафедры товароведения и таможенного дела Орловского государственного университета имени И.С.Тургенева (302026, Российская Федерация, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8146-8592>, yura.anohin69@gmail.com.

Ольга Юрьевна Еремина, доцент, заведующая кафедрой товароведения и таможенного дела Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (302026, Российская Федерация, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-2829>, Scopus ID: 57195987484, SPIN-код: 3852-1552, o140170@rambler.ru.

Елена Сергеевна Салина, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1276-5153>, Scopus ID: 57226609973, Researcher ID: K-6015-2018, SPIN-код: 5518-7428, salina@orel.vniispk.ru.

Надежда Станиславовна Левгерова, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9273-5658>, Scopus ID: 57226613104, Researcher ID: K-6036-2018, SPIN-код: 9062-6576, levgerova@orel.vniispk.ru.

Ирина Анатольевна Сидорова, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7599-487X>, Researcher ID: K-6133-2018, SPIN-код: 3506-3203, sidorova@orel.vniispk.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Yuri Vladimirovich Anokhin, Postgraduate student of the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomol'skaya St., Orel, Orel Region, 302026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8146-8592>, yura.anohin69@gmail.com.

Olga Yurievna Eremina, Associate Professor, Head of the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomol'skaya St., Orel, Orel Region, 302026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-2829>, Scopus ID: 57195987484, SPIN-код: 3852-1552, o140170@rambler.ru.

Elena Sergeevna Salina, Leading Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1276-5153>, Scopus ID: 57226609973, Researcher ID: K-6015-2018, SPIN-код: 5518-7428, salina@orel.vniispk.ru.

Nadezhda Stanislavovna Levgerova, Chief Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9273-5658>, Scopus ID: 57226613104, Researcher ID: K-6036-2018, SPIN-код: 9062-6576, levgerova@orel.vniispk.ru.

Irina Anatol'evna Sidorova, Senior Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7599-487X>, Researcher ID: K-6133-2018, SPIN-код: 3506-3203, sidorova@orel.vniispk.ru.