

ISSN 2072-9669
eISSN 2658-767X

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

ХиПС

33(1) | 2025

Storage and Processing
of Farm Products

SPFP



ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬХОЗСЫРЬЯ

Том 33, № 1 | 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.ruСайт учредителя: <https://www.mgupp.ru>Сайт журнала: <https://www.spfp-mgupp.ru>

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 27.12.2024. Свободная цена.

© Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), 2025

STORAGE AND PROCESSING OF FARM PRODUCTS

Vol. 33, No. 1 | 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.ruFounder website: <https://www.mgupp.ru>Journal website: <https://www.spfp-mgupp.ru>

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 27.12.2024. Free price.

© Russian Biotechnological University (BIOTECH University), 2024

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 пищевых концентратной 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. Aksonova	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
Eugeniy 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

Графические аннотации в научной публикации: теория и практика эффективного использования 8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Т. В. Яковлева, Ю. Н. Чернявская, Д. В. Котвицкая

Современные цифровые подходы в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья: обзор предметного поля 27

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ

К. Н. Нициевская, С. В. Станкевич, Е. В. Бородай

Влияние параметров экстрагирования на характеристики экстрактов из вегетативных частей и плодов *Sorbus aucuparia* 49

Е. Ю. Агаркова, В. В. Кондратенко, А. Е. Рябова, А. Н. Яшин, Д.Н. Глазунова

Особенности формирования потребительских свойств поликомпонентных молочных систем 68

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И ПРОДУКЦИИ АПК

Д.В. Зипаев, А.Н. Макушин, Т.А. Горянина, А.Н. Кожухов

Органолептические и физико-химические показатели качества пива с использованием солода и зерна озимой тритикале 82

Т. А. Игнатова, Т. М. Байгильдиев, М. О. Березина, Ю. А. Баскакова, Л. К. Плакун

Оценка возможности использования сверхкритической углекислотной экстракции при комплексной переработке морских водорослей 95

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Ю. Р. Серазетдинова, Н. Н. Богачёва, К. В. Карчин, О. А. Исачкова, О. А. Неверова, Л. К. Асякина

Перспективы совместного применения *Pseudomonas koreensis* и *Pseudomonas plecoglossicida* для биологического обогащения растений азотом 116

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Х.А. Мунассар, И.А. Шорсткий, А.Г. Шерстюков

Исследование сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока на пилотной установке непрерывного действия 130

СЫРЬЕ И ДОБАВКИ

В. В. Ядерец, Н. В. Карпова, Е. В. Глаголева, В. В. Джавахия

Пробиотическая кормовая добавка с микробным бета-каротином: разработка и свойства. 141

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ АПК

Д. Д. Вилкова, М. А. Белова, М. Н. Кутузов, О. В. Новиченко, К. В. Штер, И. А. Никитин

Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели 161

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И НОВЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ

А.В. Югай, Т.Н. Слуцкая, Г.Н. Тимчишина, Т.Н. Данильчук

Получение пищевых композиций на основе мышечной ткани шлемоносных бычков рода *Gymnocanthus* . . . 172

CONTENT

EDITORIAL

Elena V. Tikhonova

Graphical Abstracts in Scientific Publishing: Theory and Practice of Effective Use 9

THEORETICAL ASPECTS OF FARM PRODUCTS STORAGE AND PROCESSING

**Tatyana V. Pershakova, Grigory A. Kupin, Tatyana V. Yakovleva, Julia N. Chernyavskaya,
Daria V. Kotvitskaya**

The Development of Digital Methods in the Technologies of Storage and Processing
of Agricultural Raw Materials: A Scoping Review 28

PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF FARM RAW MATERIAL PROCESSING

Kseniya N. Nitsievskaya, Svetlana V. Stankevich, Elena V. Boroday

The Effect of Extraction Parameters on the Characteristics of Extracts from Vegetative Parts and Fruits
of *Sórbus Aucupária* 50

**Evgeniya Yu. Agarkova, Vladimir V. Kondratenko, Anastasia E. Ryabova, Alexey N. Yashin,
Dariya N. Glazunova**

Features of the Formation of Consistency of Multicomponent Dairy Systems 69

RESEARCH ON TRAITS OF SUBSTANCES AND AGRIBUSINESS PRODUCTS

Dmitry V. Zipaev, Andrey N. Makushin, Tatyana A. Goryanina, Alexander N. Kozhukhov

Organoleptic and physicochemical quality indicators of beer using winter triticale malt and grain 83

Tatiana A. Ignatova, Timur M. Baygildiev, Marina O. Berezina, Yulia A. Baskakova, Larisa K. Plakun

Possibility Evaluation of Using Supercritical Carbon Dioxide Extraction in Complex Processing of Algae 96

BIOTECHNOLOGICAL AND MICROBIOLOGICAL ASPECTS

**Yuliya R. Serazetdinova, Natalia N. Bogacheva, Konstantin V. Karchin, Olga A. Isachkova,
Olga Al. Neverova, Lyudmila K. Asyakina**

Prospects for the combined use of *Pseudomonas koreensis* and *Pseudomonas plecoglossicida*
for biological enrichment of plants with nitrogen 117

TECHNOLOGICAL PROCESSES, MACHINES AND EQUIPMENT

Emad Munassar, Ivan Shorstkii, Andrey Sherstyukov

Electrohydrodynamic Grains Drying on Pilot Equipment with Continuous Flow 131

RAW MATERIALS AND ADDITIVES

Vera V. Yaderets, Natalia V. Karpova, Elena V. Glagoleva, Vakhtang V. Dzhavakhiya

Probiotic Feed Additive with Microbial Beta-Carotene: Development and Properties 142

CONTROL OVER QUALITY AND SAFETY OF AGRIBUSINESS PRODUCTS

**Daria D. Vilkoval, Maria A. Belova, Mikhail N. Kutuzov, Olga V. Novichenko, Konstantin V. Shter,
Igor A. Nikitin**

The Potential of Raman Spectroscopy as a Rapid Method for Monitoring Shelf Life and Freshness
of Refrigerated Rainbow Trout Fillet 162

USING SECONDARY RESOURCES AND NEW TYPES OF RAW MATERIALS

Alevtina V. Yugay, Tatyana N. Slutskaya, Galina N. Timchishina, Tatiana N. Danilchuk

Obtaining of Food Compositions Based on Muscle Tissue of Sculpin of the Genus *Gymnocanthus* 173

Графические аннотации в научной публикации: теория и практика эффективного использования

МГИМО Университет,
г. Москва, Российская Федерация

Е. В. Тихонова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Тихонова, Е.В. (2025). Графические аннотации в научной публикации: теория и практика эффективного использования. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 8-26.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.639>

ПОСТУПИЛА: 10.01.2025

ДОРАБОТАНА: 10.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

АННОТАЦИЯ

В условиях стремительного роста объема научной информации графические аннотации (ГА) приобретают всё большее значение как инструмент краткой и наглядной презентации ключевых результатов исследования. В статье представлен анализ теоретических и практических аспектов подготовки графической аннотации. Особое внимание уделено современным требованиям к визуальному оформлению, типологии графических аннотаций, этапам создания графической аннотации. Прокомментированы как эмпирические данные об эффективности графических аннотаций (включая влияние на цитируемость и альтметрики), так и перспективы их развития (мультимедийные форматы, автоматизация с использованием инструментов искусственного интеллекта и институционализация стандартов).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

графическая аннотация; визуализация данных; научная коммуникация; визуальное резюме; научная публикация; цитируемость; искусственный интеллект; редакционная практика



Graphical Abstracts in Scientific Publishing: Theory and Practice of Effective Use

MGIMO University,
Moscow, Russian Federation

Elena V. Tikhonova

CORRESPONDENCE:

Elena V. Tikhonova

E-mail: etikhonova@gmail.com

FOR CITATIONS:

Tikhonova, E.V. (2025). Graphical abstracts in scientific publishing: Theory and practice of effective use. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 8-26. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.639>

RECEIVED: 10.01.2025

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

ABSTRACT

In the context of the rapid growth of scientific information, graphical abstracts (GAs) have become an increasingly important tool for the concise and visually structured communication of key research findings. This article offers a comprehensive analysis of both the theoretical foundations and practical considerations involved in the development of graphical abstracts. Particular attention is devoted to current standards of visual design, the typology of GAs, and the sequential stages of their creation. The discussion also addresses empirical evidence on the effectiveness of graphical abstracts, including their impact on citation rates and altmetric indicators, as well as future prospects for their advancement (the integration of multimedia formats, automation through artificial intelligence tools, and the institutionalization of standard design practices).

KEYWORDS

graphical abstract; data visualization; scholarly communication; visual summary; scientific publishing; citation impact; artificial intelligence; editorial practice



ВВЕДЕНИЕ

Стремительный рост числа научных публикаций поставил перед научным сообществом новые вызовы в области эффективного представления и распространения результатов исследований. Современная научная коммуникация требует не только глубокого и детального описания исследований, но и ясных, доступных форматов представления результатов, способных привлечь внимание широкой аудитории и прозрачно донести основные выводы исследования (Midway, 2020). Одним из таких решений стали графические аннотации (ГА), которые представляют собой визуальные резюме ключевых результатов и выводов научных публикаций (Ibrahim et al., 2017; Lee & Yoo, 2023).

Графические аннотации активно внедряются в издательские практики в различных областях знания, особенно в медицине и биологии, где наглядность представления данных имеет определяющее значение. Исследования показывают, что статьи, дополненные графическими аннотациями, привлекают значительно больше внимания читателей, что ведет к повышению числа просмотров и увеличению числа цитирований по сравнению с традиционными текстовыми аннотациями (Kim et al., 2022; Franconeri et al., 2021), что объясняется следующими факторами:

(1) Визуальная информация обрабатывается быстрее и лучше запоминается: мозг человека обладает высокой скоростью обработки визуальной информации, превосходящей темпы восприятия текстовых данных (Standing, 1973). Согласно результатам нейрокогнитивных исследований, визуальные образы могут быть распознаны в течение 100–150 миллисекунд после предъявления, что свидетельствует о высокой эффективности зрительных процессов (Potter et al., 2014). Этот феномен обусловлен тем, что приблизительно 90% сенсорной информации, поступающей в мозг, имеет визуальную природу, а сама система зрительного восприятия представляет собой результат длительной эволюционной адаптации к внешней среде.

(2) Графические аннотации упрощают восприятие сложной информации: графические аннотации играют ключевую роль в упрощении сложных концепций, обеспечивая более эффективное

восприятие и понимание информации на 15–20% (Hullman & Diakopoulos, 2017). Этот эффект объясняется когнитивными механизмами, которые лежат в основе обработки информации человеком, а также принципами мультимедийного обучения. Согласно теории когнитивной нагрузки (Sweller, 1988), человеческий мозг имеет ограниченные ресурсы рабочей памяти, и избыточная сложность информации может привести к перегрузке. Графические аннотации помогают снизить когнитивную нагрузку, представляя сложные данные в визуальном структурированном формате, что позволяет аудитории быстрее и эффективнее усваивать информацию.

Принцип мультимедийного обучения, предложенный Mayer (2009), также подчеркивает, что сочетание текста и визуальных элементов способствует более глубокому пониманию. В частности, графические аннотации позволяют представить абстрактные или сложные концепции в наглядной форме, что особенно важно для объяснения научных, технических или статистических данных. Например, в исследовании Lee et al. (2018), было установлено, что научные статьи, дополненные инфографикой или диаграммами, получают на 30% больше просмотров и цитирований по сравнению с публикациями, содержащими только текст или таблицы. Эта особенность объясняется тем, что визуальные элементы позволяют читателям быстро уловить ключевые закономерности и взаимосвязи, минимизируя необходимость глубокого анализа больших объемов текстовой информации.

Кроме того, графические аннотации способствуют улучшению запоминания информации за счет эффекта двойного кодирования: информация, представленная одновременно в вербальной (текст) и визуальной (графика) формах, кодируется в памяти через два канала, что усиливает вероятность ее сохранения и последующего воспроизведения (Evagorou et al., 2015). Графические аннотации помогают разбивать большие объемы текста на тематические блоки и делают информацию более доступной.

(3) Графическая аннотация порождает эмоциональное восприятие: визуальные элементы увеличивают внимание к материалу на 80% по сравнению с текстом¹. Цвета, контраст стимулируют зрительное восприятие, усиливая функциональность контента, в том числе и благодаря вызывае-

¹ 3M Corporation. (1986). Visual Attention Study: The impact of visuals on attention and retention. 3M Corporation.

тому эмоциональному отклику. Например, согласно исследованию Nielsen Norman Group (2020), изображения, связанные с эмоциями (например, лица людей, яркие цвета), увеличивают вовлеченность потребителей информации². Эмоциональная реакция побуждает читателя делиться статьей, ее обусловившей, с другими потенциальными читателями.

(4) Увеличение времени взаимодействия с контентом: графические элементы способствуют увеличению времени взаимодействия читательской аудитории с контентом, что обусловлено их способностью поддерживать интерес к информации и снижать когнитивную нагрузку. С точки зрения когнитивной психологии, визуальные элементы разбивают текст на более управляемые сегменты, предотвращая перегрузку рабочей памяти (Sweller, 1988), что позволяет читателям дольше оставаться вовлеченными в процесс восприятия информации. Кроме того, исследование Poynter Institute (2019)³ с использованием технологии отслеживания взгляда выявило, что читатели чаще задерживаются на статьях с визуальными элементами, такими как аннотации или подписи к изображениям, поскольку они создают «точки остановки», стимулирующие дальнейшее изучение контента.

(5) Доступность международной аудитории: в отличие от традиционных текстовых аннотаций, которые требуют глубокого знания языка публикации, графические аннотации используют универсальный визуальный язык (диаграммы, схемы, иллюстрации), который легче интерпретировать без необходимости досконального перевода сложных терминов или конструкций. Визуальные аннотации снижают зависимость от языковых навыков, позволяя исследователям быстрее уловить суть работы и оценить ее релевантность для собственных исследований. Этот эффект усиливается в междисциплинарных областях, где терминология может варьироваться между языками и культурами, а визуальные подсказки помогают унифицировать восприятие (Fay et al., 2024).

(6) Социальные медиа и вирусный эффект: в эпоху социальных сетей визуальный контент

имеет больше шансов быть замеченным и распространенным (de Winter, 2014; Ibrahim et al., 2017; Vaghjiani et al., 2021). Li & Xie (2019) исследовали, как различные характеристики изображений, такие как цветовая сложность и композиция, влияют на количество «лайков» и комментариев к постам. Результаты показали, что посты с изображениями, обладающими высокой цветовой сложностью, привлекают больше внимания и обеспечивают более высокий уровень вовлеченности пользователей по сравнению с постами с менее сложными изображениями или без них.

Этот эффект можно экстраполировать на сферу научных публикаций: наличие графической аннотации повышает вероятность того, что статья будет замечена в социальных сетях, сохранена, переслана или процитирована. Таким образом, графическая аннотация становится не только средством визуализации, но и важным фактором цифрового продвижения научной статьи. Причем значение имеет не только сам факт наличия графической аннотации: визуальное качество аннотации (включая подбор цветовой палитры, симметрию и композиционную четкость) играет решающую роль в том, насколько активно статья будет восприниматься и распространяться в научной и цифровой среде (Bresciani & Eppler, 2015; Pauwels, 2006).

(7) Культурные и психологические факторы: с культурной точки зрения визуальные форматы все чаще воспринимаются как предпочтительные формы коммуникации в цифровую эпоху. Современные цифровые платформы формируют ожидания пользователей относительно краткости и визуального оформления информации. По данным Lee и Yoo (2023), визуально ориентированные интерфейсы социальных медиа радикально изменили модели потребления цифрового контента и стандарты восприятия его релевантности. Эти изменения создают культурный контекст, в котором визуальное отсутствие воспринимается как недостаток актуальности или профессионализма.

С психологической точки зрения графические аннотации позволяют уменьшить когнитивную

² Nielsen Norman Group. (2020). The power of emotional design to increase user engagement. <https://www.nngroup.com/articles/emotional-design-user-engagement/>

³ Quinn, S.D. (2012). New Poynter Eyetrack research reveals how people read news on tablets. https://www.poynter.org/reporting-editing/2012/new-poynter-eyetrack-research-reveals-how-people-read-news-on-tablets/?utm_source=chatgpt.com

нагрузку и выделить ключевую информацию в условиях информационного шума. Исследование Bresciani & Eppler (2015) показало, что визуализация информации (включая цветовую кодировку, пространственную организацию и символические элементы) значительно сокращает когнитивное время обработки и усиливает способность к структурированному восприятию сложной информации. Это означает, что графические аннотации, оформленные в соответствии с принципами когнитивной визуализации, способны не только привлечь внимание, но и облегчить восприятие содержания статьи, особенно в условиях информационной перегрузки. Это согласуется с классической моделью обработки информации Atkinson & Shiffrin (1968), согласно которой визуальные коды обладают высокой эффективностью при кратковременном восприятии. Кроме того, исследования подтверждают предпочтение визуальных элементов в структуре восприятия веб-страниц. Nielsen Norman Group продемонстрировали, что пользователи чаще сканируют страницы по F-образному паттерну, уделяя первичное внимание визуальным и заголовочным элементам⁴. Это подтверждает, что графические аннотации соответствуют естественным паттернам восприятия и удовлетворяют потребность в быстром извлечении релевантной информации.

Графические аннотации усиливают не только цифровую видимость публикаций, но и их когнитивную доступность и культурную релевантность в условиях цифровой экосистемы, особенно в социальных сетях. Визуальные элементы обладают высокой вирусностью: они легче воспринимаются и чаще распространяются пользователями, поскольку более запоминающиеся изображения получают больше комментариев и более высокие оценки, что подтверждает их большую привлекательность для пользователей (Peng & Bainbridge, 2024). Несмотря на очевидные преимущества от внедрения графических аннотаций в текст научной статьи, процесс создания эффективных графических аннотаций требует специальных знаний и умений в области визуальной коммуникации, которых часто не хватает исследователям. Отсутствие единых стандартов и четких рекомендаций усложняет эту задачу, что приводит к неоднородности качества графических аннотаций. В связи с этим необходи-

мы четко структурированные рекомендации, опирающиеся на существующие научные исследования и успешные примеры их реализации.

Цель данной редакционной статьи заключается в том, чтобы подробно проанализировать теоретические и практические аспекты создания графических аннотаций, опираясь на современные научные исследования и примеры из реальных публикаций.

Типология графических аннотаций

Создание эффективной графической аннотации невозможно без понимания теоретических оснований визуальной репрезентации научного знания. Исследования в области визуализации (Lengler & Eppler, 2007; Eppler & Burkhard, 2007; Yoon & Chung, 2017) подчеркивают, что форма графического выражения тесно связана с типом представляемой информации, когнитивными задачами пользователя и контекстом использования. Ниже представлены основные типологические подходы, которые могут быть применимы при проектировании графических аннотаций.

Классификация по типу визуального представления

Согласно «Периодической таблице методов визуализации» Lengler & Eppler (2007), все визуализации можно условно разделить на шесть категорий:

- (1) **Визуализация данных (data visualization):** графики, диаграммы и другие формы визуализации, ориентированные на количественные показатели. Эти формы позволяют ясно представить зависимости, тренды и сравнения, и чаще всего применяются для иллюстрации результатов исследования.
- (2) **Визуализация информации (information visualization):** методы представления объемных структурированных или полуструктурированных данных (иерархические схемы, графы и интерактивные панели). Их потенциал реализуется при необходимости продемонстрировать сложные взаимосвязи между переменными.
- (3) **Визуализация понятий (concept visualization):** схемы и ментальные карты, при-

⁴ Pernica, K. (2017). F-Shaped Pattern For Reading Web Content. Nielsen Norman Group. <https://www.nngroup.com/articles/f-shaped-pattern-reading-web-content/>

меняемые для объяснения абстрактных категорий, теоретических рамок и логики исследования.

- (4) **Метафорическая визуализация (metaphor visualization)**: использование образов и символов (например, ледяная гора, дорожная развилка) для передачи сложных идей в наглядной форме. Особенно полезна для гуманитарных и междисциплинарных исследований (Приложение 1).
- (5) **Визуализация стратегий (strategy visualization)**: отображение процессов, этапов или управленческих решений (диаграмма Ганта, дорожная карта, матрица выбора).
- (6) **Комбинированная визуализация (compound visualization)**: многокомпонентные изображения, включающие элементы разных типов, например, инфографику с сочетанием диаграмм, текста и иконографии. Такой формат особенно подходит для комплексных исследований и интеграции нескольких уровней анализа.

Erppler & Burkhard (2007) подчеркивают необходимость учитывать не только форму изображения, но и его когнитивную функцию. В этом контексте предложены три ключевых измерения для оценки и проектирования визуализаций:

- (1) Уровень детализации и взаимодействия с изображением:
 1. **Обзор** (общая структура без деталей, например, схема эксперимента или концептуальная карта).
 2. **Детализация и обзор** (изображения, позволяющие одновременно видеть макро- и микроуровень информации).
 3. **Детализация** (изображения с акцентом на конкретные данные, например, числовые графики или диаграммы рассеяния).
- (2) Тип когнитивного мышления:
 1. **Конвергентное мышление** (визуализация, направленная на анализ, выявление закономерностей, проверку гипотез).
 2. **Дивергентное мышление** (визуализация, стимулирующая генерацию идей, творческое осмысление проблемы).

(3) Характер информации:

1. **Структура** (изображения, фиксирующие иерархии, категории, связи между элементами).
2. **Процесс** (изображения, демонстрирующие последовательность действий, этапы исследования, динамику изменений).

Для графических аннотаций особенно важны визуализации, которые сочетают краткость, четкую структуру и соответствие типу представляемых данных. Например, если цель аннотации — показать влияние переменных на результат, то наиболее эффективной будет визуализация данных в виде графика. Если же необходимо отразить общий замысел исследования, предпочтительна концептуальная схема или метафорическая визуализация.

Дополнительно, Erppler & Burkhard (2007) выделяют категорию **визуализации знаний (knowledge visualization)**, отличающуюся от визуализации данных и информации тем, что она направлена на передачу не только фактов, но и **смыслов, выводов и инсайтов**. Среди форм визуализации знаний:

1. эвристические наброски (например, схемы от руки);
2. концептуальные диаграммы;
3. визуальные метафоры;
4. карты знаний (knowledge maps);
5. интерактивные анимации.

Наиболее распространенные формы графических аннотаций по состоянию на первую четверть XXI в.

Существует несколько распространенных форматов графических аннотаций, каждый из которых более или менее эффективен в зависимости от типа и целей исследования⁵ (Таблица 1).

⁵ Каждый из типов сопровождается ссылкой к реальному исследованию, в котором можно ознакомиться с конфигурацией этого типа графической аннотации.

Таблица 1

Типология графических аннотаций

Table 1

Typology of Graphic Annotations

Тип аннотации	Описание	Цель	Применение
Концептуальная схема	Визуализирует абстрактные идеи, теории или модели; подчёркивает взаимосвязи между понятиями	Объяснить концептуальные отношения, теоретические предположения, обосновать гипотезы или интерпретации сложных систем	Обзорные и теоретические статьи, метаанализы
Блок-схема / алгоритм	Пошаговое изображение методологии или процесса исследования; использует стандартные блоки и стрелки (где прямоугольники обозначают действие, ромбы – решение, а стрелки иллюстрируют поток)	Продемонстрировать логическую или методологическую последовательность в исследовании	Экспериментальные и клинические исследования
Инфографика / статистическая схема	Объединяет числовые данные и краткие пояснения; подходит для наглядного представления статистики и результатов	Передать основную количественную информацию в визуальной привлекательной и лаконичной форме	Эмпирические исследования, аналитические отчёты
Иконографическая аннотация	Минималистичное изображение с иконками, схемами и короткими подписями; использует визуальные символы вместо длинных текстовых описаний	Сделать аннотацию доступной широкой аудитории, включая неспециалистов	Научно-популярные статьи, публикации в открытом доступе
Фотоиллюстрация	Включает изображения, фотографии, микроснимки, карты или реалистичные иллюстрации, которые визуально документируют объект исследования	Представить визуальное доказательство, пространственные характеристики или морфологию объекта исследования	Медицина, биология, география, экология

Методология создания графических аннотаций

Общий принцип, которым необходимо руководствоваться в процессе создания графической аннотации состоит в том, что графическая аннотация — это не просто иллюстрация, а тщательно сконструированное визуальное резюме статьи, отражающее её основной вывод, методику и/или научный вклад. Она должна быть понятна без чтения всей статьи, но при этом мотивировать читателя обратиться к полному тексту. Применение типологий и таксономий визуализации позволяет авторам осознанно проектировать графические аннотации, которые одновременно будут эффективны как с визуальной, так и с когнитивной точки зрения.

Шаг 1. Определение основной цели аннотации

Первый и ключевой этап в создании графической аннотации — четко определить её основное коммуникативное назначение. Автору необходимо задать себе вопрос: *что именно должно быть визуализировано* (результаты исследования, методология, гипотеза, теоретическая модель, прикладной вывод или общий обзор работы). Цель определяет как структуру аннотации, так и выбор визуальных средств. Например, если акцент сделан на результатах, уместны графики или диаграммы; если задача — отразить ход эксперимента, потребуется последовательная схема или блок-схема. Чёткое понимание цели позволяет избежать перегрузки визуального поля и сосредоточиться на передаче наиболее значимой информации.

Шаг 2. Формулировка основного сообщения сквозь призму цели создания аннотации

На втором этапе автору следует сформулировать основное научное сообщение, которое будет положено в основу визуального представления. Это сообщение должно быть лаконичным, содержательно насыщенным и отражать центральную идею исследования, его научную новизну или прикладную значимость. Формулировка сообщения напрямую зависит от цели графической аннотации, определенной на предыдущем этапе, и задает фокус для всей композиции. Основное сообщение может быть выражено в нескольких формах:

- (1) Как ключевой результат исследования, подчеркивающий количественные или качественные достижения (например: «Предложенный метод X снижает экспериментальную погрешность на 30 % по сравнению с существующими решениями»);
- (2) Как практическое применение, демонстрирующее прикладной потенциал (например: «Разработанная система позволяет определять концентрацию токсинов в воде менее чем за 2 минуты»);
- (3) Как теоретическое обобщение, встраивающее результаты в более широкий научный контекст (например: «Предложенная модель описывает поведение клеток в условиях гипоксии, расширяя рамки существующих физиологических теорий»);
- (4) Как описание научной проблемы / подхода, если задача аннотации — прояснить исследовательскую конструкцию (например: «Изучается, как изменения pH влияют на морфологию биоразлагаемых наночастиц»).

Четкая формулировка основного сообщения позволяет не только сфокусировать содержание графической аннотации, но и обеспечить её когнитивную целостность, что особенно важно для восприятия сложной научной информации в сжатом визуальном формате.

Рекомендации при формулировке основного сообщения графической аннотации направлены на повышение ее когнитивной и коммуникативной эффективности:

- (1) Сообщение должно быть кратким и выразительным в одной фразе (не более 20 слов, чтобы его можно было использовать в качестве заголовка или пояснительного текста к изображению).

ловка или пояснительного текста к изображению).

- (2) Следует избегать описательной избыточности: задача графической аннотации — не дублировать текстовую аннотацию статьи, а выделить ключевой научный смысл.
- (3) Важно соблюдать жанровую точность и научную корректность формулировки: сообщение не должно превращаться в рекламный слоган, так как аннотация остается частью научной публикации.
- (4) Необходимо обеспечить соответствие между формулировкой сообщения и визуальной структурой аннотации: если в сообщении содержатся количественные показатели, предпочтительна графическая форма визуализации (диаграммы, графики); если акцент сделан на взаимосвязях — используются схемы со стрелками; если подчеркивается прикладной или метафорический смысл — уместно использовать визуальные метафоры. Такое согласование формулировки и визуального решения позволяет повысить целостность восприятия и облегчает читателю интерпретацию научной информации.

Шаг 3. Определение релевантного формата и композиции графической аннотации

Выбор формата графической аннотации (Таблица 1) необходимо реализовывать исходя из дизайна исследования (Таблицы 2, 3), природы данных и когнитивной задачи.

Таблица 2

Выбор формы графической аннотации в зависимости от типа исследования

Table 2

Choice of Graphic Annotation Form Depending on the Type of Study

Тип исследования	Рекомендуемый формат
Обзор / теоретическое исследование	Концептуальная схема
Эксперимент / клиническое исследование	Блок-схема, алгоритм
Статистический анализ	Инфографика, диаграммы
Научно-популярное исследование	Иконографическая аннотация
Пространственные / визуальные данные	Фотоиллюстрация

Таблица 3

Примеры согласования визуальной структуры и когнитивной нагрузки

Table 3

Examples of Alignment Between Visual Structure and Cognitive Load

Ситуация	Нагрузка	Рекомендации
ГА к статье с простой моделью	Низкая	Используйте упрощенную схему с 2–3 иконками и минимальным текстом
ГА к статье с множественными взаимосвязями	Средняя	Разделите блоки, примените стрелки и цветовое кодирование для навигации
ГА с метаанализом данных	Высокая	Включите условные обозначения, легенды, при необходимости – мини-графики
ГА по концептуальной рамке	Абстрактная нагрузка	Примените метафору, которая интуитивно объясняет структуру (например, дерево, цикл)

Шаг 4. Разработка логической структуры

После определения ключевого сообщения и выбора формата графической аннотации автору необходимо приступить к построению логической структуры будущей визуализации. Этот этап критически важен, поскольку именно здесь закладывается смысловая организация и направление чтения графики, от которой зависит понятность и эффективность восприятия аннотации целевой аудиторией. Необходимо согласовать структуру визуального блока с ожидаемой когнитивной нагрузкой (как визуальный материал будет восприниматься и обрабатываться читателем⁶ (Таблица 3).

Этот этап требует составления на бумаге или в редакторе (PowerPoint, Figma, BioRender и др.) схема-

тичной структуры будущей графической аннотации, что предполагает:

- (1) Определение количества логических блоков (обычно 3–4).
- (2) Выбор направление чтения: слева направо, сверху вниз, по кругу.
- (3) Размещения заголовка, ключевых цифр и иконок.

В первую очередь необходимо определить, сколько смысловых блоков будет содержать аннотация. Наиболее распространенным является трехэтапный формат: «вводные данные – методы – результаты» или «проблема – решение – вывод». Такой подход позволяет построить аннотацию по линейной логике, схожей со структурой абзаца в научной статье, где каждый визуальный блок соответствует одному семантическому компоненту текста. Этот формат рекомендуется для эмпирических и клинических исследований, где четко выделены этапы: входные параметры (пациенты, условия, гипотеза), вмешательство или методика, а затем ключевые результаты. Такую структуру, например, использует издательство Elsevier в большинстве своих журналов⁷.

Следующим шагом является определение направления движения взгляда пользователя. Наиболее распространенными паттернами являются «слева направо» (горизонтальное развертывание) и «сверху вниз» (вертикальная иерархия), однако в ряде случаев может быть применена кольцевая или спиральная структура, например, при отображении циклических процессов. Важно помнить, что визуальное направление должно соответствовать естественным паттернам чтения (особенно в культурах с латинским алфавитом) и не нарушать когнитивную интуицию пользователя. Исследование Nielsen Norman Group⁸ показало, что пользователи цифро-

⁶ Согласование структуры визуального блока с ожидаемой когнитивной нагрузкой предполагает, что визуальные элементы графической аннотации (ГА) должны быть организованы таким образом, чтобы облегчать, а не затруднять понимание научного содержания. Когнитивная нагрузка — это объём умственных усилий, который читателю необходимо затратить для восприятия и интерпретации визуальной информации. В соответствии с теориями когнитивной нагрузки и мультимодального обучения (Sweller, 1988; Mayer, 2005), перегруженные, хаотично организованные или визуально неинтуитивные аннотации могут вызывать так называемую внешнюю нагрузку, отвлекая внимание от сути исследования. Поэтому визуальный блок должен соответствовать как содержательной сложности материала, так и уровню абстракции: простые идеи лучше передавать с помощью минималистичных схем, в то время как многокомпонентные концепции требуют структурированной подачи с чёткими связями между элементами, цветовой кодировкой, легендами и визуальными акцентами.

⁷ Graphical abstracts. <https://www.elsevier.com/researcher/author/tools-and-resources/graphical-abstract>

⁸ Nielsen Norman Group. (2020). The power of emotional design to increase user engagement. <https://www.nngroup.com/articles/emotional-design-user-engagement/>

вых платформ склонны сканировать визуальный контент по F-образному шаблону: от заголовка к левому краю изображения, затем по горизонтальным сегментам вниз. Следовательно, ключевая информация должна размещаться либо в первом (верхнем левом) блоке, либо по центру, если композиция симметрична.

После выбора логики следует выполнить черновой набросок аннотации (скетч). На этом этапе размещаются условные элементы: иконки, стрелки, подписи, заголовки. Особое внимание следует уделить «точкам входа» (элементам, которые первыми привлекают взгляд (обычно это заголовок, центральная иллюстрация или крупная цифра)). Именно они запускают процесс визуального сканирования. На этом этапе можно также закладывать основу будущей иерархии информации: что должно быть видно сразу, а что — восприниматься после внимательного изучения.

Важно не стремиться к полному графическому совершенству (задача скетча заключается в проверке логики построения, симметрии, плотности визуальных блоков и логической связности между ними). Необходимо добиться баланса между плотностью информации и визуальной «свободой»: перегруженная аннотация приводит к отказу от чтения, в то время как недостаточно насыщенная может не донести суть исследования. На этом этапе целесообразно применять принцип «один блок — одна мысль» и использовать стрелки только при наличии причинно-следственной связи (Jambor и Bornhäuser, 2024).

Эффективными практиками являются предварительное тестирование макета на внешнем читателе, незнакомом с текстом рукописи (если после 5–10 секунд просмотра он может сформулировать «о чём статья», значит структура графической аннотации работает), и анализ успешных графических аннотаций в научных публикациях.

Этот шаг является критической точкой, на которой закладывается как визуальная логика, так и когнитивная доступность будущей графической аннотации. Чем точнее и яснее будет выполнен этот этап, тем выше вероятность того, что аннотация будет не только визуально привлекательной, но и эффективной с точки зрения научной коммуникации.

Шаг 5. Выбор и создание визуальных элементов: от структуры к выразительности

После того как логическая структура графической аннотации сформирована (шаг 3), следующим ключевым шагом становится визуальное наполнение каждого смыслового блока. Это критически важный этап: именно здесь происходит трансформация абстрактной исследовательской идеи в конкретный визуальный язык. На этом этапе создается язык аннотации: её выразительность, интуитивность и запоминаемость. Удачный визуальный стиль не отвлекает от сути исследования, а усиливает его восприятие, привлекает внимание и способствует распространению научной работы в цифровой среде. Каждый элемент должен быть функционально оправдан, минималистичен и эстетичен. Визуализация здесь не самоцель, а форма научной аргументации. Важно избегать избыточной детализации, особенно в тех случаях, когда аннотация должна обеспечить быстрое схватывание сути. Кроме того, необходимо обеспечить визуальную навигацию с помощью четких сигналов — таких как цвет, направление линий, пространственная группировка и иерархия элементов. Визуальные элементы трансформируются в язык, на котором аннотация «разговаривает» с читателем:

(1) Выбор графических компонентов: иконки, схемы, изображения.

Каждый логический блок аннотации нуждается в визуальной репрезентации. В зависимости от типа аннотации (Таблица 1) это могут быть:

1. Иконки — минималистичные символы, обозначающие абстрактные или конкретные объекты (клетка, мозг, компьютер, график, пипетка, пациент, молекула).
2. Символические иллюстрации — упрощенные схемы, изображающие метод, устройство, орган, экспериментальную установку.
3. Графики и диаграммы — упрощенные визуализации ключевых чисел (например, стрелка вверх с надписью «+65%»).
4. Фотографии или фотореалистичные элементы — это изображения, которые служат для наглядного представления объектов, особенно в аннотациях к медицинским, экологическим и биологическим исследованиям.

Например, в исследовании визуальная аннотация может включать карту региона с цветовой градацией по уровням риска COVID-19, визуально презентуя пространственные различия в эпидемиологической обстановке. Эта визуальная метафора передает географический акцент исследования без необходимости читать подписи.

(2) Цветовая палитра: как использовать цвет правильно.

Цвет — мощнейший инструмент управления вниманием, который кодирует смысл, направляет взгляд и может усиливать запоминание информации. При создании графической аннотации необходимо понимать, что «означает» тот или иной цвет для читателя. Цвет в графической аннотации необходимо применять стратегически:

- (1) Функциональный цвет: используется для обозначения категорий (например, красный = контрольная группа, синий = экспериментальная).
- (2) Акцентный цвет: выделяет ключевую информацию (например, зеленая стрелка вверх для улучшения показателя).
- (3) Фоновый нейтральный: позволяет избежать перегрузки (обычно серый, светло-голубой, бежевый). Важно избегать чрезмерной пестроты. Рекомендуется использовать не более трех основных цветов и 1–2 дополнительных акцентных. Например, если аннотация использует шесть разных цветов без функциональной необходимости, ее эффективность снижается (читателю сложно сконцентрироваться и оперативно понять суть), тогда как использование только двух функциональных цветов (синий и зеленый), каждый из которых связан с определенной функцией (данные и вывод) значительно оптимизирует восприятие информации.

(3) Шрифты и текст.

Хотя графическая аннотация — это в первую очередь визуальный формат, текст остается важным компонентом:

1. Лучше использовать рубленые (без засечек) шрифты: Arial, Helvetica, Calibri (читаются быстрее и удобнее на экране);
2. Размер шрифта должен быть достаточным для восприятия при уменьшении (не менее

16 pt для основного текста, 24–32 pt для заголовков);

3. Тексты внутри аннотации должны быть лаконичны: одна мысль — одно предложение (до 10 слов);
4. Используйте «действенные» глаголы: повышает, уменьшает, сравнивает, демонстрирует, обнаруживает.
5. Избегайте длинных пояснений — графическая аннотация не должна превращаться в реферат. Если элемент требует сложного объяснения, возможно, его вообще не стоит включать в аннотацию.

Например, в инфографике блоки с цифрами могут сопровождаться краткими глагольными подписями: «+78 % упоминаний», «↑ в 2,3 раза охват», «+56 % цитат». Такой текст оперативно сообщает результат и избавляет читателя от необходимости расшифровывать значение чисел.

(4) Инструменты для создания визуальных элементов.

Создать графическую аннотацию можно как с помощью универсальных редакторов, так и с использованием специализированных платформ:

1. PowerPoint / Google Slides — простой и доступный способ быстро собрать аннотацию с базовой графикой;
2. Canva — онлайн-сервис, подходит для создания шаблонов и фоновых структур;
3. BioRender — специализированный биомедицинский редактор с тысячами иконок и шаблонов;
4. Mind the Graph — платформа с готовыми шаблонами научных аннотаций, особенно популярна в естественных науках;
5. Inkscape / Adobe Illustrator — программы для продвинутых пользователей, обеспечивают контроль над каждым пикселем.

(5) Компонировка элементов.

На этом этапе необходимо акцентировать внимание на симметрии, пустом пространстве и направлении:

1. Симметрия упрощает восприятие и повышает визуальное доверие;

2. Белое пространство (white space) между блоками необходимо: плотная компоновка затрудняет восприятие;
3. Визуальный поток (flow) должен быть четким: необходимо определить, куда смотреть сначала, куда потом и что находится в центре.

Трехколоночная структура графической аннотации представляет собой один из наиболее эффективных форматов визуального представления, особенно в тех случаях, когда необходимо отразить три взаимосвязанных смысловых элемента — например, этапы исследования, сравниваемые условия или структурные компоненты модели. Такая аннотация обычно выстраивается по горизонтали и включает три равных по ширине блока, каждый из которых читается сверху вниз: в верхней части располагается краткий заголовок, в центре — основной визуальный элемент (иконка, диаграмма, изображение), в нижней части — подпись или числовой результат. Этот формат позволяет читателю быстро установить логические связи между частями исследования и визуально схватить суть представленного материала.

Эффективность трехколоночной аннотации во многом зависит от смысловой и графической согласованности между блоками. Заголовки всех трёх колонок должны быть краткими, грамматически однотипными (например, все в виде существительных: «Гипотеза», «Метод», «Результат»), а визуальные элементы — выдержанными в едином стиле, цветовой палитре и масштабе. Подписи к изображениям должны быть синтаксически и понятийно согласованы: либо все содержат числовые показатели (например, проценты, интервалы), либо краткие формулировки эффекта. Визуальный поток может быть усилен с помощью направляющих стрелок между блоками, особенно если аннотация иллюстрирует процесс, причинно-следственные связи или логику переходов между этапами исследования. При необходимости допускается варьирование цвета или насыщенности фона, чтобы акцентировать движение внимания от одного блока к другому, однако при этом важно соблюдать визуальное равновесие и не перегружать изображение.

Минимизация текста является одним из ключевых принципов данной структуры: вместо полных описательных предложений предпочтительно использовать короткие формулы, конкретные глаголь-

но-именные сочетания и числовые выражения. Например, вместо фразы «Результаты показали, что метод позволяет завершить реакцию за 2 минуты», более уместной будет формулировка «Реакция завершена за 2 мин». Наиболее типичными логическими структурами трёхколоночных аннотаций являются: «Гипотеза — Метод — Результат», «До — Воздействие — После», «Проблема — Решение — Эффект» или «Контроль — Эксперимент — Изменение». Выбор конкретной схемы зависит от научной задачи, жанра исследования и предполагаемой аудитории.

Шаг 5. Написание текста и заголовков для графической аннотации

На данном этапе создаются краткие и точные текстовые элементы, которые сопровождают визуальные блоки графической аннотации. Короткие надписи и заголовки направляют интерпретацию изображения, поясняют связи и делают аннотацию доступной даже при минимальных знаниях предметной области. Ошибки на этом этапе могут привести к недопониманию, снижению эффективности аннотации или даже к искажению смысла.

(1) Принципы текстовой лаконичности и функциональности.

Графическая аннотация — не реферат и не аннотация в классическом смысле. Она не должна дублировать или пересказывать текст статьи. Каждый текстовый элемент здесь служит визуальному повествованию и поддерживает восприятие. При этом важно придерживаться следующих принципов:

1. Минимум слов: чем короче, тем лучше. Оптимально — не более 8–10 слов в одном блоке.
2. Ясность и конкретность: избегайте научной терминологии, если она не критически важна для понимания.
3. Ориентация на действие: используйте глаголы, отражающие исследовательскую активность или результат.
4. Избегайте дублирования: не повторяйте заголовки статьи или её аннотации.

Например, вместо «Разработка нового метода анализа токсичности воды», лучше сформулировать: «Новый метод: анализ за 2 мин. с точностью 95 %».

(2) Типы текстовых блоков в аннотации.

В типичной графической аннотации представлены три типа текстов:

1. Основной заголовок аннотации: располагается сверху или в центре, отражает главную идею статьи, представляет собой краткий, выразительный, смысловой центр (до 12 слов), часто оформляется как утверждение или вопрос. Например, в статье Jambor & Bornhäuser (2024): «*Graphical abstracts increase clarity, memorability, and reach*»: точный, мотивирующий заголовок, который также выполняет функцию вывода.
2. Подписи к блокам (подзаголовки): описывают цели исследования, выборку, метод, результаты, вывод. Каждый блок должен быть семантически независимым, т. е. читаться самостоятельно. Можно использовать маркировку, например, цифры (① ② ③).
Пример.
① «Пациенты: 172 случая рака лёгкого»
② «Метод: AI-модель на основе рентгенограмм»
③ «Точность 94,2%; время анализа 6 сек.»
3. Краткие аннотационные элементы: встроены в визуальные компоненты (подписи к стрелкам, ключевые цифры, краткие пояснения). Шрифт должен быть крупным, читаемым (14–16 pt). Следует избегать сокращений и сносок.

(3) Тональность и стиль изложения.

Текст графической аннотации должен быть:

1. Нейтральным и научным, но не перегруженным академической лексикой.
2. Междисциплинарным, используйте такие формулировки, которые поймет специалист смежной области.
3. Человекоориентированным, особенно если статья предназначена для широкой аудитории (например, в медицине, экологии, образовательной психологии).

Недопустимы:

1. Сложные конструкции, двойные отрицания, пассивный залог (например, «не было обнаружено существенного различия...»).

2. Заголовки, полностью повторяющие заголовок статьи.
3. Использование «академических клише»: «проведен анализ...», «показана эффективность...».

(4) Итоговая проверка текста.

После того как все текстовые блоки написаны и встроены в макет аннотации, необходимо проверить:

1. Все ли подписи читаемы на экране (при уменьшении до 50%);
2. Нет ли орфографических ошибок;
3. Используются ли ключевые глаголы действия;
4. Есть ли согласование текста с визуальными элементами;
5. Не дублирует ли текст основную аннотацию статьи.

Шаг 6. Проверка соответствия аннотации редакционным и техническим требованиям

После того как графическая аннотация визуально и содержательно готова, необходимо удостовериться, что она соответствует техническим, редакционным и этическим требованиям научного журнала, в который подается статья. Этот этап нередко недооценивается авторами, но он является решающим для принятия аннотации к публикации. Неправильно оформленные или не соответствующие спецификациям графические аннотации могут быть отклонены или автоматически удалены из состава статьи.

(1) Определите, является ли графическая аннотация обязательной или рекомендованной:

1. Обязательное требование (mandatory): ГА требуется при каждой подаче (например, *Cell*, *JAMA*, *The Lancet Digital Health*).
2. Опциональное требование (recommended or optional): графическая аннотация поощряется, но не является обязательной (например, *PLOS ONE*, *BMJ Open*).
3. Тематическое требование: графическая аннотация требуется только для отдельных типов статей (обзоры, клинические случаи, методы и т. п.).

(2) Уточните формат, размер и требования к файлу.

Каждое издательство предъявляет собственные технические требования к графическим аннотациям. В Таблице 4 приведены наиболее распространенные.

Таблица 4

Требования к оформлению ГА

Table 4

Requirements for Designing Graphic Annotations

Параметр	Типичное значение
Формат файла	PNG, JPG, SVG, PDF (иногда TIFF)
Разрешение	Не менее 300 dpi
Цветовая модель	RGB (если для веб), CMYK (если для печати)
Размер (пиксели)	1200×800 px, 600×400 px или иное, согласно шаблону
Размер файла	Не более 10 MB (обычно)
Фоновый цвет	Белый или прозрачный

(3) Языковые и стилистические требования.

Журналы обычно предъявляют следующие требования:

1. Язык: графическая аннотация должна быть представлена на том же языке, что и статья.
2. Сокращения: использование сокращений не допускается.
3. Указание источников: необходимо указывать источники при использовании иконок, шаблонов или фотографий, даже в визуальном формате (например, в виде сносок на страницах). Нарушение авторских прав, в том числе на визуальные элементы, является серьезным этическим нарушением и может стать основанием для отказа в публикации статьи.

(4) Подготовка сопроводительных файлов.

Некоторые журналы требуют, чтобы графическая аннотация сопровождалась:

1. Отдельным описанием визуальных элементов (legend or caption).
2. Кратким пояснением (Summary Statement): 1–2 предложения, поясняющие содержание аннотации.
3. Свидетельством авторства иллюстрации (особенно если в создании участвовал дизайнер).

Шаг 7. Получение обратной связи: тестирование аннотации

На этом этапе реализуется оценка эффективности графической аннотации не автором, а сторонними наблюдателями. Даже идеально структурированная

и визуально качественная аннотация может не выполнить свою коммуникативную функцию, если она непонятна или перегружена. Поэтому обратная связь — это не финальный, а неотъемлемый этап разработки. Авторы находятся внутри контекста исследования и обладают знаниями, которых нет у потенциального читателя. Поэтому аннотация, которая кажется очевидной создателю, может быть нечитабельной или непонятной даже для специалиста из смежной области. Графическая аннотация является инструментом внешней коммуникации, а значит, она должна быть интуитивно понятной и логически прозрачной вне авторского контекста.

Как проводить тестирование

Попросите коллегу (лучше из смежной или соседней дисциплины) ознакомиться с презентацией и ответить на вопросы:

1. Что это за исследование?
2. Каков его основной результат?
3. Понятна ли логика представления информации?
4. Какие элементы графической аннотации сбивают с толку?

Используйте принцип «трёх У» (универсальность, удобство, уместность):

1. Универсальность: понятна ли графическая аннотация не только специалисту?
2. Удобство: воспринимается ли информация за 5–10 секунд?⁹
3. Уместность: отражает ли она действительно то, что важно в статье?

Анализ полученных отзывов является важным этапом доработки графической аннотации. В первую очередь следует устранить все выявленные неясности: переформулировать подписи к элементам, исключить иконки, интерпретация которых вызывает затруднения. Если отдельные блоки требуют дополнительного пояснения, это может свидетельствовать о чрезмерной сложности их визуального или содержательного оформления — в таком случае целесообразно упростить соответствующие фрагменты. Особое внимание необходимо уделить визуальному потоку: в зависимости от комментариев может потребоваться изменение направления стрелок, уточнение последовательности или пере-

⁹ Jambor & Bornhäuser (2024) подчеркивают, что эффективные аннотации в среднем оцениваются внешними читателями как «понятные» за 5–8 секунд, тогда как перегруженные или плохо структурированные требуют 15–20 секунд и вызывают фрустрацию.

распределение элементов с целью повышения читаемости и логической связности структуры. Следует также учитывать, что не все важные с точки зрения автора детали оказываются значимыми для восприятия аудитории; приоритетом должно оставаться донесение основного научного сообщения, а не избыточность визуального содержания.

Шаг 8. Подготовка финального файла для публикации

После получения отзывов и внесения соответствующих правок наступает заключительный этап — техническая и редакционная подготовка графической аннотации к подаче в научный журнал. На данной стадии особое значение приобретают точность исполнения, соответствие техническим требованиям издательства и аккуратное оформление визуального материала. Финализация включает несколько критически важных аспектов.

Прежде всего, необходимо провести проверку качества изображения. Разрешение графической аннотации должно составлять не менее 300 dpi, если иное не указано в инструкциях для авторов. Следует убедиться в читаемости всех текстовых элементов при уменьшении масштаба до 25–50%, что позволяет смоделировать условия восприятия изображения на цифровых платформах. Цветовая модель выбирается в зависимости от предполагаемого формата публикации: RGB используется для веб-версий, CMYK — для печатных изданий. Размер изображения необходимо указать в соответствии с требованиями конкретного журнала, чаще всего в пикселях (например, 1200×800) или в сантиметрах (например, 10×15 см).

Следующим этапом является выбор подходящего формата файла. Формат PNG рекомендуется как универсальное решение для большинства журналов, особенно при размещении графической аннотации в онлайн-версии. Формат SVG является предпочтительным для векторной графики, обеспечивая масштабируемость без потери качества. Формат PDF используется в случаях, когда необходимо сохранить сложные векторные элементы или обеспечить точную верстку. Формат TIFF, в свою очередь, может быть обязательным для медицинских и других специализированных изданий, ориентированных на высококачественную печать.

Завершающая редакция текста в графической аннотации предполагает дополнительную провер-

ку всех заголовков, подписей и текстовых блоков на предмет соответствия визуальному содержанию. Следует устранить повторы основного заголовка статьи, избегать дублирования информации и проверить логическую связь между текстовыми и графическими элементами. Например, если подпись к графику обозначена как «Результаты», но сам график не содержит данных, необходимо либо добавить соответствующую визуализацию, либо изменить формулировку подписи.

Дополнительно следует указать источники визуальных элементов и авторства аннотации, используя конкретный кегль шрифта (8–10 pt) в нижней части изображения. Примеры формулировок: «Created with BioRender.com», «Icons by Mind the Graph», «Author: A. N. Researcher».

На финальном этапе важно сохранить исходный файл (например, .pptx, .ai, .svg) в виде отдельной версии для возможных последующих корректировок по запросу редакции. Отправке в редакцию подлежат только финальные файлы в строго указанных форматах. Рекомендуется выполнить пробную печать или экспортировать изображение в PDF, чтобы проверить стабильность верстки. Также необходимо создать резервную копию в облачном хранилище или научном репозитории, добавив информацию о дате и версии. Если журнал требует загрузки графической аннотации в систему подачи статей, необходимо приложить её отдельным файлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Графические аннотации переживают этап активного роста и трансформации. Их функции выходят за рамки визуального резюме: они становятся каналом научного сторителлинга, средством привлечения аудитории, инструментом продвижения публикаций и даже обучающим ресурсом. В ближайшие годы можно ожидать дальнейшего распространения мультимедийных и интерактивных форматов, внедрения инструментов искусственного интеллекта для их автоматического создания на базе рукописи, развития их стандартов и интеграции в системы научной оценки. Учитывая все перечисленные аспекты, графические аннотации заслуживают не только внимания со стороны авторов, но и институциональной поддержки со стороны научных журналов, редакторов и образовательных структур.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Atkinson, R.C., & Shiffrin, R.M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of Learning and Motivation*, 2, 89–195. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3)
- Bresciani, S., & Eppler, M. J. (2009). The Benefits of Synchronous Collaborative Information Visualization: Evidence from an Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(6), 1073-1080. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2009.188>
- Eppler, M. J., & Burkhard, R. A. (2007). Visual representations in knowledge management: framework and cases. *Journal of Knowledge Management*, 11(4), 112–122. <https://doi.org/10.1108/13673270710762756>
- Evagorou, M., Erduran, S., & Mäntylä, T. (2015). The role of visual representations in scientific practices: From conceptual understanding and knowledge generation to “seeing” how science works. *International Journal of STEM Education*, 2(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-015-0024-x>
- Hullman, J., & Diakopoulos, N. (2011). Visualization Rhetoric: Framing Effects in Narrative Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(12), 2231–2240. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2011.255>
- Fay, N., Swoboda, N., Fukaya, T., Umata, I., Katagiri, Y. (2004). Using graphics to communicate across cultures. In A.F. Blackwell, K. Marriott, A. Shimojima (Eds.), *Diagrammatic representation and inference. Lecture Notes in Computer Science*, 2980. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-25931-2_36
- Franconeri, S. L., Padilla, L. M., Shah, P., Zacks, J. M., & Hullman, J. (2021). The science of visual data communication: What works. *Psychological Science in the Public Interest*, 22(3), 110–161. <https://doi.org/10.1177/15291006211051956>
- Ibrahim, A. M., Lillemoe, K. D., Klingensmith, M. E., & Dimick, J. B. (2017). Visual abstracts to disseminate research on social media. *Annals of Surgery*, 266(6), e46–e48. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000002277>
- Jambor, H.K., & Bornhäuser, M. (2024). Ten simple rules for designing graphical abstracts. *PLOS Computational Biology*, 20(2), e1011789. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011789>
- Kim, Y., Lee, J., Yoo, J., Jung, E.-A., Kim, S. G., & Kim, Y.S. (2022). Seeing is believing: The effect of graphical abstracts on citations and social media exposure in Gastroenterology & Hepatology journals. *Journal of Korean Medical Science*, 37(45). <https://doi.org/10.3346/jkms.2022.37.e321>
- Lee, J., & Yoo, J.-J. (2023). The current state of graphical abstracts and how to create good graphical abstracts. *Science Editing*, 10(1), 19–26. <https://doi.org/10.6087/kcse.293>
- Lengler, R., & Eppler, M.J. (2007). Towards a periodic table of visualization methods of management. In *Proceedings of the IASTED International Conference on Graphics and Visualization in Engineering* (pp. 83–88). ACTA Press.
- Li, Y., & Xie, Y. (2019). Is a picture worth a thousand words? an empirical study of image content and social media engagement. *Journal of Marketing Research*, 57(1), 1–19. <https://doi.org/10.1177/0022243719881113>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>
- Midway, S. R. (2020). Principles of effective data visualization. *Patterns*, 1(9), 100141. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2020.100141>
- Pauwels, L. (Ed.). (2006). *Visual cultures of science. Rethinking representational practices in knowledge building and science communication*. Dartmouth College Press.
- Peng, Sh., Bainbridge, W.A. (2024). Image memorability enhances social media virality. arXiv:2409.14659. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.14659>

- Potter, M.C., Wyble, B., Haggmann, C.E., & McCourt, E.S. (2014). Detecting meaning in RSVP at 13ms per picture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(2), 604–616. <https://doi.org/10.1037/a0033899>
- Standing, L. (1973). Learning 10000 pictures. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25(2), 207–222. <https://doi.org/10.1080/14640747308400340>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Vaghjani, N.G., Lal, V., Vahidi, N, Ebadi, A., Carli, M., Sima, A., & Coelho, D. (2021). Social media and academic impact: Do early tweets correlate with future citations? *Ear, Nose & Throat Journal*, 103(2), 75–80. <https://doi.org/10.1177/014556132111042113>
- de Winter, J. C. F. (2014). The relationship between tweets, citations, and article views for PLOS ONE articles. *Scientometrics*, 102(2), 1773–1779. <https://doi.org/10.1007/s11192-014-1445-x>
- Yoon, J., & Chung, E. (2017). An investigation on Graphical Abstracts use in scholarly articles. *International Journal of Information Management*, 37(1), 1371–1379. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.09.005>

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Метафорическая визуализация

Под метафорической визуализацией понимается тип визуального представления информации, при котором используются образные, символические или ассоциативные изображения для передачи абстрактных, сложных или многослойных идей. В отличие от традиционных графиков, диаграмм и схем, которые оперируют прямым отображением данных, метафорическая визуализация строится

на принципах аналогии, воображения и когнитивной проекции. Метафорика полезна тогда, когда цель визуализации — не столько передача фактов, сколько объяснение концептуальных связей, вовлечение аудитории и облегчение понимания за счёт апелляции к уже знакомым образам.

Метафорическая визуализация опирается на когнитивную теорию метафоры (Lakoff & Johnson, 1980), согласно которой метафора — это не только лингвистический приём, но и способ мышления. Метафора позволяет понять одно явление через призму другого, опираясь на уже существующий опыт и интуицию. Визуальные метафоры действуют так же: они создают образы, связывающие абстрактное и конкретное, новое и знакомое.

Таблица 1

Функции метафорической визуализации

Table 1

xxxxx

Функция	Описание
Объяснительная	Помогает представить сложную или абстрактную идею через знакомый образ.
Эвристическая	Стимулирует новые интерпретации и ассоциации.
Мотивационная / вовлекающая	Привлекает внимание и облегчает запоминание.
Критическая / концептуальная	Подчёркивает противоречия, метафизику или скрытые измерения проблемы.

Функции метафорической визуализации представлены в Таблице 1.

Визуальные метафоры принято подразделять на различные типы, каждый из которых выполняет конкретную функцию (Таблица 2):

- (1) Метафоры пространства** (например, «путь», «горизонт», «лабиринт»): часто применяются для визуализации процессов или развития.
- (2) Метафоры конструкции** (например, «здание», «мост», «машина»): используются для отображения систем, структур и взаимосвязей.

Таблица 2

Примеры метафорических визуализаций в графических аннотациях

Table 2

xxxxx

Научная тема	Визуальная метафора	Объяснение
Риски незаметного влияния переменных	Айсберг	Подчёркивает, что видимая часть проблемы — лишь малая её доля.
Развитие теории	Дерево с корнями и ветвями	Корни — основания теории, ветви — направления развития.
Исследование с несколькими сценариями	Развилка на дороге	Визуализация альтернативных путей или прогнозов.
Угрозы для биоразнообразия	Обрушивающаяся башня из блоков Джэнга	Демонстрация хрупкости экосистем при потере отдельных видов.
Последовательность решений	Лестница или дорога с этапами	Отображение поэтапного развития или принятия решений.
Риски и нестабильность	Вулкан	Акцентировать внимание на опасности.
Накопление проблем	Снежный ком	Отразить эффект усиления и необратимости
Ограниченные ресурсы	Песочные часы	Подчеркнуть временные или количественные ограничения

- (3) **Метафоры природы** (например, «дерево», «корни», «растущий организм»): символизируют рост, развитие, связи.
- (4) **Метафоры риска и конфликта** (например, «вулкан», «минное поле», «цунами»): применяются для иллюстрации угроз, нестабильности или кризисов.
- (5) **Метафоры прозрачности и скрытости** (например, «айсберг», «тень», «занавес»): обозначают различие между явным и скрытым.

Преимущества метафорической визуализации

- (1) **Универсальность восприятия**: метафоры воспринимаются быстрее и эффективнее за счёт узнаваемости.
- (2) **Междисциплинарность**: подходит для всех областей знания (от социальных наук до биомедицины).
- (3) **Поддержка креативного научного мышления**: стимулирует генерацию новых смыслов и альтернативных трактовок.
- (4) **Повышение вовлечённости**: визуальные метафоры эмоционально «вовлекают» читателя, делая исследование ближе и понятнее.

Ограничения

- (1) **Субъективность**: один и тот же образ может интерпретироваться по-разному разными читателями.
- (2) **Культурная специфика**: некоторые метафоры понятны только внутри конкретной культурной или дисциплинарной среды.
- (3) **Потенциальное упрощение**: метафора может исказить смысл или чрезмерно упростить сложное явление.
- (4) **Неуниверсальность формата**: не во всех типах исследований уместно использование обрванной репрезентации.

Рекомендации авторам графических аннотаций

- 1. Прежде чем использовать метафору, определите её когнитивную функцию: объяснение, обобщение, акцент?
- 2. Убедитесь, что образ интуитивно считывается целевой аудиторией.
- 3. Сопроводите метафору краткой текстовой подписью, поясняющей её смысл.
- 4. Избегайте перегруженных или противоречивых метафор (визуальное «переусложнение» снижает когнитивную эффективность).
- 5. При необходимости — комбинируйте метафорическую визуализацию с элементами схем и диаграмм для повышения точности.

Современные цифровые подходы в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья: обзор предметного поля

КНИИХП – филиал ФГБНУ СКФНЦСВВ,
г. Краснодар, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Першакова Татьяна Викторовна
E-mail: 7999997@inbox.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Першакова, Т.В., Купин, Г.А., Яковлева, Т.В., Чернявская, Ю.Н., & Котвицкая, Д.В. (2025). Развитие цифровых методов в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 27–48. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.1.564>

ПОСТУПИЛА: 23.11.2024
ДОРАБОТАНА: 10.03.2025
ПРИНЯТА: 15.03.2025
ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Т. В. Яковлева, Ю. Н. Чернявская,
Д. В. Котвицкая

АННОТАЦИЯ

Введение: Технология хранения и переработки сельскохозяйственного сырья играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности и минимизации потерь продукции, однако традиционные методы зачастую не в полной мере эффективны и могут приводить к значительным потерям сырья.

Цель: Критическое осмысление, систематизация и обобщение существующих цифровых методов и технологий, применяемых в хранении и переработке сельскохозяйственного сырья, для выявления их потенциала, ограничений и перспектив внедрения в российском сельском хозяйстве, с учетом особенностей отрасли и существующих барьеров.

Материалы и методы: Анализировались научные статьи и материалы конференций на русском и английском языках из изданий, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, РИНЦ. Временные рамки анализируемых изданий с 2017 по 2024 гг. Также была проанализирована нормативно-правовая документация Правительства РФ в области внедрения цифровых технологий, вступившая в силу с 2010 по 2023 г. и опубликованная на официальном сайте «Консультант Плюс» и интернет-источники, опубликованные за период с 2023 по 2024 гг. Обзор проведен в соответствии с установлениями PRIZMA ScR.

Результаты: В процессе анализа существующих цифровых методов и технологий, применяемых для хранения и переработки сельскохозяйственного сырья выделены три направления исследований, описывающие: (1) уровень цифровизации агропромышленного комплекса в Российской Федерации, (2) сдерживающие аспекты, влияющие на уровень цифровизации агропромышленного комплекса, (3) разработки в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья.

Выводы: Цифровые технологии, применяемые в хранении и переработке сельскохозяйственного сырья, обладают значительным потенциалом для оптимизации производственных процессов, снижения затрат и повышения эффективности. Однако существующие цифровые решения отличаются фрагментарностью и недостаточной интеграцией, как между собой, так и с традиционными лабораторными методами определения качества. Создание единой интегрированной системы, использующей возможности искусственного интеллекта, могло бы значительно повысить эффективность, безопасность и качество всей сельскохозяйственной отрасли. Для создания такой системы необходим переход от фрагментарных решений к комплексным платформам, которые интегрируют данные из разных систем; также необходимо провести интеграцию искусственного интеллекта с традиционными лабораторными методами оценки качества. Однако отсутствие единых стандартов для обмена данными и недостаток координации между системами препятствуют комплексному внедрению цифровых решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

уровень цифровизации агропромышленного комплекса; сдерживающие аспекты развития цифровизации; направления использования искусственного интеллекта в аграрном секторе; фрагментация цифровых решений

The Development of Digital Methods in the Technologies of Storage and Processing of Agricultural Raw Materials: A Scoping Review

Krasnodar Scientific Research Institute for Storage and Processing of Agriculture Products – branch of the Federal State budgetary scientific institution “North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking”, Krasnodar, Russian Federation

CORRESPONDENCE:

Tatyana V. Pershakova

E-mail: 7999997@inbox.ru

FOR CITATIONS:

Pershakova, T.V., Kupin, G.A., Yakovleva, T.V., Chernyavskaya, J.N., & Kotvitskaya, D.V. (2025). The development of digital methods in the technologies of storage and processing of agricultural raw materials: A scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 27-48. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.564>

RECEIVED: 23.11.2024

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



Tatyana V. Pershakova, Grigory A. Kupin, Tatyana V. Yakovleva, Julia N. Chernyavskaya, Daria V. Kotvitskaya

ABSTRACT

Introduction: Technologies for storing and processing of agricultural raw materials play a key role in ensuring food security and minimizing product losses, but traditional methods are often not fully effective and can lead to significant losses of raw materials.

Purpose: Critical understanding, systematization and generalization of existing digital methods and technologies used in the storage and processing of agricultural raw materials in order to identify their potential, limitations and prospects for implementation in Russian agriculture, considering the specifics of the industry and existing barriers.

Materials and Methods: To analyze the current state of the development of digital methods and technologies used in the storage and processing of agricultural raw materials, this paper conducted a review of research articles and conference materials. The study covers the period from 2017 to 2024. The search for relevant literature was carried out through the scientific databases Scopus, Web of Science, and RSCI. The regulatory and legal documentation of the Government of the Russian Federation in the field of implementation of digital technologies, which came into force from 2010 to 2024, published on the Consultant Plus official website, was also analyzed. Internet sources published in the period from 2023 to 2024 were also analyzed. The study included works published in Russian and English. The PRISMA protocol was used to systematize the literature review.

Results: In the process of analyzing existing digital methods and technologies used in the storage and processing of agricultural raw materials three research trends were identified: (1) the level of digitalization of the agro-industrial complex in the Russian Federation, (2) the restraining aspects of the level of the agro-industrial complex digitalization and presents ways to overcome them, (3) inventions in the field of storage and processing of agricultural raw materials.

Conclusion: Digital technologies used in the storage and processing of agricultural raw materials have significant potential to optimize production processes, reduce costs and increase efficiency. However, existing digital solutions are fragmented and poorly integrated, both with each other and with traditional laboratory methods of quality determination. The creation of a single integrated system using artificial intelligence capabilities would contribute to increasing the efficiency, safety and quality of the entire agricultural sector. To create such a system, it is necessary to move from fragmented solutions to comprehensive platforms integrating data from different systems; it is also necessary to integrate artificial intelligence with the traditional laboratory methods of quality determination. However, the lack of uniform standards for data exchange and the lack of coordination between systems hinder the comprehensive implementation of digital solutions.

KEYWORDS

level of agro-industrial complex digitalization; development constraints; areas of the use of artificial intelligence in agro-industrial complex; fragmentation of digital solutions

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство столкнулось с вызовами, связанными с повышением спроса на продукцию, необходимостью сокращения потерь и улучшения качества продукции (Водясов, 2018; Кудинова и соавт., 2023). В этой ситуации цифровые технологии предлагают революционный подход к решению многих проблем в сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья. Например, применение датчиков, искусственного интеллекта и больших данных позволяет создавать более эффективные системы управления условиями хранения, оптимизировать процессы переработки и улучшить контроль качества продукции (Валигурский и соавт., 2019).

Внедрение цифровых методов в сельское хозяйство способствует более рациональному использованию таких ресурсов, как вода, удобрения, пестициды, энергия и рабочая сила, а также снижению потерь и увеличению рентабельности сельскохозяйственного производства. Несмотря на очевидный потенциал цифровых технологий в сельском хозяйстве, их реализация в сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья происходит неравномерно. Существуют проблемы, связанные с отсутствием единых стандартов в области цифровизации, недостатком информации о доступных цифровых решениях для сельского хозяйства и недостатком квалифицированных специалистов, способных внедрять имеющиеся цифровые инструменты. Существующие обзоры в области применения цифровизации в сельском хозяйстве (Afreen et al., 2021; Kailaku et al., 2022; Lamberty et al., 2022; Rajesh et al., 2022; Rehman et al., 2022; Норалиев и соавт., 2020; Idama et al., 2023; Karpagalakshmi et al., 2020; Tileukeev et al., 2023) в основном фокусируются на отдельных аспектах использования цифровых технологий, не уделяя достаточно внимания сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья.

Данный обзор предметного поля нацелен на систематизацию и критическое оценивание существующих цифровых методов и технологий, применяемых в хранении и переработке сельскохозяйственного сырья. Исследовательские вопросы:

RQ#1: Каковы ключевые направления развития цифровых технологий в сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья?

RQ#2: Какими преимуществами и недостатками обладают существующие цифровые методы и технологии?

RQ#3: Каковы основные барьеры для внедрения цифровых технологий в сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья?

RQ#4: Какие перспективы существуют для дальнейших исследований и развития в этой сфере?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Базы данных и временные рамки

Для проведения обзора был осуществлен поиск источников (научные статьи и материалы конференций на русском и английском языках) за период с 2017 по 2024 г. Этот выбор обусловлен тем, что данный период охватывает наиболее активное развитие цифровых технологий в сельском хозяйстве. Поиск осуществлялся в базах данных РИНЦ, Web of Science, Scopus. Также была использована нормативно-правовая документация Правительства Российской Федерации в области развития цифровых технологий, подобранная за период с 2010 по 2024 г. на официальном сайте «Консультант Плюс». Были отобраны и проанализированы интернет-источники, содержащие информацию о современных разработках цифровых технологий в области хранения и переработки сельскохозяйственной продукции в сфере АПК, опубликованные в период с 2023 по 2024 г.

Критерии включения и исключения для научных источников

В российской базе данных РИНЦ отбор данных источников для анализа реализовывался по следующим ключевым словам: цифровизация, агропромышленный комплекс, сельское хозяйство, хранение, переработка, искусственный интеллект, Agriculture 4.0. В зарубежных базах данных Scopus, Web of Science поиск осуществлялся по ключевым словам: digitalization, agro-industrial complex, agriculture, storage, processing, artificial intelligence, Agriculture 4.0.

Критерии включения научных источников в обзор:

(1) материалы научных статей и конференций опубликованы в период с 2017 по 2024 г.;

- (2) материалы научных статей и конференций соответствуют теме выбранного исследования и затрагивают следующие аспекты: современное состояние агропромышленного комплекса разных стран, уровень самообеспеченности основными продуктами (в том числе фруктами и овощами), уровень продовольственной независимости разных стран; значение цифровизации аграрного сектора, уровень цифровой активности российских сельскохозяйственных организаций, проблемы внедрения цифровых технологий в организациях, различные исследования, направленные на разработку цифровых технологий в области хранения сельскохозяйственного сырья;
- (3) типы анализируемых материалов — это оригинальные исследовательские научные статьи, обзорные статьи, материалы конференций.

Критерии исключения научных источников:

- (1) материалы научных статей и конференций не соответствуют теме данного обзора, т. е. не касаются тематики развития цифровизации в области АПК в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья;
- (2) материалы научных статей и конференций написаны на других языках, кроме русского и английского;
- (3) содержание материалов научных статей и конференций дублируется. Если из разных баз данных или электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Критерии включения и исключения для нормативно-правовой документации Правительства РФ

На официальном сайте «Консультант Плюс» отбор данных источников для анализа реализовывался по следующим ключевым словам: цифровизация, цифровая трансформация, концепция развития, агропромышленный комплекс, сельское хозяйство.

Критерии включения нормативно-правовой документации Правительства РФ в обзор:

- (1) документация является действующей;
- (2) документация соответствует теме выбранного исследования и затрагивает програм-

мы, направленные на цифровизацию отрасли сельского хозяйства, существующие меры поддержки малого и среднего бизнеса в агропромышленном комплексе, а также на государственные стратегические инициативы, способствующие ускорению цифровой трансформации АПК.

Критерии исключения нормативно-правовой документации Правительства РФ:

- (1) документация недействующая;
- (2) документация не соответствует теме данного обзора, т. е. не касается тематики развития цифровизации в АПК в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья.

Критерии включения и исключения для интернет-источников

Для поисковых запросов в интернете отбор данных источников для анализа реализовывался по следующим ключевым словам: цифровизация, агропромышленный комплекс, сельское хозяйство, искусственный интеллект, интернет вещей, умные хранилища.

Критерии включения интернет-источников в обзор:

- (1) интернет-источники опубликованы в период с 2023 по 2024 г.;
- (2) интернет-источники соответствуют теме выбранного исследования и затрагивают проблемы цифровизации АПК России, рассматривают решения, направленные на повышение уровня цифровизации АПК России, а также цифровые технологии, внедренные в организациях АПК России.
- (3) типы анализируемых интернет-источников — это официальные сайты компаний, общественно-политические новостные порталы и сайты, специализированные новостные порталы и сайты, онлайн-журналы.

Критерии исключения интернет-источников:

- (1) интернет-источник не соответствует теме данного обзора, т. е. не касается тематики развития цифровизации в АПК в технологиях хранения и переработки сельскохозяйственного сырья;
- (2) содержание интернет-источника дублируется.

Отбор источников

По запросу из всех баз данных были проанализированы 283 источника, из которых в результате первичного и вторичного сканирования текстов отобран 91 источник (оригинальных исследовательских статей и материалов конференций, обзорных статей — 72, нормативно-правовой документации Правительства РФ — 9, интернет-источников — 10). Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для отображения этапов работы с источниками использовался протокол PRISMA (Рисунок 1).

Извлечение и анализ данных

В обзор был включен 91 релевантный научный источник, среди которых 72 составляют научные статьи и материалы конференций, 9 — документы нормативно-правовой документации Правительства РФ и 10 — интернет-источники. Процесс извле-

чения данных выполнялся авторами независимо друг от друга, затем результаты обсуждались в рамках фокус-группы, что позволило прийти к единому объективному представлению информации.

Извлеченные данные представлены в аналитической таблице, включающей следующие категории: автор и год публикации; уровень цифровизации агропромышленного комплекса (АПК) в Российской Федерации; факторы, влияющие на развитие цифровизации АПК; направления использования цифровых технологий в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья.

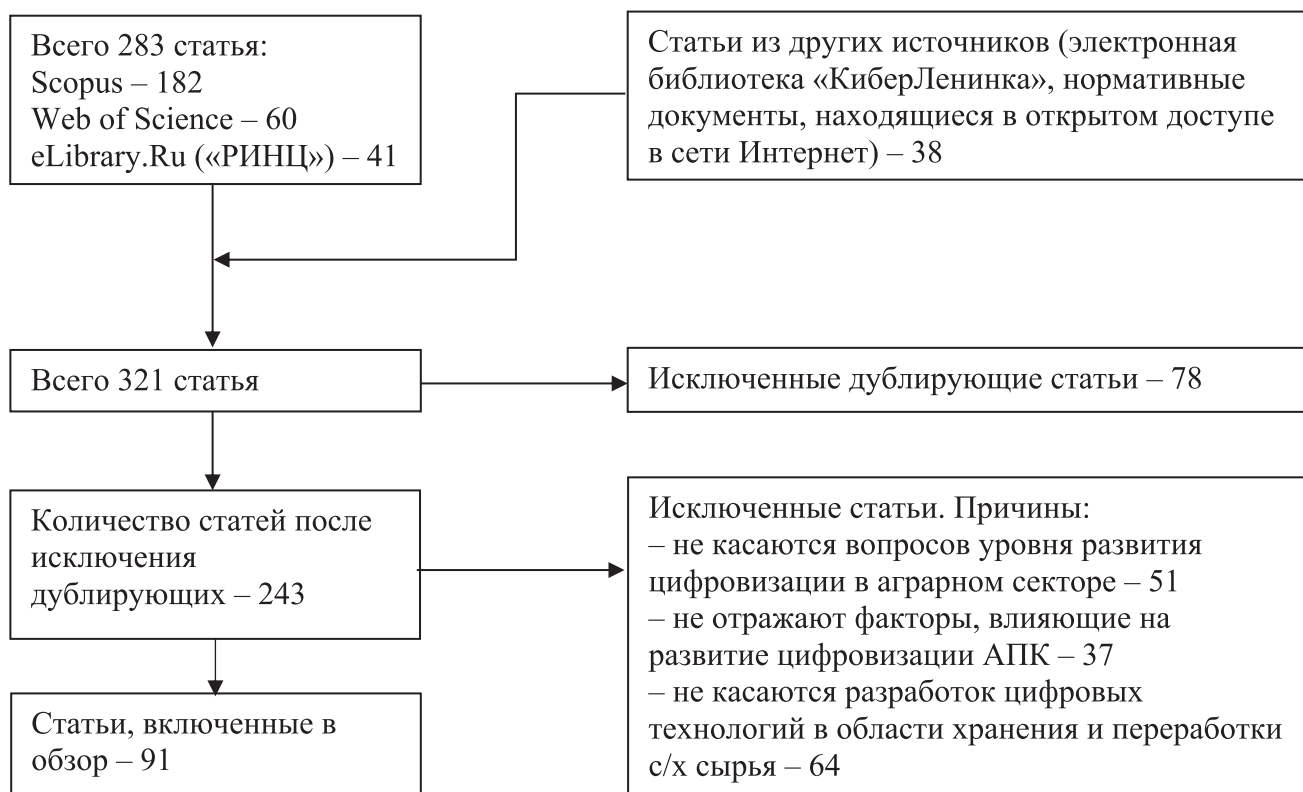
Для категоризации информации применялся тематический подход, при котором каждый источник был проанализирован на соответствие ключевым аспектам исследования. Далее данные группировались в три концептуальных блока: (1) уровень цифровизации АПК; (2) сдерживающие факторы внедрения цифровых решений; (3) примеры научных

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора материалов для исследования в соответствии с протоколом PRISMA

Figure 1

Flowchart Describing the Process of Selecting Materials for the Research, Following the PRISMA ScR Protocol



разработок и технологий, применяемых в области хранения и переработки.

Концептуализация исследовательских трендов осуществлялась на основе содержательного анализа включенных публикаций. Авторы выделяли повторяющиеся тематические тренды, ключевые вызовы и перспективные направления развития. Формулировка трендов происходила путем обобщения повторяющихся тематик, акцентирования внимания на проблемных зонах и потенциальных точках роста, что позволило выявить как устойчивые направления научного поиска, так и нерешенные вопросы, требующие дальнейшего изучения.

Использование данной аналитической структуры позволило систематизировать и наглядно представить основные результаты обзора. Это обеспечило четкое понимание текущего состояния цифровизации агропромышленного комплекса, а также выявило основные препятствия и перспективные направления развития цифровых технологий в области хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.

В Таблице 1 представлено описание процесса извлечения данных из статей, которые были включены в обзор.

Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, рассматриваемых в данном обзоре

Table 1

An Example of Extracting Data from the Articles Included in the Review

№	Заглавие	Автор и год	Уровень цифровизации АПК в РФ	Факторы, влияющие на развитие цифровизации АПК	Направления развития цифровых технологий в области хранения и переработки с/х сырья
1	Цифровизация АПК России: проблемы и предлагаемые решения	Шендерюк, О., Чемашкин, Ф., Ветошкин, С., Могилюк, В. (2023)	По уровню внедрения цифровых технологий российский АПК существенно уступает показателям ведущих стран мира	—	—
2	Оценка и прогноз развития агропромышленного комплекса	Валигурский, Д.И., Кузьмина, Т.Т., Рыжова, И.О., Савенко, В.Г., Гаврилюк, М.В. (2019)	—	Самый низкий уровень компетенций работников АПК и кадров России в целом был выявлен в области информационных технологий. Без необходимых навыков и качества компетенций невозможна реализация намеченных стратегий и программ в полной мере. Для повышения уровня компетенций требуется дополнительная подготовка и переподготовка специалистов	—
3	Application of hyperspectral imaging for maturity and soluble solids content determination of strawberry with deep learning approaches	Su, Zh., Zhang, Ch., Yan, T., Zhu, J., Zeng, Y., Lu, X., Gao, P., Feng, L., He, L., Fan, L. (2021)	—	—	Hyperspectral imaging in combination with deep learning has been applied to determine the degree of maturity and the content of soluble solids (SSC) in strawberries with four degrees of maturity.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ потенциала внедрения цифровых технологий в сферу хранения и переработки сельскохозяйственного сырья выявил три ключевых блока, которые рассмотрены в данном разделе: уровень цифровизации агропромышленного комплекса Российской Федерации; сдерживающие факторы, влияющие на уровень цифровизации в агропромышленном комплексе и пути их преодоления; научные исследования и разработки в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья.

Уровень цифровизации агропромышленного комплекса Российской Федерации: вызовы и перспективы

В современном мире агропромышленный комплекс занимает одно из центральных мест в экономической структуре России и включает в себя целый ряд отраслей, среди которых ключевую позицию занимает растениеводство, отвечающее за производство и поставку на рынок большого ассортимента высококачественной сельскохозяйственной продукции и сырья, необходимых для дальнейшей переработки в различных секторах промышленности (Валигурский и соавт., 2019).

В условиях изменений в мировой политике и экономике поддержка отечественного агропромышленного сектора и повышение его эффективности становятся одной из ключевых задач, стоящих перед государством (Шереужева, 2020). Продовольственную независимость страны, определяемую Доктриной продовольственной безопасности РФ, обеспечивает рост производства сельскохозяйственной продукции (Рисунок 2) (Водясов, 2018; Кудинова и соавт., 2023).

С 2017 по 2023 г. аграрный сектор нашей страны активно развивался, что отражается в высоких показателях производства. С 2017 г. объем производства продукции АПК вырос на 63%, из них

Рисунок 2

Динамика темпов прироста производства продукции сельского хозяйства в РФ, %¹

Figure 2

Dynamics of Agricultural Production Growth Rates in the Russian Federation, %¹



продукция растениеводства увеличилась на 73%. Благодаря такому поступательному развитию сельского хозяйства удалось выйти по большинству целевых показателей на самообеспеченность, которой продолжительное время Россия не обладала (Таблица 2).

Таблица 2

Уровень самообеспечения основными продуктами питания^{2,3}

Table 2

The Level of Self-Sufficiency in Basic Foodstuffs^{2,3}

Виды продукции	Уровень самообеспеченности, %				Доктрина
	2016	2018	2020	2022	
Зерно	160	147	166	191	95
Картофель	93	95	89	95	95
Овощи и бахчевые культуры	87	87	86	89	90
Фрукты и ягоды	37	39	42	47	60

Показатели продовольственной независимости и продовольственной безопасности были достигнуты в то время, когда аграриям были доступны западные средства и технологии производства. Однако в 2022 г., несмотря на рекордный урожай, индекс продовольственной безопасности РФ снизил-

¹ Федеральная служба государственной статистики. <https://rosstat.gov.ru/>

² Шендерюк, О., Чемашкин, Ф., Ветошкин, С., Могилук, В. (2023). Цифровизация АПК России: проблемы и предлагаемые решения. Яков и партнеры.

³ Сельское хозяйство в России 2023. Статистический сборник. Федеральная служба государственной статистики. Росстат. https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Sel_xoz-vo_2023.pdf

ся до 69%. Это объясняется повышением стоимости средств производства, замедлением внедрения новой техники и передовых технологий, нарушением цепочек поставок, политическими препятствиями. К перечисленным проблемам следует отнести также недостаточную финансовую поддержку малых форм хозяйствования со стороны государства, что явилось катализатором увеличения угроз для продовольственной безопасности (Валигурский и соавт., 2019; Водясов, 2018). В этих условиях остро встает вопрос о цифровизации аграрного сектора, которая могла бы стать основным направлением для дальнейшего роста.

Цифровая трансформация агропромышленного комплекса на сегодняшний день является одним из ключевых вызовов для мирового экономического прогресса. Внедрение цифровых технологий в сельское хозяйство и промышленность становится не просто необходимостью, но и стратегическим шагом к повышению эффективности и конкурентоспособности отрасли. Разработка и внедрение инновационных цифровых решений в производственные процессы позволяют оптимизировать использование ресурсов, повысить производительность труда и сократить экологическую нагрузку. Благодаря цифровому прогрессу возможно значительное улучшение качества продукции, увели-

чение объемов производства и расширение рыночных возможностей для сельскохозяйственных предприятий (Алтухов и соавт., 2020; Салтанова и соавт., 2022).

Цифровая трансформация позволит не только оптимизировать внутренние процессы, но и улучшить взаимодействие с потребителем, она способствует повышению эффективности работы предприятий, улучшению качества выпускаемой продукции, сокращению издержек производства и снижению себестоимости продукции, что, в свою очередь, приведет к повышению конкурентоспособности. Кроме того, повысит производительность труда сотрудников и способствует переходу сельского хозяйства к Agriculture 4.0 (Сибиряев, 2023; Шатохин и соавт., 2021).

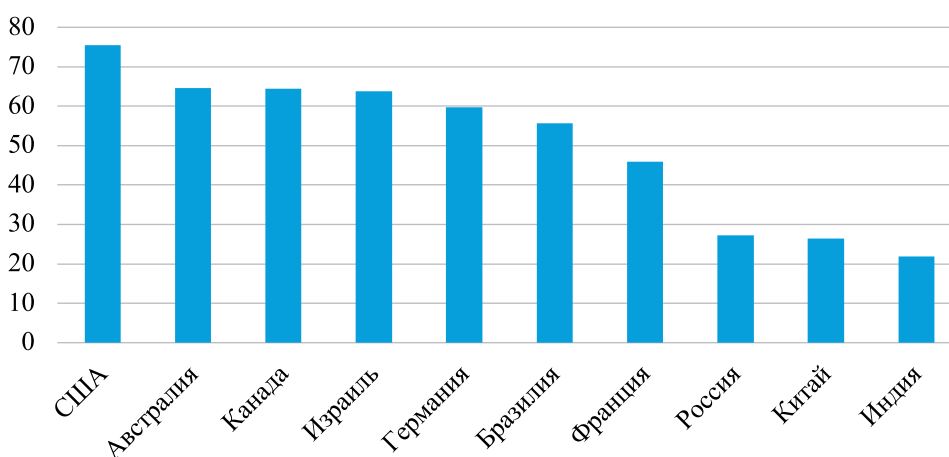
Для определения степени развития цифровизации используется множество разнообразных критериев, среди которых основополагающим является показатель уровня цифровизации. Анализ этого показателя не только позволяет сравнивать различные страны между собой, но и выявлять тенденции развития цифровых технологий в мировом масштабе (Клюкин, 2022). Показатели уровня цифровизации АПК разных стран представлены на Рисунке 3⁴.

Рисунок 3

Уровень цифровизации АПК в разных странах

Figure 3

The Level of Agriculture Digitalization in Different Countries



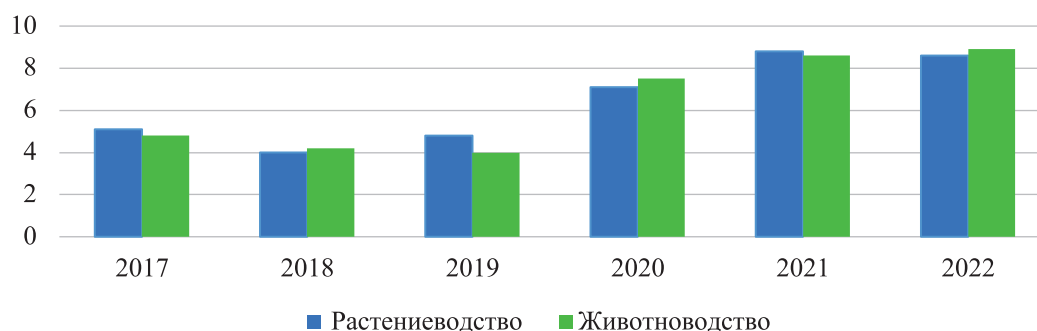
⁴ Шендерюк, О., Чемашкин, Ф., Ветошкин, С., Могилюк, В. (2023). Цифровизация АПК России: проблемы и предлагаемые решения. Яков и партнеры. <https://www.yakov.partners/publications/digitalizing-russia-s-agricultural-sector-challenges-and-solutions/>

Рисунок 4

Уровень цифровой активности российских организаций в сельском хозяйстве с 2017 по 2022 г., %

Figure 4

The Level of Digital Activity of Russian Organizations in Agriculture from 2017 to 2022, %



По уровню внедрения цифровых технологий российский АПК существенно уступает показателям ведущих стран мира. В качестве критерия, характеризующего развитие цифровизации аграрного сектора в России, можно определить уровень цифровой активности российских организаций сельского хозяйства (Рисунок 4).

Для анализа активности российских организаций в сельском хозяйстве в период с 2017 по 2022 г. была построена диаграмма, основанная на данных Федеральной службы государственной статистики⁵. Из представленной диаграммы видно, что уровень цифровой активности в последние годы увеличивается. Так, в 2022 г. был зафиксирован наивысший уровень в области животноводства (8,9%), а в 2021 г. — в области растениеводства (8,8%).

Сдерживающие факторы цифровизации агропромышленного комплекса и пути их преодоления

Были выделены несколько ключевых аспектов, оказывающих сдерживающее влияние на развитие отрасли с точки зрения цифровых технологий.

(1) Многие предприятия сталкиваются с такой проблемой, как ограниченность финансовых ресурсов для внедрения современных цифровых технологий. Это приводит к тому, что производственные показатели в сельско-

хозяйственной отрасли оказываются ниже ожидаемых (Архипов и соавт., 2019; Валигурский и соавт., 2019; Добровлянин и соавт., 2022; Рогачева и соавт., 2020; Sari et al., 2020).

(2) В настоящее время актуальной проблемой является недостаток квалифицированных кадров в области информационных технологий, в частности, IT-специалистов. В условиях быстрого развития цифровых технологий возрастает необходимость в дополнительном обучении и переподготовке специалистов. Отсутствие необходимых компетенций ставит под угрозу успешную реализацию намеченных целей и стратегий (Архипов и соавт., 2019; Валигурский и соавт., 2019; Добровлянин и соавт., 2022; Рогачева и соавт., 2020; Чеккуева, 2019; Rajesh et al., 2022).

(3) Наблюдается недостаточное развитие цифровой инфраструктуры в сельской местности. Государственные программы поддержки направлены на крупные агрохолдинги, что ограничивает возможности малых и средних хозяйств в использовании передовых технологий. Для эффективного развития АПК необходимо обеспечить равные условия и возможности как для крупных, так и для мелких хозяйств (Архипов и соавт., 2019; Валигурский и соавт., 2019; Жуплей, 2021; Рогачева и соавт., 2020; Чеккуева, 2019; Wei et al., 2019; Rehman et al., 2022).

⁵ Федеральная служба государственной статистики. Технологическое развитие отраслей экономики. <https://rosstat.gov.ru/folder/11189>

- (4) Одной из основных проблем на сегодняшний день в сфере АПК является недостаточное обеспечение современной техникой. Имеющаяся сельскохозяйственная техника устарела, сильно изношена, техническое обеспечение не соответствует современным требованиям и технологиям (Валигурский и соавт., 2019; Чеккуева, 2019; Hassoun et al., 2023).

Несмотря на вышеперечисленные вызовы, Россия осознает необходимость ускорения цифровой трансформации АПК. Правительство предпринимает шаги по преодолению препятствий и созданию условий для внедрения цифровых технологий в сельское хозяйство.

Особую важность в ускорении процесса цифровизации в АПК России приобретает создание специализированной платформы для эффективной обработки и безопасного хранения данных, что позволит в дальнейшем использовать собранные данные для принятия обоснованных и целенаправленных управленческих решений. Кроме того, важным шагом в развитии цифровизации агропромышленного комплекса России является разработка и внедрение единого анонимного банка данных (Кострова и соавт., 2020; Трушкин и соавт., 2022).

Не менее значимыми являются пересмотр и корректировка вектора программы Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, направленной на ускорение цифровизации. Эти изменения предполагают расширение мер поддержки, ориентированных в первую очередь на развитие и укрепление позиций малого и среднего бизнеса в агропромышленном комплексе. Такая стратегия способна стимулировать рост цифровизации в АПК России.

По оценкам экспертов, к 2030 г. масштабное внедрение цифровых технологий в сельскохозяйственное производство может привести к значительному увеличению производительности труда, которое составит 15,6%. Также ожидается значительное повышение объемов производства в зависимости от типа предприятия и может колебаться от 3 до 5%. Кроме того, цифровизация способна помочь снизить себестоимость продукции на 5–20%, что, в свою очередь, приведет к существенному увеличению прибыли, оцениваемой в 800 миллиардов рублей ежегодно (Шатохин и соавт., 2021).

В ответ на глобальные тенденции российские власти разрабатывают стратегические меры по ускорению цифровой трансформации АПК. Заинтересованность государства в развитии цифровизации подтверждается значительным количеством законопроектов, начиная с 2010 г⁶. Главным документом, который в конце ноября 2023 г. утвердил М. Мишустин, стало распоряжение Правительства РФ «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 года», основной целью которого стало достижение технологического суверенитета России. Роль цифровизации в этих процессах получила новое звучание — на смену «Цифровой экономике» в 2025 г. придет нацпроект «Экономика данных». Поставлена цель: к 2030 г. доля отечественной высокотехнологичной продукции должна достичь 75%.

⁶ 1. Минсельхоз «Цифровое сельское хозяйство»: ведомственный проект от 2019 г.
2. Минсельхоз «Цифровое сельское хозяйство»: концепция национальной платформы от 2020 г.
3. О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства: указ Президента Российской Федерации от 21.07.2016 № 350
4. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период 2024 года: указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 208
5. О развитии сельскохозяйственной кооперации: федеральный закон Российской Федерации от 03 июля 2016 № 264-ФЗ
6. О развитии цифровой транспортной инфраструктуры: федеральный закон от 29 декабря 2018 № 425-ФЗ
7. О развитии цифровой экономики: федеральный закон от 28 июля 2017 № 289-ФЗ
8. Об утверждении Концепции развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 июля 2010 г. № 12–92-р;
9. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации отраслей агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов РФ на период до 2030 г.: распоряжение Правительства РФ от 23 ноября 2023 года № 3309-р.

Научные исследования и разработки в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья

Современный этап развития научной среды характеризуется большим количеством исследований, направленных на разработку цифровых технологий в области хранения сельскохозяйственного сырья. В настоящий момент актуально семь направлений, в которых используется искусственный интеллект (ИИ) (Рисунок 5).

Направления использования искусственного интеллекта затрагивают все этапы производственно-сбытовой цепочки от планирования производства до упаковки готовой продукции. Так, например, использование интернета вещей, который является системой компьютерных сетей и датчиков, обладающей возможностью сбора и обмена данными, способствует автоматизации процессов производства и обеспечивает дистанционный контроль определенных параметров (газовой среды, температуры, относительной влажности) как в камерах хранения, так и в цепочках поставок, как следствие, снижается воздействие человеческого фактора⁷ (Afreen et al., 2021; Kailaku et al., 2022; Lamberty et al., 2022; Rajesh et al., 2022; Rehman et al., 2022). Нунупаров и соавт. разработали систему сбора, передачи и анализа температурных значений и показателей уровня газовой среды (углекислый газ, метан) при хранении сахарной свеклы в кагатах. Эта система, основанная на беспроводной сети, способна определить точное место зарождения процессов гниения (Нунупаров, 2017). Другими учеными была разработана прогрессивная система My Fruit, основанная на применении интернета вещей во фруктохранилище с автоматическим параметрами РГС. Система позволяет контролировать и поддерживать необходимый уровень O_2 и CO_2 , концентрацию этилена, температуру и относительную влажность в хранилище. В системе предусмо-

трены датчики сканирования цвета продукции для определения ее качества⁸.

«Умные» хранилища для овощей и фруктов позволяют мониторить состояние хранимой продукции с помощью специальных алгоритмов в режиме реального времени. При нарушении условий хранения система исправляет ситуацию и оповещает об изменениях. Автоматизация процессов хранения позволяет снизить затраты на персонал и улучшить условия хранения собранного урожая, а также сократить потери в овощехранилищах на 30 % (Норалиев и соавт., 2020; Idama et al., 2023; Karpagalakshmi et al., 2020; Tileukeev et al., 2023). Так, для автоматизированного хранения овощей было разработано программное обеспечение ПТК «Тургор АМ». Система позволяет создавать оптимальные условия микроклимата в овощехранилище, обеспечивая как ручной, так и автоматический контроль таких технологических процедур, как просушка, лечебный период, охлаждение, основное хранение, адаптация. Управление осуществляется с помощью автоматизированного контроля температуры, влажности, поступления воздуха, а также энергопотребления с построением графиков на ПК⁹. Был разработан прототип программно-аппаратной части системы мониторинга термометрии навального хранения овощей, который позволяет анализировать и прогнозировать процессы порчи, протекающие при хранении. Внедрение датчиков контроля температуры в навальную насыпь овощей позволяет собирать и анализировать данные о температурном режиме внутри хранилища, что, в свою очередь, способствует снижению потерь продукции во время хранения¹⁰. Научно-исследовательской лабораторией автоматизации проектирования разработана система «Агротерм», которая, помимо вышечисленных процессов, предоставляет возможность мониторинга таких процессов, как сортировка и упаковка. Управление технологическими процессами хранилища может выполняться как

⁷ Система дистанционного контроля и контроля температуры. <https://www.sagimuhendislik.com/uzaktan-sicaklik-izleme-ve-kontrol-sistemi.html>

⁸ Новости. EastFruit. <https://east-fruit.ru/novosti/sistema-upravleniya-oborudovaniem-khranilishcha-my-fruit-dlya-ukrainskikh-sadovodov/index.html#:~:text=My%20Fruit%20—%20это%20прогрессивная,от%20дыхания%20фруктов%20до%20минимума>

⁹ Программное обеспечение Тургор АМ. <https://belsnabkomplekt.ru/turgor-am/sostav-turgor/po-turgor-am/>

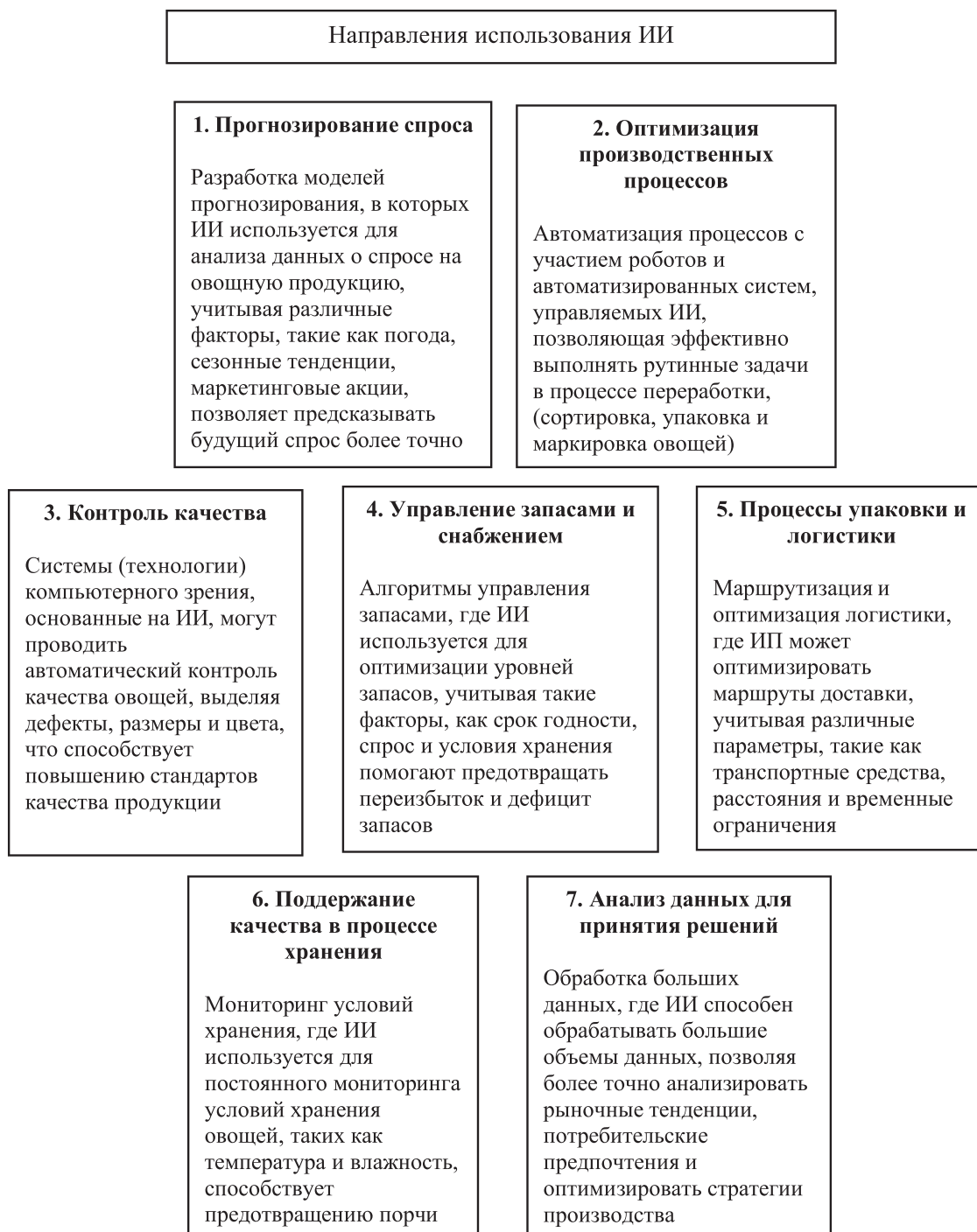
¹⁰ Разработка прототипа программно-аппаратной части системы мониторинга термометрии навального хранения овощей в овощехранилище. <https://pt.2035.university/project/razrabotka-prototipa-programmno-apparatnoj-casti-sistemy-monitoringa-termometrii-navalnogo-hranenia-ovosej-v-ovosehranilise>

Рисунок 5

Направления использования ИИ в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья

Figure 5

Directions of Using AI in the Field of Storage and Processing of Agricultural Raw Materials



Примечание. Составлено с опорой на исследования Chauhan et al. (2022); Hassoun et al. (2023); Mao et al. (2023); Mediavilla et al. (2022); Rathee et al. (2021); Sari (2020); Seyedghorban et al. (2020); Sgarbossa et al. (2022); Tuskov et al. (2020); Wei et al. (2019).

с автоматического рабочего места оператора, так и с контроллера, который находится в овощехранилище¹¹.

Разработана и уже применяется система гиперспектральной визуализации для оценки параметров качества фруктов, овощей и грибов как по определенным переменным (цвет, твердость, кислотность, содержание сахаров), так и по комплексным свойствам (зрелость, созревание, биотические дефекты, физиологические нарушения, механические повреждения, сенсорные качества). Целью гиперспектральной визуализации является получение спектра для каждого пикселя изображения, что необходимо для обнаружения объектов и процессов, а также идентификации материалов (Bai et al., 2024; Guo et al., 2023; Tunny et al., 2023; Wieme et al., 2022).

Разработан ряд оптических систем на основе гиперспектральной визуализации для

- (1) определения созревания бананов путем прогнозирования количества пигмента хлорофилла в кожуре плода (Wangab et al., 2023),
- (2) определения содержания хлорофилла и антоцианов в салате-латуке (Kim et al., 2023),
- (3) определения содержания хлорофилла и каротиноидов в болгарском перце (Paredes et al., 2019),
- (4) прогнозирования содержания растворимых сухих веществ яблок сорта Голден Делишес (Zhang et al. 2019),
- (5) определения степени зрелости в клубнике (Su et al., 2021),
- (6) определения свежести шпината и китайской капусты (He et al., 2024),
- (7) распознавания степени зрелости яблок (Li et al., 2018).

На основе гиперспектральной визуализации Балабановым и соавт. предложена информационно-измерительная система для сортировки яблок в зависимости от их качества в режиме реального времени с одновременной отбраковкой дефектных плодов от качественных (Балабанов и соавт., 2022). Норвежская компания представила систему сортировки для голубики, разработанную путем создания библиотеки с сотнями тысяч изображе-

ний эталонных ягод, относящихся к конкретному сорту и сезону (Hassoun et al., 2023). Также спроектирована интеллектуальная система сортировки томатов. Томаты можно классифицировать в зависимости от спелости в соответствии с их жизненным циклом, который можно определить по цвету: зеленый — на стадии выращивания, желтый — на стадии предварительного созревания и красный — на стадии созревания. Автоматическое извлечение признаков с помощью машинного обучения демонстрирует высокую эффективность в задачах классификации и распознавания изображений (Sari, 2022).

Разработаны системы сортировки с искусственным интеллектом не только для внешнего анализа качества фруктов и овощей, но и для внутреннего контроля качества упакованных фруктов и овощей, позволяющие определять различные болезни, например, гниль (Abdul Aziz et al., 2021; Hassoun et al., 2023; Yang et al., 2022; Zhou et al., 2023).

Для применения в пищевой промышленности созданы интеллектуальные этикетки, способные отслеживать состояние качества продукции и ее микробную обсемененность (Arya et al., 2021; Chen et al., 2023; Liu et al., 2023; Rong et al., 2023; Ronte et al., 2024). Так, представлена разработка умной этикетки, контролирующей температуру во время хранения и транспортировки продукции, требовательной к температуре. Этикетка оснащается светодиодными детекторами, которые загораются при несоблюдении температурного режима, мгновенно информируя человека об этом (Крюк и соавт., 2023). Помимо определения качества продукта, существуют специальные QR-метки для отслеживания продукции в цепочке поставок (Deu et al., 2021; Peltokorpi et al., 2021; Wang et al., 2022; Wang et al., 2021). Было разработано устройство, которое наклеивает QR-метки на каждый фрукт и фиксирует изображение в процессе транспортировки (Hassoun et al., 2023).

¹¹ Автоматизация овощехранилищ или как сохранить урожай зимой. <https://iot.ru/selskoe-khozyaystvo/avtomatizatsiya-ovoshchekhranilishch-ili-kak-sokhranit-urozhay-zimoy>

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фрагментарность цифровых решений

Несмотря на то, что инновационные технологии помогают фермерским хозяйствам оптимизировать производственную деятельность, снижать затраты, повышать эффективность, доступ к подобным решениям остается достаточно фрагментарным. Аграрии отмечают отсутствие комплексного подхода и разрыв цифровых цепочек, что сказывается на скорости развития цифровой трансформации сельскохозяйственного сектора. Наши наблюдения согласуются с результатами исследований Горохова (2021), Жукова и соавт. (2020), которые также отмечают проблему фрагментарности и недостатка интеграции между различными системами в российском сельском хозяйстве. Незамова и соавт. (2022) и Kurnosova et al. (2021) также подчеркивают необходимость перехода от фрагментарных решений к комплексным платформам.

На основе изученных материалов исследований нам удалось выявить причины фрагментарности данного процесса:

- (1) разнообразие форматов данных, используемых различными сельскохозяйственными системами, затрудняет их интеграцию и обмен информацией;
- (2) фермеры часто используют отдельные решения для разных задач, что приводит к разрозненности данных и затрудняет создание единой картины производственного процесса;
- (3) фермерские хозяйства различаются по размерам, специализации и уровню цифровизации, что усложняет создание универсальных цифровых решений;
- (4) в некоторых странах отсутствует четкая государственная политика по цифровизации сельского хозяйства, что приводит к нехватке координации и стимулирования создания интегрированных решений.

Таким образом, проведенный обзор свидетельствует, что несмотря на значительное количество разработанных цифровых инструментов для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, отсутствует единая система (платформа), интегрирующая все этапы производственного цикла.

Использование информационных технологий наряду с традиционными методами определения качества

В результате нашего исследования выявлено, что, несмотря на значительное количество разработанных цифровых инструментов для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, их интеграция с традиционными лабораторными методами определения качества остается слабым звеном. Наши наблюдения согласуются с результатами исследований Behera et al. (2020), Rizzo et al. (2023), которые подчеркивают, что искусственный интеллект эффективен в определении степени зрелости фруктов, но не заменяет полностью традиционные методы анализа состава и качественных показателей. Bhargava et al. (2021), Korchagin et al. (2021) также отмечают, что система компьютерного зрения эффективна в отбраковке дефектных овощей, но ее точность может быть повышена путем интеграции с данными лабораторных анализов.

На основе изученных материалов исследований нам удалось выявить причины необходимости совместного использования информационных технологий с традиционными методами определения качества в лабораторных условиях:

- (1) традиционные методы, такие как визуальная оценка, измерение параметров качества и анализ химических свойств продуктов зарекомендовали себя как надежные и общепринятые подходы, однако и у них есть свои преимущества и ограничения. Внедрение искусственного интеллекта может повысить точность и производительность этих методов, а также расширить их возможности через применение новых технологий, таких как машинное обучение, обработка изображений и анализ данных;
- (2) традиционные методы могут оказаться недостаточно эффективными для работы с большими объемами данных; задачи, связанные с обработкой данных, имеют большое значение и часто требуют решения. Искусственный интеллект может помочь в обработке данных в реальном времени, автоматизации процессов и принятии быстрых решений на основе большого объема информации;
- (3) интеграция искусственного интеллекта с традиционными методами позволит создать более точные и надежные системы контроля

Рисунок 6

Взаимосвязь науки и цифровизации

Figure 6

The Relationship Between Science and Digitalization



качества продукции, что сделает процессы хранения и переработки овощей и фруктов более эффективными, экономичными и безопасными для потребителей (Рисунок 6).

Интеграция искусственного интеллекта с традиционными лабораторными методами позволит:

- (1) анализировать большие объемы данных и находить закономерности, которые не видны человеческому глазу, тем самым повышая точность прогнозов и выводов;
- (2) автоматизировать рутинные задачи, освобождая специалистов для решения более сложных проблем;
- (3) снизить риски путем выявления отклонений от норм и предупреждать о потенциальных проблемах, что, в свою очередь, повышает безопасность процессов.

Таким образом, интеграция искусственного интеллекта с лабораторными методами позволит создать более полное представление о качестве продукции, увеличить точность и скорость анализа, а также обеспечить более эффективное и безопасное хранение и переработку овощей и фруктов.

Единые стандарты обмена данными

Для успешной интеграции искусственного интеллекта с лабораторными методами необходимо решить проблему взаимосвязи между различными системами и платформами. Важно разработать единые стандарты обмена данными и комплексные решения, которые объединяют искусственный интеллект с традиционными лабораторными анализами.

Унификация стандартов и координация между системами позволит

- (1) различным системам взаимодействовать между собой, создавая единую информационную среду;
- (2) упростить интеграцию различных систем и сократить время и затраты на этот процесс;
- (3) легко расширить и модифицировать систему, добавляя новые данные и функциональность.

Создания комплексной платформы

Необходимость создания комплексной платформы, которая будет обеспечивать интеграцию данных из разных систем и позволит фермерам получать единую картину производственного процесса, подтверждается мнениями некоторых авторов (Алтухов и соавт., 2020, Архипов и соавт., 2019).

Комплексные платформы должны учитывать разнообразие потребностей фермерских хозяйств и обеспечивать гибкость в применении. Кроме того, важно разрабатывать комплексные платформы на основе единых стандартов для обмена данными, которые бы обеспечивали интеграцию искусственного интеллекта с традиционными лабораторными методами. Это создаст условия для повышения квалификации специалистов в области цифровых технологий в сельском хозяйстве.

Разработка комплексных платформ позволит

- (1) повысить эффективность производственного процесса, т. е. объединение данных из разных систем обеспечит целостное представление о процессе, выявит узкие места и содействует оптимизации работы;
- (2) улучшить качество принимаемых решений, комплексный анализ данных позволит получить более точные и аргументированные

- решения, основанные на всей доступной информации;
- (3) сократить время на анализ и обработку данных, т. е. автоматизация процессов сбора, обработки и анализа данных существенно сэкономит время и ресурсы;
 - (4) оптимизировать использование ресурсов (вода, удобрения, пестициды), сократить потери урожая, повысить точность прогнозов погоды и предрасположенности к болезням, что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению производительности;
 - (5) снизить трудозатраты, а контроль качества на всех этапах производства, оптимизация условий хранения и повышение безопасности пищевых продуктов обеспечат высокое качество продукции;
 - (6) минимизировать риски, связанные с климатическими изменениями и болезнями, что способствует предотвращению потерь урожая;
 - (7) повысить конкурентоспособность агропромышленного комплекса на внутреннем и международном рынке.

В результате проведенного обзора выявлен значительный потенциал применения цифровых технологий в сфере хранения и переработки сельскохозяйственного сырья (включающий оптимизацию производственных процессов, снижение затрат и повышение эффективности), однако также были обнаружены существенные ограничения. К числу последних относятся: фрагментарность существующих решений, слабая интеграция цифровых инструментов с традиционными лабораторными методами и отсутствие единых стандартов для обмена данными. Указанные проблемы подробно рассматриваются в научной литературе и подтверждают наличие системных барьеров, препятствующих эффективному внедрению цифровых технологий в агропромышленный комплекс. Вместе с тем, в ходе анализа были выявлены и менее ожидаемые аспекты. Во-первых, несмотря на активное развитие технологий искусственного интеллекта, их интеграция с традиционными методами оценки качества продукции остается на недостаточном уровне, что ограничивает полноту аналитических возможностей и достоверность принимаемых решений. Во-вторых, отсутствует целостная стратегическая рамка цифровизации отрасли: недостаток согласованных мер координации и поддержки на государственном уровне существенно затрудняет фор-

мирование интегрированных цифровых решений и устойчивое развитие цифровой трансформации сельского хозяйства. Выявленные аспекты формируют основу для дальнейших теоретических и прикладных исследований в данной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обзора предметного поля было выявлено, что цифровые технологии, применяемые в хранении и переработке сельскохозяйственного сырья, обладают значительным потенциалом для оптимизации производственных процессов, снижения затрат и повышения эффективности. Однако существующие цифровые решения отличаются фрагментарностью и недостаточной интеграцией между собой, что препятствует созданию единой картины производственного процесса и ограничивает возможности для эффективного использования цифровых технологий в сельском хозяйстве.

В ходе исследования были успешно систематизированы и обобщены существующие цифровые методы и технологии, применяемые в хранении и переработке сельскохозяйственного сырья, выявлены их сильные стороны, ограничения и перспективы интеграции с традиционными лабораторными методами определения качества. Кроме того, были установлены ключевые факторы, препятствующие комплексному внедрению цифровых решений, а именно отсутствие единых стандартов для обмена данными и недостаточная координация между различными системами и платформами.

Полученные результаты подтверждают необходимость перехода от фрагментарных решений к комплексным платформам, которые обеспечивают интеграцию данных из разных систем и позволяют фермерам получать целостную картину производственного процесса. Интеграция искусственного интеллекта с традиционными лабораторными методами оценки качества является важным направлением для повышения эффективности и безопасности хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки стратегии цифровизации сельского хозяйства, направленной на создание единой платформы для обмена данными и интеграции раз-

личных цифровых решений. Кроме того, результаты могут быть использованы для разработки новых цифровых решений, учитывающих необходимость интеграции с традиционными лабораторными методами определения качества.

Исследование было проведено на основе анализа существующей научной литературы и не включало практические эксперименты, что ограничивает возможности для более глубокого анализа практических аспектов внедрения цифровых технологий в сельском хозяйстве. В связи с этим необходимо провести дополнительные исследования по интеграции искусственного интеллекта с традиционными лабораторными методами определения качества, разработке единых стандартов для обмена данными, а также созданию комплексных платформ для управления производственными процессами в сельском хозяйстве.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Татьяна Викторовна Першакова: концептуализация; разработка методологии исследования; руководство исследованием; редактирование рукописи.

Григорий Анатольевич Купин: формулирование цели и задач исследования; проведение исследования; визуализация.

Татьяна Викторовна Яковлева: разработка модели исследования; подготовка и создание рукописи,

в частности, написание окончательного текста рукописи.

Юлия Николаевна Чернявская: подготовка и создание черновика рукописи, в частности, написание первоначального текста рукописи.

Дарья Вадимовна Котвицкая: подготовка и создание черновика рукописи, в частности, написание первоначального текста рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatiana Viktorovna Pershakova: conceptualization, development of research methodology; research management; editing of the manuscript.

Grigory Anatolyevich Kupin — formulation of research goals and objectives; conducting research; visualization.

Tatiana Viktorovna Yakovleva — development of a research model; preparation and creation of a manuscript, in particular, writing the final text of the manuscript.

Yulia Nikolaevna Chernyavskaya — preparation and creation of a draft manuscript, in particular, writing the original text of the manuscript.

Daria Vadimovna Kotvitskaya — preparation and creation of a draft manuscript, in particular, writing the original text of the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Алтухов, А. И., Дудин, М. Н., & Анищенко, А. Н. (2020). Цифровая трансформация как технологический прорыв и переход на новый уровень развития агропромышленного сектора России. *Продовольственная политика и безопасность*, 7(2), 81–96.
- Altukhov, A. I., Dudin, M. N., & Anishchenko, A. N. (2020). Digital transformation as a technological breakthrough and transition to a new level of development of the agro-industrial sector in Russia. *Food Policy and Security*, 7(2), 81–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/ppib.7.2.100923>
- Архипов, А. Г., Горбачев, М. И., Косогор, С. Н., Моторин, О. А., Суворов, Г. А., & Труфляк, Е. В. (2019). Цифровая трансформация сельского хозяйства России.. Москва: Росинформагротех.
- Arkhipov, A. G., Gorbachev, M. I., Kosogor, S. N., Motorin, O. A., Suvorov, G. A., & Truflyak, E. V. (2019). Digital transformation of agriculture in Russia. Moskva: Rosinformagrotekh.
- Балабанов, П. В., Жиркова, А. А., Дивин, А. Г., Егоров, А. С., Мищенко, С. В., & Шишкина, Г. В. (2022). Информационно-измерительная система для управления процессом сортировки овощей и фруктов. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 28(4), 526–533.

- Balabanov, P. V., Zhirkova, A. A., Divin, A. G., Egorov, A. S., Mishchenko, S. V., & Shishkina, G. V. (2022). An information-measuring system to monitor vegetable and fruit sorting process. *Transactions TSTU*, 28(4), 526–533. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.04>
- Валигурский, Д. И., Кузьмина, Т. Т., Рыжова, И. О., Савенко, В. Г., & Гаврилюк, М. В. (2019). Оценка и прогноз развития агропромышленного комплекса. *Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики*, (4), 118–127.
- Valigursky, D. I., Kuzmina, T. T., Ryzhova, I. O., Savenko, V. G., & Gavrilyuk, M. V. (2019). Assessment and forecast of development of the agroindustrial complex. *Fundamental'nye i Prikladnye Issledovaniya Kooperativnogo Sektora Ekonomiki*, (4), 118–127. (In Russ.).
- Водясов, П. В. (2018). Фактическая и нормативная самообеспеченность продовольствием. *Агропродовольственная экономика*, (4), 13–20.
- Vodyasov, P. V. (2018). Actual and regulatore self-sufficiency in food. *Agroprodovol'stvennaja Ekonomika*, (4), 13–20. (In Russ.).
- Горохова, О. В. (2021). Цифровая трансформация агропромышленного сектора России: вызовы и возможности. *Инновации. Наука. Образование*, (47), 373–381.
- Gorokhova, O. V. (2021). Cifrovaja transformacija agropromyshlennogo sektora Rossii: Vyzovy i vozmozhnosti. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie*, (47), 373–381. (In Russ.).
- Добровлянин, В. Д., & Антинескул, Е. А. (2022). Цифровизация сельского хозяйства: текущий уровень цифровизации в Российской Федерации и перспективы дальнейшего развития. *Цифровые модели и решения*, 1(2), 59–74.
- Dobrovlyanin, V. D., & Antineskul, E. A. (2022). Digitalization is developing: The level of digitalization in Russia and the prospects for sustainable development. *Digital Models and Solutions*, 1(2), 59–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2782-4934-2022-1-2-5>
- Жукова, М. А., & Улезько, А. В. (2020). Концептуальный подход к формированию цифровой платформы агропродовольственного комплекса. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 13, (4), 238–250.
- Zhukova, M. A., & Ulez'ko, A. V. (2020). Conceptual approach to creating a digital platform for the agro-food complex. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 13, (4), 238–250. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.4.238>
- Жуплей, И. В. (2021). Теоретические аспекты цифровизации сельского хозяйства России. *Повышение экономической эффективности работы организаций в условиях цифровой экономики* (с. 22–25). Чебоксары: Среда.
- Zhuplej, I. V. (2021). Teoreticheskie aspekty cifrovizacii sel'skogo hozjajstva Rossii. *Povyshenie jekonomicheskoj jeffektivnosti raboty organizacij v uslovijah cifrovoj jekonomiki* (s. 22–25). (In Russ.). Cheboksary: Sreda.
- Клюкин, А. Д. (2022). Современное развитие цифровизации АПК: отечественный и зарубежный опыт. *Аграрная экономика*, (12), 72–86.
- Kliukin, A. D. (2022). Modern development of digitalization of the agroindustrial complex: Domestic and foreign experience. *Agrarian Economics*, (12), 72–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1818-9806-2022-12-72-86>
- Кострова, Ю. Б., & Шибаршина, О. Ю. (2020). К вопросу о необходимости цифровизации АПК. *Заметки ученого*, (7), 92–94.
- Kostrova, Ju. B., & Shibarshina, O. Ju. (2020). On the need for digitalization of the agro-industrial complex. *Zametki Uchenogo*, (7), 92–94. (In Russ.).
- Крюк, Р. В., Фомин, А. Ю., Курбанова, М. Г., Мухим-заде, М., & Крюк, В. А. (2023). Интеллектуальные датчики для контролирования сроков годности пищевых продуктов. *Холодильная техника и биотехнологии: сборник тезисов IV национальной конференции* (с. 130–131). Барнаул: Алтайский государственный технический университет.
- Krjuk, R. V., Fomin, A. Ju., Kurbanova, M. G., Muhim-zade, M., & Krjuk, V. A. (2023). Intellectual'nye datchiki dlja kontrolirovaniya srokov godnosti pishhevyh produktov. *Holodil'naja Tehnika i Biotehnologii: Sbornik tezisov IV nacional'noj konferencii* (s. 130–131). Barnaul: Altai State Technical University. (In Russ.).
- Кудинова, М. Г., & Кузнецова, А. В. (2023). Основные направления обеспечения продовольственной безопасности и уровня самообеспечения сельскохозяйственной продукцией населения Алтайского края. *Вектор экономики*, 11(89).

- Kudinova, M. G., & Kuznetsova, A. V. (2023). The main directions of ensuring food security and the level of self-sufficiency in agricultural products of the population of the Altai Territory. *Vectoreconomy*, 11(89). (In Russ.).
- Незамова, О. А., Ступина, А. А., & Оленцова, Ю. А. (2022). Цифровизация как основной тренд развития сельского хозяйства. *Азимут научных исследований: экономика и управление*, 11(2), 72–76. <https://doi.org/10.57145/27128482-2022-11-02-16>
- Nezamova, O. A., Stupina, A. A., & Olentsova, Yu. A. (2022). Digitalization as the main trend in the development of agriculture. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*, 11(2), 72–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.57145/27128482-2022-11-02-16>
- Норалиев, Н. Х., & Юсупова, Ф. Э. (2020). Цифровые технологии в сельском хозяйстве. *Вопросы науки и образования*, 8(92), 4–10.
- Noraliev, N. H., & Jusupova, F. Je. (2020). Cifrovye tehnologii v sel'skom hozjajstve. *Voprosy Nauki i Obrazovaniya*, 8(92), 4–10. (In Russ.).
- Нунупаров, М. С. (2017). Интернет Вещей в хранении сахарной свеклы в кагатах. *Сахар*, (7), 40–41.
- Nunuparov, M. S. (2017). Internet Veshhej v hranenii saharnoj svekly v kagatah. *Sahar*, (7), 40–41. (In Russ.).
- Рогачева, Н. О., Барсукова, Н. В., & Ванюшина, О. И. (2020). Цифровизация сельского хозяйства Рязанского региона. Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (вып. 5, с. 270–273). Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет.
- Rogacheva, N. O., Barsukova, N. V., & Vanjushina, O. I. (2020). Cifrovizacija sel'skogo hozjajstva Rjazanskogo regiona. *Molodezh' i nauka: shag k uspehu, Sbornik nauchnyh statej 4-j Vserossijskoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh* (vol. 5, s. 270–273). (In Russ.). Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University.
- Салтанова, Т. А., & Митина, И. А. (2022). Цифровая трансформация агропромышленного комплекса Российской экономики. *Вестник Ростовского государственного экономического университета*, 1(77), 45–51. <https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.90.79.006>
- Saltanova, T. A., & Mitina, I. A. (2022). Digital transformation of the agro-industrial complex of Russian economy. *Vestnik of Rostov State University of Economics*, 1(77), 45–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.90.79.006>
- Сибиряев, А. С. (2023). Методика обоснования внедрения цифровых платформ в отрасли сельского хозяйства. *Вестник НГИЭИ*, 12, 125–135. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-12-125-135>
- Sibiryaev, A. S. (2023). Methodology for justification of implementation of digital platforms in the agriculture industry. *Bulletin NGIEI*, 12, 125–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2023-12-125-135>
- Трушкин, В. А., Глушкина, А. А., & Царина, С. Б. (2022). Перспективы цифровизации в агропромышленном комплексе. *Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы XIII Национальной научно-практической конференции* (с. 168–171). Саратов: Амирит.
- Trushkin, V. A., Glushkina, A. A., & Carina, S. B. (2022). Perspektivy cifrovizacii v agropromyshlennom komplekse. *Aktual'nye Problemy Jenergetiki APK: Materialy XIII Nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii* (s. 168–171). (In Russ.). Saratov: Amirit.
- Чеккуева, Л. К. (2019). Преимущества и недостатки цифровизации сельского хозяйства России. *Kant*, 4(33), 108–112.
- Chekkueva, L. K. (2019). Advantages and disadvantages of digitalization of agriculture in Russia. *Kant*, 4(33), 108–112. (In Russ.).
- Шатохин, М. В., Гордеев, И. А., Игнатова, М. Н., & Кремер, К. А. (2021). Состояние и перспективы цифровизации регионального АПК. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, (8), 102–109.
- Shatokhin, M. V., Gordeev, I. A., Ignatova, M. N., & Kremer, K. A. (2021). State and prospects of digitalization of the regional agricultural industry. *Vestnik Kurskoj Gosudarstvennoj Sel'skhozjajstvennoj Akademii*, (8), 102–109. (In Russ.).
- Шереужева, М. А. (2020). Роль государства в развитии АПК и направления поддержки отрасли. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*, 10(9–1), 407–414. <https://doi.org/10.34670/AR.2020.39.44.046>

- Shereuzheva, M. A. (2020). The role of the state in the development of agriculture and the direction of support for the industry. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*, 10(9–1), 407–414. (In Russ.). <https://doi.org/10.34670/AR.2020.39.44.046>
- Abdul Aziz, M. F., Bukhari, W. M., Sukhaimie, M. N., Izzuddin, T. A., Norasikin, M. A., Rasid, A. F. A., & Bazilah, N. F. (2021). Development of smart sorting machine using artificial intelligence for chili fertigation industries. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 15(4), 44–52. <https://doi.org/10.14313/JAMRIS/4-2021/26>
- Afreen, H., & Bajwa, I. S. (2021). An IoT-based real-time intelligent monitoring and notification system of cold storage. *IEEE Access*, 9, 38236–38253. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056672>
- Arya, P. S., & Gangwar, M. (2021). A proposed architecture: Detecting freshness of vegetables using Internet of Things (IoT) & deep learning prediction algorithm. *3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking* (pp. 718–723). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAC3N53548.2021.9725428>
- Bai, Sh., Xiaoab, K., Liua, Q., Mariga, A. M., Yang, W., Fanga, Y., Hua, Q., Gao, H., Chen, H., & Pei, F. (2024). Prediction of moisture content of *Agaricus bisporus* slices as affected by vacuum freeze drying using hyperspectral imaging. *Food Control*, 159, 110290. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110290>
- Behera, S. K., Rath, A. K., Mahapatra, A., & Sethy, P. K. (2020). Identification, classification & grading of fruits using machine learning & computer intelligence: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01865-8>
- Bhargava, A., & Bansal, A. (2021). Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(3), 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.06.002>
- Chauhan, A., Brouwer, B., & Westra, E. (2022). Robotics for a quality-driven post-harvest supply chain. *Current Robotics Reports*, 3(2), 39–48. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00075-8>
- Chen, B., Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., & Guo, Z. (2023). Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables: a review. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112261. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112261>
- Dey, S., Saha, S., Singh, A. K., & McDonald-Maier, K. (2021). FoodSQRBlock: Digitizing food production and the supply chain with blockchain and QR code in the cloud. *Sustainability*, 13(6), 3486. <https://doi.org/10.3390/su13063486>
- Guo, X., Tseung, Ch., Zare, A., & Liu, T. (2023). Hyperspectral image analysis for the evaluation of chilling injury in avocado fruit during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 206, 112548. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112548>
- Hassoun, A., Jagtap, S., Garcia-Garcia, G., Trollman, H., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., Trif, M., Rusu, A. V., Aadil, R. M., Šimat, V., Cropotova, J., & Câmara, J. S. (2023). Food quality 4.0: From traditional approaches to digitalized automated analysis. *Journal of Food Engineering*, 337, 111216. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111216>
- Hassoun, A., Kamiloglu, S., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Trollman, H., Jagtap, S., Aadil, R. M., & Esatbeyoglu, T. (2023). Implementation of relevant fourth industrial revolution innovations across the supply chain of fruits and vegetables: A short update on Traceability 4.0. *Food Chemistry*, 409, 135303. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135303>
- He, M., Li, C., Cai, Z., Qi, H., Zhou, L., & Zhang, C. (2024). Leafy vegetable freshness identification using hyperspectral imaging with deep learning approaches. *Infrared Physics & Technology*, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105216>
- Idama, O., & Ekruyota, O. G. (2023). Design and development of a model smart storage system. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(1), 125–132. <https://doi.org/10.46592/turkager.1297511>
- Kailaku, S. I., & Djatna, T. (2022). Traceability and quality monitoring improvement throughout carrot supply chain with the implementation of Internet-Of-Things. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1024(1), 012079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012079>
- Karpagalakshmi, R. C., Bharathkumar, S., Vignesh, R., Yogaraj, M., & Naveenkumar, A. (2020). Implementation of automated low cost data warehouse for preserving and monitoring vegetables and fruits. *Journal of Engineering Sciences*, 11(11), 146–151. <https://doi.org/10.15433/JES.2020.V11I11.43P.25>

- Kim, Ch., & Iersel, M. W. (2023). Image-based phenotyping to estimate anthocyanin concentrations in lettuce. *Front. Plant Sci*, 14, 1155722. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1155722>
- Korchagin, S. A., Gataullin, S. T., Osipov, A. V., Smirnov, M. V., Suvorov, S. V., Serdechnyi, D. V., & Bublikov, K. V. (2021). Development of an optimal algorithm for detecting damaged and diseased potato tubers moving along a conveyor belt using computer vision systems. *Agronomy*, 11(10), 1980. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101980>
- Kurnosova, N. S., Kurnosov, S. A., & Ulez'ko, A. V. (2021). About models of agriculture digital transformation. *Conference series: Earth and Environmental Science*, 786(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/786/1/012011>
- Lamberty, A., & Kreyenschmidt, J. (2022). Ambient parameter monitoring in fresh fruit and vegetable supply chains using internet of things-enabled sensor and communication technology. *Foods*, 11(12), 1777. <https://doi.org/10.3390/foods11121777>
- Li, X., Li, R., Wang, M., Liu, Y., Zhang, B., & Zhou, J. (2018). Hyperspectral imaging and their applications in the nondestructive quality assessment of fruits and vegetables. *Hyperspectral Imaging in Agriculture, Food and Environment*, 27–63. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72250>
- Liu, R., Ning, Y., Ren, Z., Xu, Sh., Cheng, Q., Yang, D., & Wang, L. (2023). An antibacterial and intelligent cellulose-based label self-assembled via electrovalent bonds for a multi-range sensing of food freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125205. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125205>
- Mao, Z., & Zhang, Q. (2023). Application process design of digital quality monitoring and traceability system for fresh agricultural products. *Digitalization and Management Innovation*, 34–42. <https://doi.org/10.3233/FAIA230005>
- Mediavilla, M. A., Dietrich, F., & Palm, D. (2022). Review and analysis of artificial intelligence methods for demand forecasting in supply chain management. *Procedia CIRP*, 107, 1126–1131. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.119>
- Mitrofanova, I. V., Inshakova, E. I., & Dovbiy, I. P. (2023). Digitalization of the Russian agro-industrial complex: modern trends and development problems. *Journal of Volgograd state university. Economics*, 25(2), 59–71. <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2023.2.5>
- Paredes, A. C., Peche, J. Y., & León, N. (2019). Index of carotenoids of bell pepper (*Capsicum annuum*) based on color measurement, using hyperspectral and digital images. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 531–539 <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.10>
- Peltokorpi, J., Isojärvi, L., Häkkinen, K., & Niemi, E. (2021). QR code-based material flow monitoring in a subcontractor manufacturer network. *Procedia Manufacturing*, 55, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.016>
- Rajesh, K., Riyaz, K., Pallavi, B., Reddy, C. S. S., Raamkumar, A., & Baranitharan, B. (2022). A Smart Agriculture Storing System with IOT Based. *International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICICCSPP53532.2022.9862427>
- Rathee, G., Khelifi, A., & Iqbal, R. (2021). Artificial intelligence-(AI-) enabled Internet of Things (IoT) for secure big data processing in multihoming networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 5754322. <https://doi.org/10.1155/2021/5754322>
- Rehman, A., Saba, T., Kashif, M., Fati, S. M., Bahaj, S. A., & Chaudhry, H. (2022). A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. *Agronomy*, 12(1), 127. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010127>
- Rizzo, M., Marcuzzo, M., Zangari, A., Gasparetto, A., & Albarelli, A. (2023). Fruit ripeness classification: A survey. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 7, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2023.02.004>
- Rong, L., Zhang, T., Ma, Y., Wang, T., Liu, Y., & Wu, Zh. (2023). An intelligent label using sodium carboxymethyl cellulose and carrageenan for monitoring the freshness of fresh-cut papaya. *Food Control*, 145, 109420. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109420>
- Ronte, A., Chalitangkoon, J., Foster, E. J., & Monvisade, P. (2024). Development of a pH-responsive intelligent label using low molecular weight chitosan grafted with phenol red for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266(1), 131212. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131212>
- Sari, M. I., Fajar, R., Gunawan, T., & Handayani, R. (2022). The Use of image processing and sensor in tomato sorting machine by color, Size, and weight. *International Journal on Informatics Visualization*, 6(1–2), 244–249. <http://dx.doi.org/10.30630/joiv.6.1-2.944>

- Sarı, T. (2020). Responsive demand management in the era of digitization. *Strategic Outlook for Innovative Work Behaviours*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50131-016>
- Seyedghorban, Z., Tahernejad, H., Meriton, R., & Graham, G. (2020). Supply chain digitalization: Past, present and future. *Production Planning & Control*, 31(23), 96–114. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1631461>
- Sgarbossa, F., Romsdal, A., Oluyisola, O. E., & Strandhagen, J. O. (2022). Digitalization in production and warehousing in food supply chains. *The Digital Supply Chain*, 273–287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91614-1.00016-2>
- Su, Zh., Zhang, Ch., Yan, T., Zhu, J., Zeng, Y., Lu, X., Gao, P., Feng, L., He, L., & Fan, L. (2021). Application of hyperspectral imaging for maturity and soluble solids content determination of strawberry with deep learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, 12, 736334. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.736334>
- Tileukeev, Z., Nesipbek, A., & Imashbai, A. (2023). Evaluating and optimizing energy-efficient microclimate control systems in vegetable storage facilities. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 2023, 18(3), 623–630. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180314>
- Tunny, S. S., Kurniawan, H., Amanah, H. Z., Baek, I., Kim, M. S., Chan, D., Faqeerzada, M. A., Wakholi, C., & Cho, B. K. (2023). Hyperspectral imaging techniques for detection of foreign materials from fresh-cut vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 201, 112373. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112373>
- Tuskov, A., Goldina, A., Luzgina, O., & Salnikova, O. (2020). Optimizing the production parameters of peasant holdings for industrial development in the digitalization era. *Avatar-Based Control, Estimation, Communications, and Development of Neuron Multi-Functional Technology Platforms* (pp. 132-151). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1581-5.ch007>
- Wang, L., He, Y., & Wu, Z. (2022). Design of a blockchain-enabled traceability system framework for food supply chains. *Foods*, 11(5), 744. <https://doi.org/10.3390/foods11050744>
- Wang, L., Xu, L., Zheng, Z., Liu, S., Li, X., Cao, L., Li, J., & Sun, C. (2021). Smart contract-based agricultural food supply chain traceability. *IEEE Access*, 9, 9296–9307. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050112>
- Wangab, M., Tianac, Q., Lia, H., Daid, L., Wane, Y., Wanga, M., Huang, B. H., Zhang, Y., & Chen, J. (2023). Visualization and metabolome for the migration and distribution behavior of pesticides residue in after-ripening of banana. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130665. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130665>
- Wei, F., Alias, C., & Noche, B. (2019). Applications of Digital Technologies in Sustainable Logistics and Supply Chain Management. *Innovative Logistics Services and Sustainable Lifestyles* (pp. 235–263). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98467-4_11
- Wieme, J., Mollazade, K., Malounas, I., Zude-Sasse, M., Zhao, M., Gowen, A., Argyropoulos, D., Fountas, S., & Van Beek, J. (2022). Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review. *Biosystems Engineering*, 222, 156–176. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.013>
- Yang, M., Kumar, P., Bhola, J., & Shabaz, M. (2022). Development of image recognition software based on artificial intelligence algorithm for the efficient sorting of apple fruit. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1), 322–330. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01415-1>
- Zhang, D., Xu, Y., Huang, W., Tian, X., Xia, Y., Xu, L., & Fan, Sh. (2019). Nondestructive measurement of soluble solids content in apple using near infrared hyperspectral imaging coupled with wavelength selection algorithm. *Infrared Physics & Technology*, 98, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.03.026>
- Zhou, Z., Zahid, U., Majeed, Y., Nisha, Mustafa, S., Sajjad, M. M., Butt, H. D., & Fu, L. (2023). Advancement in artificial intelligence for on-farm fruit sorting and transportation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1082860. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1082860>

Влияние параметров экстрагирования на характеристики экстрактов из вегетативных частей и плодов *Sórbus aucupária*

Сибирский федеральный научный центр агrobiотехнологий Российской академии наук, п. Краснообск, Российская Федерация

К. Н. Нициевская, С. В. Станкевич, Е. В. Бородай

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Ксения Николаевна Нициевская
E-mail: nitsievskayakn@sfsca.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Нициевская, К.Н., Станкевич, С.В., & Бородай, Е.В. (2025). Влияние параметров экстрагирования на характеристики экстрактов из вегетативных частей и плодов *Sórbus aucupária*. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 49-67. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.1.591>

ПОСТУПИЛА: 20.09.2024

ДОРАБОТАНА: 19.02.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Несмотря на известные биологические свойства рябины красной (*Sórbus aucupária*), методы экстрагирования и оптические характеристики экстрактов из ее вегетативных частей и плодов изучены недостаточно. Углубление этих знаний важно для создания технологий переработки растительного сырья, что открывает новые возможности для пищевой промышленности и использования малоизученных вегетативных частей растения.

Цель: Исследование спектрофотометрических характеристик экстрактов, полученных из вегетативных частей (листьев, веток) и плодов рябины красной сорта Невежинская (*Sórbus aucupária* Nevezhinskaya) для оптимизации технологических процессов экстрагирования.

Материалы и методы: В качестве объектов исследования использовались экстракты из высушенных вегетативных частей (листьев, веток) и плодов рябины красной сорта Невежинская, полученные с использованием очищенной и озонированной воды. Анализ проводился по следующим параметрам: активная кислотность (ионометрический метод), оптическая плотность и коэффициент поглощения (колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2). Статистическая обработка данных с расчетом стандартного отклонения осуществлялась в программе MS Excel. Эксперименты проводились в трехкратной повторности.

Результаты: Активная кислотность экстрактов составила: для плодов – $pH\ 3,16 \pm 0,20$, для листьев – $pH\ 5,50 \pm 0,40$, для веток – $pH\ 4,85 \pm 0,10$. Показатели термодинамической устойчивости варьировались следующим образом: для экстрактов из плодов – 1038,2–1044,1 мВ, из листьев – 898,4–913,7 мВ, из веток – 937,9–944,9 мВ. По цветовым характеристикам экстракты из плодов отличались слабой окраской (0,03–0,04 е.д.), экстракты из листьев характеризовались как интенсивно окрашенные, а экстракты из веток – как умеренно окрашенные. Результаты представлены в виде графиков, таблиц и регрессионных уравнений.

Выводы: Сравнительный анализ показал отсутствие значительных различий между экстрактами, полученными с использованием очищенной и озонированной воды. Измеренные параметры находились в пределах погрешности не более 0,05. Экстракты, полученные из вегетативных частей и плодов рябины красной, обладают антиоксидантным потенциалом для применения в производстве напитков, соусов, кондитерских изделий и других продуктов питания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

рябина красная Невежинская; *Sórbus Aucupária*; активная кислотность; окислительно-восстановительный потенциал экстрактов; вязкость экстрактов

The Effect of Extraction Parameters on the Characteristics of Extracts from Vegetative Parts and Fruits of *Sórbus Aucupária*

Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russian Federation

Kseniya N. Nitsievskaya, Svetlana V. Stankevich, Elena V. Boroday

CORRESPONDENCE:

Kseniya N. Nitsievskaya

E-mail: nitsievskayakn@sfsca.ru

FOR CITATIONS:

Nitsievskaya, K.N., Stankevich, S.V., & Boroday, E.V. (2025). The effect of extraction parameters on the characteristics of extracts from vegetative parts and fruits of *Sórbus Aucupária*. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 49-67. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.591>

RECEIVED: 20.09.2024

REVISED: 19.02.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Despite the known biological properties of red mountain ash (*Sórbus aucupária*), the extraction methods and optical characteristics of extracts from its vegetative parts and fruits are not well examined. Deepening this knowledge is important for creating technologies for processing plant raw materials, which opens up new opportunities for the food industry and the use of poorly studied vegetative parts of the plant.

Purpose: To study the spectrophotometric characteristics of extracts obtained from vegetative parts (leaves, branches) and fruits of red mountain ash (*Sorbus aucuparia* Nevezhinskaya) to optimize extraction processes.

Materials and Methods: Extracts from dried vegetative parts (leaves, branches) and fruits of Nevezhinskaya red mountain ash, obtained using purified and ozonized water, were investigated. The analysis was carried out according to the following parameters: active acidity (ionometric method), optical density and absorption coefficient (photoelectric concentration colorimeter KFK-2). Statistical processing of data with calculation of standard deviation was carried out in MS Excel program. The experiments were carried out in threefold repetition.

Results: The active acidity of the extracts was: for fruits – pH 3.16 ± 0.20 , for leaves – pH 5.50 ± 0.40 , for branches – pH 4.85 ± 0.10 . Thermodynamic stability indicators varied as follows: for extracts from fruits – 1038.2–1044.1 mV, from leaves – 898.4–913.7 mV, from branches – 937.9–944.9 mV. In terms of color characteristics, extracts from fruits were slightly colored (0.03–0.04 e.u.), extracts from leaves were characterized as intensely colored, and extracts from branches were characterized as moderately colored. The results are presented as graphs, tables and regression equations.

Conclusion: The comparative analysis showed no significant differences between the extracts obtained using purified and ozonized water. The measured parameters were within 0.05 error range. Extracts obtained from vegetative parts and fruits of red mountain ash have antioxidant potential for their use in the production of beverages, sauces, confectionery products and other foodstuffs.

KEYWORDS

Nevezhinskaya red mountain ash; *Sórbus Aucupária*; active acidity; redox potential of extracts; viscosity of extracts

ВВЕДЕНИЕ

Разработка технологий производства безалкогольных тонизирующих напитков на растительной основе представляет собой важное направление современной пищевой промышленности. Такой подход позволяет сочетать улучшение органолептических характеристик напитков с повышением их пищевой ценности, что особенно актуально в рамках популяризации здорового образа жизни. Особый интерес вызывает использование местного растительного сырья, обладающего высокой экологической устойчивостью и экономической доступностью. В условиях Сибири перспективным сырьем для получения растительных экстрактов является рябина красная (*Sorbus aucuparia* L.), благодаря её значительному ресурсному потенциалу и низкой себестоимости (Стародубцева, 2019).

Рябина обыкновенная относится к числу нетрадиционных плодовых культур, характеризующихся устойчивостью к неблагоприятным экологическим условиям, стабильностью плодоношения и высокой урожайностью. Биохимический состав рябины включает широкий спектр биологически активных соединений: витамины, сахара, дубильные вещества, пектин, эфирные масла, аминокислоты и органическую сорбиновую кислоту, являющуюся природным консервантом (Cairone et al., 2023; Стародубцева, 2019). Помимо плодов, интерес для исследований представляют листья и ветки, которые также богаты биологически активными веществами. Зарубежные исследования показали, что экстракты из рябины содержат полифенолы, такие как кофейная и хлорогеновая кислоты, обладающие антиоксидантными и противовоспалительными свойствами (Razina, 2016; Šavikin et al., 2017; Krivoruchko, 2018; Bobinaité et al., 2020; Rutkowska, 2021). Эти соединения являются вторичными метаболитами растительных клеток и широко используются в создании функциональных продуктов (Ajila & Rao, 2011; Cairone et al., 2023).

Особое внимание в последнее десятилетие уделяется инновационным методам обработки растительного сырья, таким как использование озонированной воды. Этот метод обладает рядом преимуществ: озонированная вода обеспечивает минимальное повышение температуры при обработке, сохраняет антимикробную активность, обладает хорошей растворимостью и стабильностью,

а также способствует увеличению содержания антиоксидантов и вторичных метаболитов в экстрактах (Бурак, 2022). Более того, озон легко разлагается до кислорода, что исключает образование побочных продуктов разложения, делая метод экологически безопасным.

Важным аспектом разработки напитков является их цвет, который оказывает значительное влияние на психоэмоциональное восприятие продукта потребителем. Цветовые характеристики экстрактов, такие как яркость, насыщенность и цветовой тон, напрямую зависят от содержания биологически активных соединений, включая антоцианы и их производные (Anikina et al., 2019; Campbell, 2021). Исследования показали, что содержание полифенолов в листьях растений может превосходить их количество в плодах, что делает вегетативные части перспективным сырьем для получения экстрактов (Carradori et al., 2020).

Инструментальные методы анализа цветовых характеристик, такие как определение яркости (L^*), угла оттенка (h^*) и цветности (C^*), позволяют получать объективные данные о качестве экстрактов и создают базу для разработки напитков с заданными сенсорными свойствами. Эти подходы широко применяются при оценке качества продуктов, включая спиртные напитки, вина, безалкогольные напитки и экстракты из лекарственных растений (Abramova, 2018; Koldaev, 2020; Plotnikova, 2017; Nechiporenko, 2018; Ревина, 2016; Макаров, 2017; Остроухова, 2015).

Несмотря на значительный объем исследований, остается недостаточно изученным влияние различных параметров экстракции, таких как температура и состав экстрагента, на цветовые характеристики экстрактов из вегетативных частей рябины. Изучение этого вопроса особенно важно для создания инновационных напитков на основе местного растительного сырья, которые соответствовали бы современным требованиям к качеству и органолептическим свойствам.

Цель исследования: исследование спектрофотометрических характеристик экстрактов, полученных из вегетативных частей (листьев, веток) и плодов рябины красной сорта Невежинская (*Sorbus aucuparia Nevezhinskaya*) для оптимизации технологических процессов экстрагирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В работе использовали экстракты, полученные из сухих вегетативных частей (листья и ветки) и плодов рябины красной сорта Невежинская (лат. *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya*), в качестве растворителя использовали очищенную и озонированную воду. Растительное сырье собрано в Новосибирской области в сухую погоду, период сбора — сентябрь 2022 г.

Оборудование

Установка УПВА-159 (г. Белгород, Россия), озонатор бытовой «Озонид — К» (группа компаний «ГРАНАТ» (Россия, г. Санкт-Петербург), сушижарочный шкаф с принудительной вентиляцией «Binder» (Германия), лабораторная мельница ЛМ 201 фирмы «Плаун» (Россия, г. Москва), водяная баня фирмы «Loir» (Россия, г. Санкт-Петербург), центрифуга ИКА mini G (Германия), рН-метр марки Нитрон (Биомер, Россия), термометр Testo 905-T1 (Германия) с погрешностью измерений $\pm 0,5^\circ\text{C}$, колориметр фотоэлектрический концентрационный КФК-2 (ЗОМЗ, Россия).

Инструменты

Стеклопосуда номиналом 100 см³, цилиндры мерные, дистиллированная вода, 1 %-ный соляной раствор, 40 % спирт этиловый, набор кювет.

Методы

Очищенную воду получали согласно требованиям к воде типа II по ГОСТ 52501–2005 «Вода для лабораторного анализа» (посредством фильтрации через установку УПВА-159 г. Белгород, Россия). Озонированную воду получали с использованием озонатора бытового «Озонид — К» (группа компаний «ГРАНАТ», Россия, г. Санкт-Петербург) (процесс контакта молекулы воды с молекулами озона, в результате окисляются и уничтожаются все инородные соединения, в том числе и бактерии). Сырье подвергалось сушке: листья и ветки при естественной сушке ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность 75%), плоды при конвективной сушке (сушижароч-

ный шкаф с принудительной вентиляцией «Binder», Германия) ($T = 55 \pm 3^\circ\text{C}$, конвекции 100%), сушка сырья проводилась до содержания влаги в конечном продукте $6,0 \pm 1,0\%$ (методом Чиждова). Хранение образцов проводили в температурном режиме $t = 20 \pm 3^\circ\text{C}$, влажности воздуха $W = 67 \pm 2\%$. Активную кислотность (рН, е.д.) определяли ионометрическим методом с использованием рН-метра марки Нитрон (Биомер, Россия) с нормальным водородным электродом (НВЭ), который был откалиброван по стандартным показателям буфера (ЗАО научно-производственное инвестиционное предприятие «Уралхиминвест» ТУ 2642–004–33813273–2006 с погрешностью измерений $\pm 0,05$ е.д.). Измерения проводили при температуре $t = 21,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$. Температуру замеряли термометром Testo 905-T1 (Testo, Германия) с погрешностью измерений $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Исследование сухих веществ по ГОСТ 6687.2–90 «Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения сухих веществ». Исследование экстракции проводили оптическими методами: измерением оптической плотности (D , е.д.), коэффициента пропускания (T , %) и коэффициента поглощения (ϵ , е.д.) с использованием колориметра фотоэлектрического концентрационного КФК-2 (ЗОМЗ, Россия).

За контролируемые параметры были взяты следующие показатели: активная кислотность (рН, е.д.), верхняя граница термодинамической стабильности раствора ($\phi_{\text{ст}}$), температура (t , $^\circ\text{C}$), плотность экстракта (г/см³), коэффициент поглощения (ϵ , е.д.), коэффициента пропускания (T , %), интенсивность цвета (I , е.д.), оттенок цвета (T , е.д.), хроматографическая структура, содержание фенольных соединений, % (антоцианов, в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид), дубильных соединений (в пересчете на галловую кислоту) и гидроксикоричные кислоты (в пересчете на хлорогеновую кислоту). Математическую обработку данных с расчетом стандартного отклонения проводили с помощью программы MS Excel, опыты проводились в трехкратной повторности.

Процедура исследования

Для исследования были взяты образцы растительного сырья в сухом измельченном виде (ϕ фракций $\approx 0,5$ см) измельчение проводили на лабораторной мельнице ЛМ 201 фирмы «Плаун» (Россия,

г. Москва) и в виде экстрактов. Для исследований готовили экстракты из измельчённого растительного сырья, путем смешивания навески с очищенной или озонированной водой (рН $6,5 \pm 0,3$ е.д.) в соотношениях 5:100 (г:мл). Экстрагирование проводили в течение 20 мин при температуре 60 ± 2 °С на водяной бане фирмы «Loir» (Россия, г. Санкт-Петербург). Параметры мацерации были следующие: продолжительность экстрагирования на водяной бане 20 минут при температуре ≈ 60 °С. По окончании процесса экстрагирования для удаления взвеси проводили очищение на центрифуге ИКА mini G (Германия) в течении 5 минут при частоте вращения 6000 об/мин. Кодировка образцов осуществлялась в следующей последовательности и представлена в Таблице 1.

Верхнюю границу термодинамической стабильности раствора ($\phi_{ст}$) рассчитывали по следующей формуле (1) (Аристова, 2011):

$$\phi_{ст} = (-59 \cdot \text{pH}) + 1227 \text{ мВ.} \quad (1)$$

Плотность раствора (г/см³) определяли расчетным методом при использовании формулы (2):

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

В работе использовали светофильтры синий ($\lambda = 440$ нм), зеленый ($\lambda = 540$ нм) и красный ($\lambda = 670$ нм). В качестве раствора сравнения использовали дистиллированную воду.

Таблица 1

Кодировка образцов экстрактов *Sorbus aucuparia* (при $p \leq 0,05$)

Table 1

Coding of *Sorbus aucuparia* Extract Samples (at $p \leq 0.05$)

№	Вид сырья	Растворитель	Температура, °С	Продолжительность, мин
1	плоды	очищенная вода	55	60
2	плоды	озонированная вода	55	60
3	плоды	очищенная вода	55	120
4	плоды	озонированная вода	55	120
5	плоды	очищенная вода	55	180
6	плоды	озонированная вода	55	180
7	листья	очищенная вода	55	60
8	листья	озонированная вода	55	60
9	листья	очищенная вода	55	120
10	листья	озонированная вода	55	120
11	листья	очищенная вода	55	180
12	листья	озонированная вода	55	180
13	ветки	очищенная вода	55	60
14	ветки	озонированная вода	55	60
15	ветки	очищенная вода	55	120
16	ветки	озонированная вода	55	120
17	ветки	очищенная вода	55	180
18	ветки	озонированная вода	55	180

Расчеты коэффициента поглощения проводили по формуле (3):

$$\varepsilon = \frac{D}{c \cdot l}, \quad (3)$$

где D — оптическая плотность спектра поглощения, отн. ед.,
 C — концентрация извлечения в массовых процентах, l — длина кюветы, см³.

Интенсивность цвета (I , е.д.) выражалась согласно формуле (4) и с учетом всех пигментов (5) (Аникина, 2019; Рожнов, 2022):

$$I_1 = D_{440} + D_{540}; \quad (4)$$

$$I_2 = D_{440} + D_{540} + D_{640}, \quad (5)$$

где D — оптическая плотность спектра поглощения, отн. ед.,

Установлено, что интенсивность цвета I менее 0,10 характеризовала экстракты как слабо окрашенные, от 0,11 до 0,30 как средне окрашенные, от 0,31 до 0,50 хорошо окрашенные, более 0,51 интенсивно окрашенные [Аникина, Н.С., 2019].

Определяли долю красной окраски в сложении цвета в виде показателя $dA(\%)$ по формуле (6) (Аникина, 2019):

$$dA(\%) = \left(1 + \frac{D_{440} + D_{640}}{2 \cdot D_{540}}\right) * 100. \quad (6)$$

Оттенок цвета (T , е.д.), выражался согласно формуле (7) (Аникина, 2019; Рожнов, 2022):

$$T = \frac{D_{440}}{D_{540}}, \quad (7)$$

где D — оптическая плотность спектра поглощения, отн. ед.,

Хроматографическая структура рассчитывалась по формуле (8) (Аникина, 2019):

$$D_{440,540,670} (\%) = \frac{D_{440} \cdot 540 \cdot 670}{I_2}, \quad (8)$$

Концентрацию антоцианов, в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид (X , %) определяли спектрофотометрически на КФК — 2 (ЗОМЗ, Россия) в 1%-ном соляном растворе экстракта при длине волны в зеленом цвете фильтра ($\lambda = 540$ нм), предварительно

гомогенат центрифугировали (центрифуга IKA mini G S000 (Германия)) при 4500 г в течение 30 мин. Содержание суммы антоцианов рассчитывали по цианидин-3,5-дигликозиду, расчеты по формуле (9) (Абрамова, 2018):

$$X = \frac{D \cdot 250 \cdot 100}{453 \cdot m \cdot (100 - W)}, \quad (9)$$

где D — оптическая плотность исследуемого раствора; 453 — удельный показатель поглощения цианидин-3,5-дигликозид в 1% растворе хлористоводородной кислоты; m — масса сырья в граммах; W — потеря в массе при высушивании сырья в процентах.

Определение общего количества дубильных веществ по Абрамовой (2015)

Определение оптической плотности растворов проводили на спектрофотометре. Около 2 г (точная навеска) измельченного сырья, помещали в колбу вместимостью 500 мл, заливали 250 мл нагретым до кипения экстрагентом (40% спиртом этиловым) и нагревали на водяной бане с обратным холодильником в течение 30 минут при периодическом перемешивании. Охлаждали до комнатной температуры, доводили водой до 250 мл, процеживали через вату (первые 50 мл фильтрата отбрасывали). Затем 1 мл извлечения помещали в мерную колбу вместимостью 50 мл, доводили водой до метки (раствор 1). Измеряли оптическую плотность раствора 1 при длине волны 277 нм. В качестве растворов сравнения использовали воду или 40% спирт этиловый, соответственно.

$$X = \frac{D \cdot 250 \cdot 50 \cdot 100}{m_{\text{нав}} \cdot V_a \cdot 508 \cdot (100 - W)}, \quad (10)$$

где X — содержание общего количества таннидов, пересчитанного по галловой кислоте, %; D — значение плотности оптической раствора; $m_{\text{нав}}$ — точное значение массы сырья в навеске (г); V_a — объем пробы (мл); 250 — количество общего объема раствора (мл); 50 — объем раствора № 1 (мл); 508 — значение плотности оптической 1%-го раствора кислоты галловой 1 мг/мл (значение удельного показателя поглощения галловой кислоты); W — значение влажности сырья (%).

Определение содержания гидроксикоричных кислот по Погоржельской (2019)

Около 0,5 г (точная навеска) сырья, измельченного до размера частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм, помещали в плоскодонную колбу со шлифом вместимостью 100 мл и экстрагировали 50 мл 70% этилового спирта в течение 30 мин. После охлаждения извлечение декантировали и фильтровали через бумажный фильтр в мерную колбу вместимостью 100 мл. Остаток в колбе заливали 50 мл 70% этилового спирта и экстрагировали еще раз в течение 30 мин. Объединенные извлечения в мерной колбе доводили 70% этиловым спиртом до метки (раствор А). 2 мл раствора А переносили в мерную колбу вместимостью 25 мл и доводили объем 95% этиловым спиртом до метки (раствор Б). Оптическую плотность полученного раствора измеряли на спектрофотометре СФ-2000 (РФ) в кювете с толщиной слоя 10 мм при длине волны $\lambda = 315$ нм. Раствором сравнения служил 95% этиловый спирт. Содержание суммы гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую кис-

лоту), в процентах (X) в пересчете на абсолютно сухое сырье вычисляли по формулам соответственно:

$$X, \% = \frac{A \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot 100\% \cdot 100\%}{m \cdot E^{1\%} \cdot 100 \cdot V \cdot (100\% - B\%)} \quad (11)$$

где А — оптическая плотность раствора Б в соответствующем максимуме поглощения; m — масса сырья, г; B — потеря в массе при высушивании сырья, %; — удельный показатель поглощения, равный 507 для хлорогеновой кислоты; W_1 и W_2 — объемы мерных колб, использованных для разведения, мл; V_a — объем аликвоты, взятый на анализ, мл.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка экстрактов *Sorbus aucuparia* с применением измерительных методов

Исследование экстрактов из различного исходного сырья анализировали по нескольким показателям, представленным в Таблице 2.

Таблица 2

Исследование показателя активной кислотности, термодинамической устойчивости, плотности и сухих веществ образцов ($n = 3, p = 0,90$)

Table 2

Investigation of Active Acidity, Thermodynamic Stability, Density, and Dry Matter Content of Samples ($n = 3, p = 0.90$)

№	pH, е.д	$\Phi_{ст}$, мВ	Плотность, г/см ³	Сухие в-ва, %
1	3,16 ± 0,01	1040,60 ± 0,01	0,99 ± 0,01	6,00 ± 0,04
2	3,15 ± 0,01	1041,20 ± 0,01	0,99 ± 0,01	7,00 ± 0,05
3	3,20 ± 0,02	1038,20 ± 0,02	0,96 ± 0,03	7,00 ± 0,03
4	3,18 ± 0,03	1039,40 ± 0,03	0,98 ± 0,02	8,00 ± 0,04
5	3,18 ± 0,02	1039,40 ± 0,02	0,98 ± 0,02	7,00 ± 0,05
6	3,10 ± 0,03	1044,10 ± 0,03	0,99 ± 0,01	11,00 ± 0,04
7	5,31 ± 0,01	913,71 ± 0,01	0,97 ± 0,03	5,00 ± 0,04
8	5,51 ± 0,03	901,91 ± 0,03	0,98 ± 0,02	5,00 ± 0,05
9	5,56 ± 0,01	898,96 ± 0,01	0,96 ± 0,03	7,00 ± 0,03
10	5,57 ± 0,02	898,37 ± 0,02	0,98 ± 0,02	7,00 ± 0,04
11	5,51 ± 0,01	901,91 ± 0,01	0,97 ± 0,01	6,00 ± 0,04
12	5,54 ± 0,01	900,14 ± 0,01	0,95 ± 0,03	7,00 ± 0,05
13	4,78 ± 0,02	944,98 ± 0,02	0,97 ± 0,03	4,00 ± 0,03
14	4,80 ± 0,01	943,80 ± 0,01	0,95 ± 0,03	4,00 ± 0,04
15	4,86 ± 0,01	940,26 ± 0,01	0,95 ± 0,03	4,00 ± 0,03
16	4,90 ± 0,03	937,90 ± 0,03	0,97 ± 0,02	4,00 ± 0,03
17	4,89 ± 0,03	938,49 ± 0,03	0,96 ± 0,03	4,00 ± 0,04
18	4,85 ± 0,02	940,85 ± 0,02	0,95 ± 0,03	4,00 ± 0,04

Активная кислотность (рН, е.д.) полученных экстрактов зависела от экстрагируемого растительного сырья в интервале: экстракты из плодов имели в среднем рН от 3,15 е.д до 3,20 е.д, экстракты из листьев рН от 5,31 е.д до 5,57 е.д и экстракты из веток рН от 4,78 е.д до 4,90 е.д. В сравнении с работами Сергуновой Е.В., Мараховой А.И. и Аврач А.С. [Сергунова Е.В., 2013] где активная кислотность для водного настоя из плодов *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya* составляла $4,52 \pm 0,03$ е.д., а в отваре $3,70 \pm 0,03$ е.д., у Шестопаловой и Уваровой (2012) рН зафиксировано 4,02 е.д., что указывало на смещение активной кислотности при температурной обработке в кислую сторону.

Разница в показателях термодинамической устойчивости (ϕ_{CT} , мВ) была минимальна, варьировалась в зависимости от взятого растительного сырья: экстракты из плодов от 1038,2 мВ до 1044,1 мВ; экстракты из листьев от 898,4 мВ до 913,7 мВ, экстракты из веток от 937,9 мВ до 944,9 мВ.

Исследование цветовых характеристик экстрактов

Анализ данных показателя коэффициента поглощения образцов представлен на Рисунках 1, 2 при длине волн $\lambda = 440$ и 540 нм соответственно. Анализ данных показателя коэффициента по-

глощения образцов представлен на Рисунках 1, 2 при длине волн $\lambda = 440$ и 540 нм соответственно.

Анализ данных Рисунка 1 указывал на высокую экстрактивность веществ из листьев *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya*. Минимальный переход был отмечен при использовании плодов.

Для анализа цвета анализировали три компонента: красный, желтый и синий. Желтый компонент экстракта, поглощение которого в синем цвете фильтра при длине волны $\lambda = 440$ нм, характеризуется продуктам разложения фенольных соединений, а именно, танина (дубильные вещества) и антоциана. Красный компонент исследуемых образцов — свободные антоцианы в форме катионов флавилия и антоцианово — танинного комплекса анализировали на желтом цвете фильтра при длине волны $\lambda = 540$ нм. Синий компонент характеризуется свободными антоцианами в хинонной форме или комбинациям дубильных веществ и антоцианов, исследовали на красном цвете фильтра при $\lambda = 670$ нм. Данные исследований обобщены в Таблицах 3, 4.

Образцы экстрактов из плодов *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya* описали как слабоокрашенные, интенсивность цвета в числовом выражении 0,03–0,04 е.д. при расчете трех цветовых компонентов.

Рисунок 1

Динамика изменения коэффициента поглощения при $\lambda = 440$ нм, при $p \leq 0,10$

Figure 1

Dynamics of Absorption Coefficient Changes at $\lambda = 440$ nm, at $p \leq 0.10$

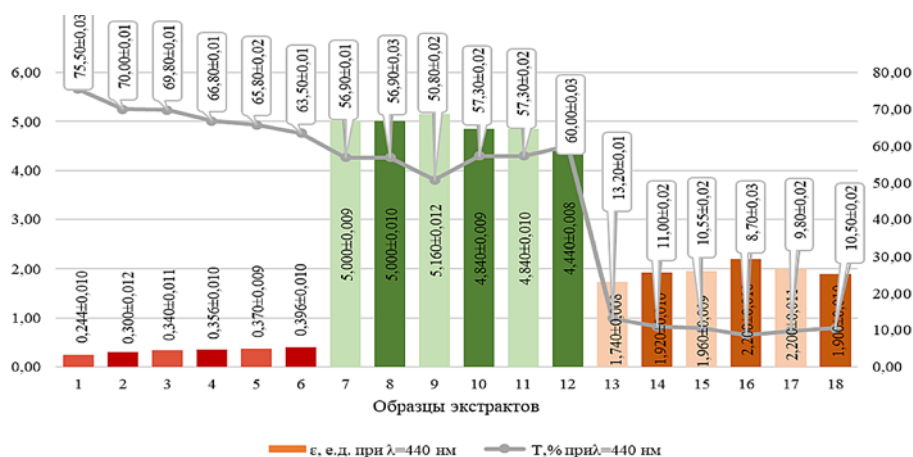


Рисунок 2

Динамика изменения коэффициента поглощения при $\lambda = 540$ нм, при $p \leq 0,10$

Figure 2

Dynamics of Absorption Coefficient Changes at $\lambda = 540$ nm, at $p \leq 0,10$



Таблица 3

Определение цветности экстрактов (растворитель-очищенная вода), ($n = 3, p = 0,90$)

Table 3

Determination of Extract Color Intensity (Solvent: Purified Water), ($n = 3, p = 0.90$)

Наименование показателя	Образцы								
	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Расчет dA % ¹	27,08 ± 0,02	25,52 ± 0,03	25,52 ± 0,02	358,62 ± 0,05	405,33 ± 0,05	440,00 ± 0,07	29,60 ± 0,03	28,87 ± 0,02	29,03 ± 0,03
I_1 , е.д. ²	0,02 ± 0,001	0,03 ± 0,002	0,03 ± 0,001	0,34 ± 0,02	0,33 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,11 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,13 ± 0,01
I_2 , е.д. ²	0,03 ± 0,001	0,04 ± 0,001	0,04 ± 0,001	0,54 ± 0,01	0,53 ± 0,01	0,51 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,13 ± 0,02	0,13 ± 0,02
T , е.д. ³	0,19 ± 0,01	0,20 ± 0,02	0,20 ± 0,02	2,87 ± 0,02	3,44 ± 0,03	3,72 ± 0,03	0,38 ± 0,02	0,37 ± 0,02	0,37 ± 0,02
D_{440} (%) ⁴	42,51 ± 0,03	47,62 ± 0,03	48,05 ± 0,03	46,55 ± 0,03	48,41 ± 0,03	47,73 ± 0,03	77,89 ± 0,03	77,47 ± 0,03	77,64 ± 0,03
D_{540} (%) ⁴	22,65 ± 0,02	24,37 ± 0,02	25,97 ± 0,03	16,20 ± 0,01	14,07 ± 0,01	12,82 ± 0,01	20,32 ± 0,02	20,95 ± 0,01	20,81 ± 0,02
D_{670} (%) ⁴	34,84 ± 0,03	28,01 ± 0,02	25,97 ± 0,02	37,24 ± 0,03	37,52 ± 0,03	39,45 ± 0,03	1,79 ± 0,02	1,58 ± 0,03	1,55 ± 0,01

Примечание:

¹ Долю красной окраски в сложении цвета dA (%).

² Интенсивность цвета (I_1 , е.д. и I_2 , е.д.).

³ Оттенок цвета (T , е.д.);

⁴ Хроматографическая структура D_{440} (%), D_{540} (%), D_{670} (%).

Note.

¹ Proportion of red coloration in color composition dA (%);

² Color intensity (I_1 , units; I_2 , units);

³ Color shade (T , units);

⁴ Chromatographic structure D_{440} (%), D_{540} (%), D_{670} (%).

Таблица 4

Определение цветности экстрактов (растворитель-озонированная вода), ($n = 3, p = 0,90$)

Table 4

Determination of Extract Color Intensity (Solvent: Ozonized Water), ($n = 3, p = 0.90$)

Наименование показателя	Образцы								
	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Расчет $dA\%$ ¹	27,12 ± 0,03	25,98 ± 0,02	16,93 ± 0,03	421,43 ± 0,04	440,00 ± 0,05	434,92 ± 0,05	28,49 ± 0,03	28,36 ± 0,03	28,51 ± 0,03
$I_1, \text{e.д.}^2$	0,02 ± 0,001	0,03 ± 0,002	0,04 ± 0,002	0,32 ± 0,03	0,31 ± 0,03	0,29 ± 0,02	0,12 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,01
$I_2, \text{e.д.}^2$	0,03 ± 0,001	0,04 ± 0,001	0,05 ± 0,002	0,52 ± 0,03	0,51 ± 0,03	0,49 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,01
$T, \text{e.д.}^3$	0,21 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,09 ± 0,02	3,57 ± 0,02	3,72 ± 0,02	3,52 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,36 ± 0,03	0,36 ± 0,02
$D_{440} (\%)^4$	46,44 ± 0,03	48,77 ± 0,04	38,60 ± 0,02	48,08 ± 0,03	47,73 ± 0,02	45,77 ± 0,02	77,11 ± 0,03	77,19 ± 0,03	77,11 ± 0,03
$D_{540} (\%)^4$	22,60 ± 0,02	23,84 ± 0,02	41,91 ± 0,03	13,46 ± 0,01	12,82 ± 0,01	12,99 ± 0,01	21,29 ± 0,02	21,40 ± 0,02	21,27 ± 0,01
$D_{670} (\%)^4$	30,96 ± 0,03	27,40 ± 0,02	19,49 ± 0,02	38,46 ± 0,03	39,45 ± 0,04	41,24 ± 0,04	1,61 ± 0,03	1,40 ± 0,02	1,62 ± 0,03

Примечание:

¹ Долю красной окраски в сложении цвета dA (%).

² Интенсивность цвета ($I_1, \text{e.д.}$ и $I_2, \text{e.д.}$).

³ Оттенок цвета ($T, \text{e.д.}$);

⁴ Хроматографическая структура $D_{440} (\%)$, $D_{540} (\%)$, $D_{670} (\%)$.

Note.

¹ Proportion of red coloration in color composition dA (%);

² Color intensity (I_1, units ; I_2, units);

³ Color shade (T, units);

⁴ Chromatographic structure $D_{440} (\%)$, $D_{540} (\%)$, $D_{670} (\%)$.

Исследуемые образцы отличались показателями оптической плотности, следовательно, и расчетными характеристиками — интенсивность цвета, оттенок цвета. В отличие от работы Ниловой Л.П. и др. соавторов [Нилова Л.П., 2019], где исследовали плоды брусники, клюквы, черники, голубики и Рожнова Е.Д. [Рожнов Е.Д., 2022] при исследовании плодов облепихи — плоды *Sorbus aucuparia* сухие, полученные с гидромодулем 1:20 имели менее выраженные числовые значения интенсивности цвета (, при сочетании длин волн $\lambda = 440, 540$ и 670 . В образцах экстрактов из сухих вегетативных частей (листья и ветки) интенсивность цвета была стабильна при увеличении времени обработки до 180 минут. Таким образом экстракты из листьев характеризовали как образцы — интенсивно окрашенные, из веток — средне окрашенные. Снижение хроматографической структуры по $D_{540} (\%)$ в экс-

трактах из листьев произошло с 16,20 до 12,82 е.д. (образцы № 7–11).

Оттенок цвета ($T, \text{e.д.}$) на максимальном уровне в экстрактах из листьев *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya* достигал в процессе обработки на 180 — й минуте 3,72 е.д. (образец № 11), что являлось максимальным значением при обработке растительного сырья.

В сравнении с предыдущими образцами, экстракты, где в качестве растворителя использовали озонированную воду имели отличительные особенности. Так интенсивность по трем цветовым компонентам немного выше в экстрактах из плодов и веток *Sorbus aucuparia* на 0,01 е.д. (образцы сравнения № 2–4 и № 14–18), в экстрактах из листьев на 0,10 е.д. (образцы сравнения № 8–12), что не является

значительным расхождением и может варьироваться в пределах ошибки измерений.

Образцы из веток описываются высокими показателями хроматографической структуры D_{440} (%) $\approx 77,00\%$, указывая на преобладание полимерных фенольных соединений при экстрагировании. Экстракты из плодов можно описать сочетанием мономерных форм фенолов, в частности присутствием свободных антоцианов — анализ D_{540} (%) и D_{670} (%).

Исследование фенольных соединений экстрактов

Антоцианы — растительные пигменты, которые могут присутствовать у растений как в генеративных органах (цветках, пыльце), так и в вегетативных (стеблях, листьях, корнях), а также в плодах и семенах [Аникина, Н.С., 2019]. Образуются в клетке растения постоянно или могут появляться на стадии развития растений. Также под воздействием стрессовых ситуаций. Антоцианы -комплексное соединение фенольной природы, не только придающее окраску, но и способ борьбы с внешними раздражителями, иначе выражаясь стресса. Все антоцианы объединяет их строение — C_{15} -углеродный скелет — два бензольных кольца А и В, соединён-

ные C_3 -фрагментом, который с атомом кислорода образует γ -пироновое кольцо (С-кольцо). Отличие антоцианов от других представителей флавоноидных соединений — наличие положительного заряда и двойной связи в С-кольце. При всем многообразии антоциановые соединения — производные лишь шести основных антоцианидинов: пеларгонидина, цианидина, пеонидина, дельфинидина, петунидина и мальвидина (Струкова, 2015; Колдаев, 2009; Колдаев, 2013; Колдаев, 2015; Колдаев, 2017; Колдаев, 2018; Колдаев, 2020]. Для антоцианов известна способность менять свою окраску в зависимости от значения рН среды.

Антоцианы — группа водорастворимых пигментов, относящихся к классу флавоноидов, переход антоцианов проанализирован графически на Рисунке 3.

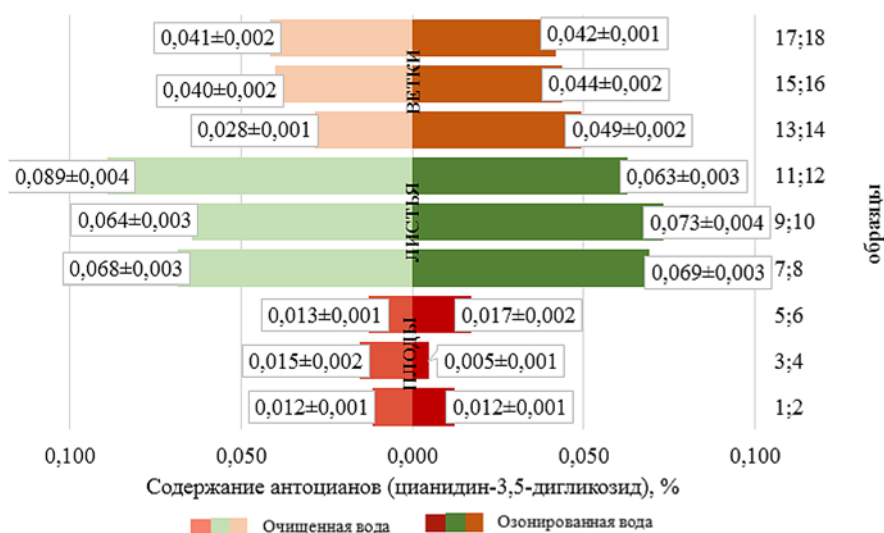
Анализ Рисунка 3 свидетельствовал о высоком переходе антоцианов при мацерации листьев *Sorbus aucuparia*. В сравнении растворителей при экстрагировании листьев, наиболее выражен переход исследуемых флавоноидов в очищенной воде, максимальное значение зафиксировано 0,089% (образец № 11). При экстрагировании плодов небольшое увеличение при использовании озонированной воды, в сравнении с очищенной составило 0,002% (образцы сравнения № 1–6). Выражен переход в образце № 14 (растворитель — озонированная вода),

Рисунок 3

Содержание антоцианов (в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид),% ($n = 3, p = 0,90$)

Figure 3

Anthocyanin Content (Calculated as Cyanidin-3,5-diglucoside),% ($n = 3, p = 0,90$)



который составил 0,049%, дальнейшая обработка приводила к снижению исследуемого параметра, содержание одинаковое было при анализе образцов № 17 (растворитель — очищенная вода) и № 18 (растворитель — озонированная вода). При сравнении данных по содержанию антоцианов в экстрактах *Sorbus aucuparia* и исходном растительном сырье, переход составил ≈ от 1,0 до 5,0%, так содержание цианидин-3,5-дигликозид в листьях составил ≈ 4,0%, в ветках ≈ 1,0%, в плодах ≈ 2,0%.

Анализ дубильных веществ представлен на Рисунке 4.

В исходном сырье (контроль) содержание дубильных веществ было следующим: листья — 1,96%; ветки — 0,68%, плоды — 0,68%. При исследовании экстрактов, при сравнении с контролем, исходным образцом переход дубильных веществ из веток в очищенной воде составил ≈ 55,88% (максимальный переход в образце № 17), в озонированной ≈ 48,53% (наибольший выход веществ в образце № 18). При экстрагировании листьев переход дубильных веществ относительно исходного сырья: для очищенной воды ≈ 75,15% (наибольший выход зафиксирован в образце № 9), озонированной воде ≈ 76,53% (максимальное значение показателя в образце №8). Анализ экстрагирования плодов неоднозначный, так для очищенной воды отмечен

переход ≈ 64,71% (с максимальным выходом в образцах № 1 и № 5) он относительно стабильный при увеличении времени обработки. При использовании озонированной воды наибольшее значение показателя было определено в образце № 4 и составило ≈ 85,29%, дальнейшая обработка в образце № 6 привела к осаждению дубильных веществ и снижению показателя ≈ 64,70% (с учетом погрешности измерений).

Дальнейшие исследования фенольных соединений, по содержанию гидроксикоричных кислот представлены на Рисунке 5.

Обобщенные данные по содержанию гидроксикоричных кислот (%) представлены следующим образом: в исходном сырье 1,57% (листья), 0,53% (ветки) и 0,63% — плоды. Переход указанных фенольных соединений — из плодов *Sorbus aucuparia* *Nevezhinskaya* в среднем при использовании в качестве растворителя очищенной воды составил ≈ 60,30%, при экстрагировании в озонированной воде ≈ 95,08%. Увеличен выход хлорогеновой кислоты из плодов *Sorbus aucuparia* при использовании в качестве растворителя воды, насыщенной озоном, максимальный % перехода в образце № 6. Из вегетативных частей выход хлорогеновой кислоты не отличался от выбранного экстрагента и составил ≈ 93,11% (для листьев) и ≈ 56,92% (для веток).

Рисунок 4
Содержание дубильных веществ (в пересчете на галловую кислоту),%
($n = 3, p = 0,90$)

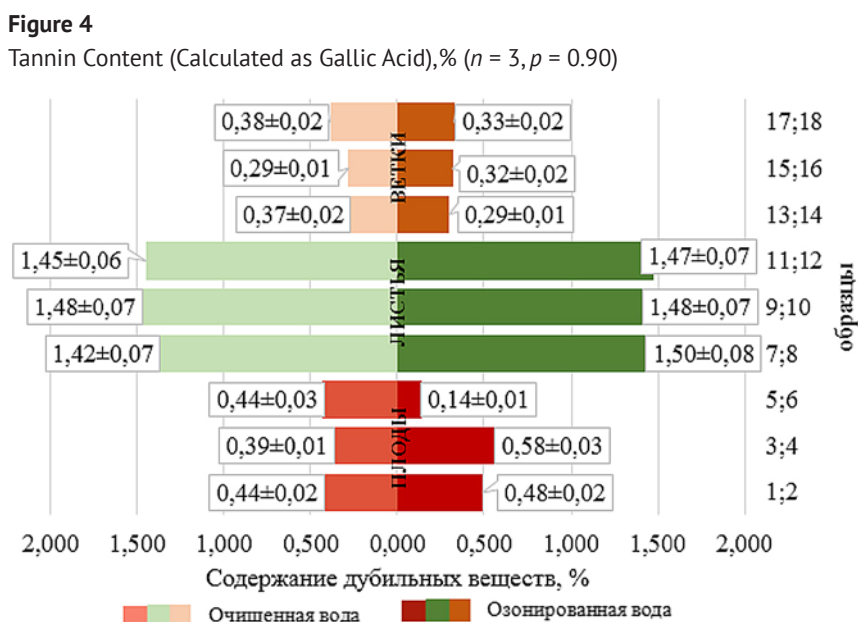
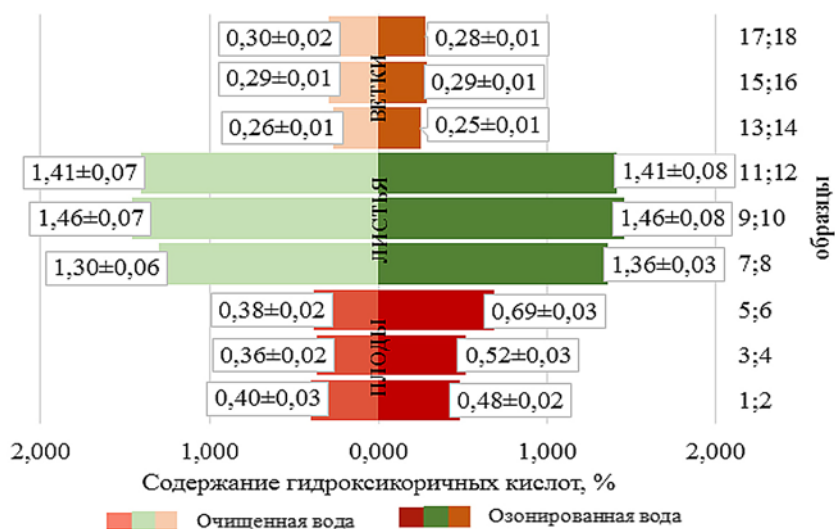


Рисунок 5

Содержание гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую кислоту),% ($n = 3, p = 0,90$)

Figure 5

Content of Hydroxycinnamic Acids (Calculated as Chlorogenic Acid),% ($n = 3, p = 0.90$)



Сравнительный анализ показал, что между образцами экстрактов, полученных с использованием очищенной или озонированной воды, существенных различий не выявлено. Так изменение спектральных параметров интенсивности по трем цветовым компонентам в экстрактах с применением озонированной воды находилось в пределах ошибки измерения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках настоящего исследования был проведен анализ цветовых характеристик и содержания фенольных соединений в экстрактах из плодов, листьев и веток *Sorbus aucuparia*. Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов, которые сопоставимы с существующими литературными данными, а также дают новые сведения о составе вегетативных частей растения.

Как и предполагалось, содержание антоцианов в листьях *Sorbus aucuparia* оказалось значительно выше, чем в плодах и ветках. Это подтверждается данными о цветовых характеристиках экстрактов, где показатель интенсивности цвета (I_1 , е.д.) для экстрактов из листьев в 11,6 раза превышал аналогичный показатель для экстрактов из плодов

и в 3,0 раза — для экстрактов из веток. Данные коррелируют с ранее проведенными исследованиями, которые показывают высокое содержание фенольных соединений в листьях других представителей семейства Розоцветные (Rosaceae), таких как *Crataegus submollis* Sarg. ($3,12 \pm 0,05$ %, гиперозид) и *Fragaria vesca* L. (3,90 %) (Куркин, 2018; Шалдаева, 2013). В то же время, для корней *Fragaria vesca* L. этот показатель составил лишь 0,3 %, что также указывает на значительные различия в распределении фенольных соединений в разных частях растений (Шалдаева, 2013).

Содержание дубильных веществ и гидроксикоричных кислот в исследованных экстрактах также показало сходную тенденцию. Листья *Sorbus aucuparia* оказались богатым источником этих соединений, что согласуется с результатами исследования полифенольных профилей других растений, таких как *Crataegus arnoldiana* Sarg., где содержание фенольных соединений составило $2,15 \pm 0,11$ % (Андреев, 2023).

Ранее в литературе акцентировалось внимание на составе плодов *Sorbus aucuparia* (Исайкина, 2017; Жангазиева, 2018; Тараховский, 2013; Vobinaitė et al., 2020), однако данное исследование впервые предоставляет количественные данные о составе

вегетативных частей (листьев и веток). Высокая концентрация антоцианов и других фенольных соединений в листьях открывает новые возможности для использования этого сырья в качестве источника биологически активных веществ.

Ограничение исследования

Исследование проводилось с использованием высушенного растительного сырья, что могло повлиять на концентрацию целевых соединений из-за возможных потерь при сушке. Это обстоятельство следует учитывать при интерпретации результатов и сопоставлении их с данными, полученными на свежем сырье. Для дальнейших исследований целесообразно провести сравнительный анализ полученных данных с использованием других методов экстракции и анализа фенольных соединений, чтобы минимизировать погрешности и получить более точные количественные оценки. Это также позволит расширить представления о влиянии технологических параметров на состав и свойства экстрактов из различных частей растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа и обобщения полученных данных параметры оценки экстрактов (коэффициент поглощения, интенсивность цвета, оттенок) при использовании разных растворителей не выявили значительных расхождений и варьировались в пределах ошибки измерений. В совокупности использование предлагаемых методов возможно при исследовании показателей цвета с помощью инструментальных способов.

Практическая значимость исследования заключается в дальнейшем использовании полученных экстрактов из вегетативных частей и плодов *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya* при производстве продуктов питания. Введение сырья растительного происхождения в рецептуру продуктов питания (напитков, соусов, кондитерских изделий и т.д.), позволяет не только расширить ассортимент продукции, изменить органолептические и потребительские характеристики, но и обогатить изделия микро- и макроэлементами, пищевыми волокнами. Сочетание полученных экстрактов из растительного сырья с другими ингредиентами способствует

улучшению вкуса, аромата и цвета, что позволяет исключить из рецептурного состава продукта красители, ароматизаторы, кислоты.

Результаты настоящей работы подтверждают целесообразность использования экстрактов из *Sorbus aucuparia Nevezhinskaya* в пищевой промышленности. Это направление требует дальнейшего исследования для оптимизации технологических процессов экстрагирования, изучения взаимодействия растительных экстрактов с другими компонентами рецептуры и оценки их влияния на функциональные и сенсорные свойства конечной продукции. Таким образом, настоящее исследование закладывает основу для разработки инновационных продуктов с повышенной биологической ценностью и улучшенными характеристиками, соответствующих современным требованиям к качеству и натуральности.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Ксения Николаевна Нициевская: научное руководство исследованием; концептуализация; разработка методологии исследования; валидация данных.

Светлана Владимировна Станкевич: визуализация; проведение исследования.

Елена Валерьевна Бородай: написание-рецензирование и редактирование рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Kseniya N. Nitsievskaya: supervision; conceptualization; methodology; validation.

Svetlana V. Stankevich: visualization; investigation.

Elena V. Boroday: writing — reviewing and editing.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Абрамова, И. М., Головачева, Н. Е., Морозова, С. С., Воробьева, Е. В., Галлямова, Л. П., & Шубина, Н. А. (2018). Исследование влияния ферментативной обработки на показатели качества спиртованных морсов из плодово-ягодного сырья. *Пищевая промышленность*, 10, 77–81.
- Abramova, I. M., Golovacheva, N. E., Morozova, S. S., Vorob'eva, E. V., Gallyamova, L. P., & Shubina, N. A. (2018). Investigation of the effect of enzymatic treatment on the quality indicators of spirituous drinks from fruit and berry raw materials. *Food Industry*, 10, 77–81. (In Russ.)
- Абрамова, И. М., Поляков, В. А., Савельева, В. Б., Сурин, Н. М., & Приёмухова, Н. В. (2015). Определение цветности спиртных напитков с использованием спектрофотометрического метода анализа. *Пиво и напитки*, 1, 40–42.
- Abramova, I. M., Poliakov, V. A., Savelieva, V. B., Surin, N. M., & Priyomuhova, N. V. (2015). Determination of chromaticity of alcoholic beverages using the spectrophotometric analysis method. *Beer and Beverages*, 1, 40–42. (In Russ.)
- Андреев А.А., Правдивцева О.Е., Куркина А.В., Рыжов В.М., & Браславский В.Б. (2023). Изучение содержания суммы флавоноидов в листьях некоторых культивируемых видов рода *Crataegus* L. Пути и формы совершенствования фармацевтического образования. Актуальные вопросы разработки и исследования новых лекарственных средств. *Сборник трудов 9-й Международной научно-методической конференции* (с. 141–145). Воронеж: Воронежский государственный университет. <https://doi.org/10.17308/978-5-9273-3827-6-2023-142-145>
- Andreev, A.A., Pravdivtseva, O.E., Kurkina, A.V., Ryzhov, V.M., & Braslavsky, V.B. (2023). The study of the amount of flavonoids in the leaves of some cultivated species of the genus *Crataegus* L. In *Ways and forms of improving pharmaceutical education. Current issues of development and research of new drugs. Proceedings of the 9th International Scientific and Methodological Conference* (pp. 141–145). Voronezh: Voronezh State University. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/978-5-9273-3827-6-2023-142-145>
- Аникина, Н. С., Червяк, С. Н., & Гнилomedова, Н. В. (2019). Методы оценки цвета вин. Обзор. *Аналитика и контроль*, 23(2), 158–167. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.2.003>
- Anikina, N. S., Chervyak, S. N., & Gnilomedova, N. V. (2019). Methods for evaluating the color of wines. The review. *Analitika i Kontrol'*, 23(2), 158–167. (In Russ.) <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.2.003>
- Аристова, Н.А., & Пискарев, И.М. (2011). *Физико-химические методы получения экологически чистой активированной питьевой воды*. Нижний Тагил: НТИ (ф) УрФу.
- Aristova, N.A., & Piskarev, I.M. (2011). *Physico-chemical methods for obtaining environmentally friendly activated drinking water*. Nizhny Tagil: NTI (f) UrFU. (In Russ.)
- Бурак, Л. Ч. (2022). *Использование озонной технологии в пищевой промышленности*. Минск: СтройМедиаПроект.
- Burak, L. Ch. (2022). *Using ozone technology in the food industry*. Minsk: Stroymediaproject. (In Russ.)
- Жангазиева, И.Т., Калганова, Н.В., & Полотнянко, Н.А. (2018). Определение флавоноидных комплексов в составе рябины обыкновенной (литературный обзор). *Материалы X Международной студенческой научной конференции*. Издательство: ООО «Научно-издательский центр «Академия Естествознания».
- Zhangazieva, I.T., Kolganova, N.V., & Polotnyanko, N.A. (2018). Determination of flavonoid complexes in mountain ash composition (literature review). *Materials of the X International Student Scientific Conference*. Scientific Publishing Center "Academy of Natural Sciences". (In Russ.)
- Исайкина, Н.В., Калинкина, Г.И., Разина, Т.Г., Зуева, Е.П., Рыбалкина, О.Ю., Ульрих, А.В., Фёдорова, Е.П., & Шилова, А.Б. (2017). Плоды рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.)

- как источник средства для повышения эффективности химиотерапии опухолей. *Химия растительного сырья*, 4, 165–173. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017041839>
- Isaikina, N.V., Kalinkina, G.I., Razina, T.G., Zueva, E.P., Rybalkina, O.Yu., Ulrich, A.V., Fedorova, E.P., & Shilova, A.B. (2017). Fruits of *Sorbus aucuparia* L. as a source for increasing chemotherapy effectiveness against tumors. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 4, 165–173. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017041839>
- Колдаев, В. М. (2013). Оптические свойства экстрактов из лепестков цветков. *Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН*, 10, 15–18.
- Koldaev, V. M. (2013). The optical properties of extracts from petals flowers. *Bulletin of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 10, 15–18. (in Russ.)
- Колдаев, В. М. (2013). *Спектры поглощения экстрактов из лекарственных растений Приморья*. Москва: Спутник+.
- Koldaev, V. M. (2013). *Absorption spectra of extracts from medicinal plants of Primorye*. Moscow: Sputnik+. (in Russ.)
- Колдаев, В. М. (2015). Спектрофотометрические показатели извлечений из ревеня. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 2, 52–54.
- Koldaev, V. M. (2015). The spectrophotometric values of extracts from rhubarb. *Pacific Medical Journal*, 2, 52–54. (in Russ.)
- Колдаев, В. М. (2017). Интегральные показатели спектров поглощения экстрактов из зеленых листьев. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 19, 2(3), 463–467.
- Koldaev, V. M. (2017). Integrated indexes of absorption spectrums from green leaves extracts. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 19, 2(3), 463–467. (in Russ.)
- Колдаев, В. М. (2018). Оптические свойства антоцианосодержащих извлечений из растительного сырья. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 2, 50–52. <https://doi.org/10.17238/Pmj1609-1175.2018.2.50-52>
- Koldaev, V. M. (2018). The optical properties of including anthocyan extracts from plant's material. *Pacific Medical Journal*, 2, 50–52. (in Russ.) <https://doi.org/10.17238/Pmj1609-1175.2018.2.50-52>
- Колдаев, В. М., & Кропотов, А. В. (2020). Оптические свойства извлечений из боярышника. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 2, 64–67. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-2-64-67>
- Koldaev, V. M., & Kropotov, A. V. (2020). The optical properties of hawthorn's extracts. *Pacific Medical Journal*, 2, 64–67. (in Russ.) <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-2-64-67>
- Колдаев, В. М., Ващенко, В. В., & Бездетко, Г. Н. (2009). Фотометрические параметры абсорбционных спектров экстрактов из растений. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 3, 49–51.
- Koldaev, V. M., Vaschenko, V. V., & Bezdetko, G. N. (2009). Photometrical parameters of absorption spectra of plant-derived extracts. *Pacific Medical Journal*, 3, 49–51. (In Russ.)
- Куркин, В.А., Зайцева, Е.Н., Морозова, Т.В., Правдивцева, О.Е., Авдеева, Е.В., Куркина, А.В., & Агапов, А.И. (2018). Изучение флавоноидов и антидепрессантной активности листьев и жидкого экстракта боярышника полумягкого. *Химия растительного сырья*, 4, 105–112. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018043883>
- Kurkin, V.A., Zaitseva, E.N., Morozova, T.V., Pravdivtseva, O.E., Avdeeva, E.V., Kurkina, A.V., & Agarov, A.I. (2018). The study of flavonoids and antidepressant activity of leaves and liquid extract of *Crataegus submollis*. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 4, 105–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018043883>
- Макаров, А. С., Яланецкий, А. Я., Лутков, И. П., Шмигельская, Н. А., Шалимова, Т. Р., Максимовская, В. А., & Кречетова, В. В. (2017). Цветовые характеристики виноматериалов для розовых и красных игристых вин. Магарач. *Виноградарство и виноделие*, 3, 44–47.

- Makarov, A. S., Yalaneskii, A. Ya., Lutkov, I. P., Shmigelskaia, N. A., Shalimova, T. R., Maksimovskaia, V. A., & Krechetova, V. V. (2017). Color characteristics of wine materials for red and rosé sparkling wines. *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 3, 44–47. (In Russ.)
- Нечипоренко, А. П., Мельникова, М. И., Нечипоренко, У. Ю., Плотникова, Л. В., & Успенская, М. В. (2018). Оптические свойства масляных экстрактов и шротов лечебных и пряно-ароматических трав. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, 8(4), 6–12. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-6-12>
- Nechiporenko, A. P., Melnikova, M. I., Nechiporenko, U. Yu., Plotnikova, L. V., & Uspenskaya, M. V. (2018). Optical properties of oil extracts and residues of medicinal and aromatic herbs. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 8(4), 6–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-4-6-12>
- Нилова, Л.П., Икрамов, Р.А., & Малютенкова, С.М. (2019). Влияние СВЧ-нагрева на оптические характеристики ягодных экстрактов. *Вестник ВГУИТ*, (81), 1, 218–224. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-218-224>
- Nilova, L.P., Ikramov, R.A., & Malyutenkova, S.M. (2019). The effect of microwave heating on the optical characteristics of berry extracts. *Vestnik VGUIT*, (81), 1, 218–224. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-218-224>
- Остроухова, Е. В., Пескова, И. В., & Луткова, Н. Ю. (2015). Исследование сенсорных профилей белых столовых вин из винограда сорта Мускат белый. *Магарач. Виноградарство и виноделие*, 4, 44–46.
- Ostroukhova, E. V., Peskova, I. V., & Lutkova, N. Yu. (2015). Study of sensory profiles of table wine materials made from the grape 'White Muscat.' *Magarach. Viticulture and Winemaking*, 4, 44–46. (In Russ.)
- Плотникова, Л. В., Нечипоренко, У. Ю., Плотникова, Н. А., Успенская, М. В., & Ишевский, А. Л. (2017). Оптические методы в исследовании масляных экстрактов и шротов растительного сырья. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, 3, 33–42. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-33-42>
- Plotnikova, L. V., Nechiporenko, U. Yu., Plotnikova, N. A., Uspenskaya, M. V., & Ishevskiy, A. L. (2017). Optical methods in the study of oil extracts and meals of vegetable raw materials. *Processes and Food Production Equipment*, 3, 33–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-33-42>
- Погоржельская, Н. С., Абрамова, И. М., & Кудряшов, В. Л. (2019). Ультразвуковая обработка растительного сырья в производстве ликероводочных изделий. *Пищевая промышленность*, 10, 84–88. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10166>
- Pogorzelskaya, N. S., Abramova, I. M., & Kudryashov, V. L. (2019). Ultrasonic processing of vegetable raw materials in the production of alcoholic beverages. *Food Industry*, 10, 84–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10166>
- Ревина, А. А., Геворгиз, Р. Г., Лозинина, С. С., Железнова, С. Н., Тхан, Т., Павлов, Ю. С., Нехорошев, М. В., & Рябушко, В. И. (2016). Оптические свойства и радиационная стабильность экстрактов морской диатомеи *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 16(2), 173–182.
- Revina, A. A., Gevorgiz, R. G., Lozinina, S. S., Zheleznova, S. N., Than, T., Pavlov, Yu. S., Nekhoroshev, M. V., & Ryabushko, V. I. (2016). Optical properties and radiation stability of extracts of the marine diatom *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et Lewin. *Sorption and Chromatography Processes*, 16(2), 173–182. (In Russ.)
- Рожнов, Е.Д., Школьникова, М.Н., Пушмина, И.Н., Кудрявцев, М.Д., & Галимова, А.Г. (2022). Исследование влияния аскорбиновой кислоты на процесс потемнения сока облепихи как ингредиента специального питания спортсменов. *Человек. Спорт. Медицина*, (22), S1, 72–84. <https://doi.org/10.14529/hsm22s113>
- Rozhnov, E.D., Shkolnikova, M.N., Pushmina, I.N., Kudryavtsev, M.D., & Galimova, A.G. (2022). The effect of ascorbic acid on the color of sea buckthorn juice as an ingredient of sports nutrition. *Human. Sport. Medicine*, (22), S1, 72–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/hsm22s113>

- Сергунова, Е.В., Марахова, А.И., & Аврач, А.С. (2013). Методы количественного определения органических кислот в лекарственном растительном сырье и водных извлечениях. *Фармация*, 4, 8–11.
- Sergunova, E.V., Marakhova, A.I., & Avrach, A.S. (2013). Methods for the quantification of organic acids in raw medicinal plant materials and aqueous extracts. *Pharmacy*, 4, 8–11. (In Russ.)
- Стародубцева, М. Н., & Потапова, Е. А. (2019). Получение компонентов для производства безалкогольных тонизирующих напитков. *Инновации в пищевой биотехнологии. Сборник тезисов VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых* (том 2, с. 132–133). Кемерово: Кемеровский государственный университет.
- Starodubtseva, M. N., & Potapova, E. A. (2019). Obtaining components for the production of non-alcoholic tonic drinks. *Innovations in Food Biotechnology. Collection of Abstracts of the VII International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young People* (vol. 2, p. 132–133). Kemerovo State University. (In Russ.)
- Струкова, В. Е., Таланян, О. Р., Стрибизева, Л. И., & Гусев, П. В. (2015). Разработка рецептур безалкогольных напитков специального назначения на основе растительных биологически активных веществ. *Научные труды КубГТУ*, 8, 88–94.
- Strukova, V. E., Talanyan, O. R., Stribizheva, L. I., & Gusev, P. V. (2015). Development of formulations of soft drinks of special purpose plant-based biologically active substances. *Scientific Works of KubSTU*, 8, 88–94. (In Russ.) <http://ntk.kubstu.ru/file/670>
- Тараховский, Ю.С., Ким, Ю.А., Абдрасилов, Б.С., & Музафаров, Е.Н. (2013). *Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина*. Пушкино: Sunchrobook.
- Tarakhovsky, Yu.S., Kim, Yu.A., Abdrasilov, B.S., & Muzafarov, E.N. (2013). *Flavonoids: Biochemistry, biophysics, medicine*. Pushchino: Sunchrobook. (In Russ.)
- Шалдаева, Т.М. (2013). Содержание флавоноидов в некоторых представителях семейства *Rosaceae* Juss. из природных популяций лесостепной зоны Западной Сибири. *Химия растительного сырья*, 1, 239–241. <https://doi.org/10.14258/jcprm.1301239>
- Shaldaeva, T.M. (2013). Content of flavonoids in some representatives of the family *Rosaceae* Juss. from natural populations of the forest-steppe zone of Western Siberia. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 1, 239–241. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.1301239>
- Шестопалова, И.А., & Уварова, Н.А. (2012). Влияние экстрактов дикорастущих плодов и ягод на цвет рубленых полуфабрикатов из мяса птицы. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, 1, 53–59.
- Shestopalova, I.A., & Uvarova, N.A. (2012). Influence of extracts of wild-growing fruits and berries on the color of minced semi-finished poultry products. *Scientific Journal of ITMO University. Series "Processes and Devices of Food Production"*, 1, 53–59. (In Russ.)
- Ajila, C. M., Brar, S. K., Verma, M., Tyagi, R. D., Godbout, S., & Valéro, J. R. (2011). Extraction and analysis of polyphenols: Recent trends. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(3), 227–249. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.513677>
- Bobinaitė, R., Grootaert, C., Van Camp, J., Šarkinas, A., Liaudanskas, M., Žvikas, V., Viškelis, P., & Rimantas Venskutonis, P. (2020). Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of the extracts isolated from the pomace of rowanberry (*Sorbus aucuparia* L.). *Food Research International*, 136, 109310. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109310>
- Cairone, F., Frascchetti, C., Menghini, L., Zengin, G., Filippi, A., Casadei, M. A., & Cesa, S. (2023). Effects of processing on chemical composition of extracts from sour cherry fruits, a neglected functional food. *Antioxidants*, 12(2), 445. <https://doi.org/10.3390/antiox12020445>
- Campbell, J., Sarkhosh, A., Habibi, F., Gajjar, P., Ismail, A., Tsolova, V., & El-Sharkawy, I. (2021). Evaluation of biochemical juice attributes and color-related traits in muscadine grape population. *Foods*, 10(5), 1101. <https://doi.org/10.3390/foods10051101>
- Carradori, S., Cairone, F., Garzoli, S., Fabrizi, G., Iazzetti, A., Giusti, A. M., Menghini, L., Uysal, S., Ak, G., Zengin, G., & Cesa, S. (2020). Phytocomplex characterization and biological

- evaluation of powdered fruits and leaves from *Elaeagnus angustifolia*. *Molecules*, 25(9), 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules25092021>
- Krivoruchko, E., Markin, A., Samoilova, V., Ilina, T., & Koshovyi, O. (2018). Research in the chemical composition of the bark of *Sorbus aucuparia*. *Ceska Slov Farm*, 67(3), 113–115.
- Razina, T. G., Zueva, E. P., Ulrich, A. V., Rybalkina, O. Y., Chaikovskii, A. V., Isaikina, N. V., Kalinkina, G. I., Zhdanov, V. V., & Zyuz'kov, G. N. (2016). Antitumor effects of *Sorbus aucuparia* L. extract highly saturated with anthocyanins and their mechanisms. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 162(1), 93–97. <https://doi.org/10.1007/s10517-016-3554-4>
- Rutkowska, M., Kolodziejczyk-Czepas, J., Owczarek, A., Zakrzewska, A., Magiera, A., & Olszewska, M. A. (2021). Novel insight into biological activity and phytochemical composition of *Sorbus aucuparia* L. fruits: Fractionated extracts as inhibitors of protein glycation and oxidative/nitrative damage of human plasma components. *Food Research International*, 147, 110526. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110526>
- Šavikin, K. P., Zdunić, G. M., Krstić-Milošević, D. B., Šircelj, H. J., Stešević, D. D., & Pljevljakušić, D. S. (2017). *Sorbus aucuparia* and *Sorbus aria* as a source of antioxidant phenolics, tocopherols, and pigments. *Chemistry & Biodiversity*, 14(12). <https://doi.org/10.1002/cbdv.201700329>

Особенности формирования потребительских свойств поликомпонентных молочных систем

Всероссийский
научно-исследовательский институт
молочной промышленности, г. Москва,
Российская Федерация

Е. Ю. Агаркова, В. В. Кондратенко, А. Е. Рябова, А. Н. Яшин,
Д.Н. Глазунова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Евгения Юрьевна Агаркова
E-mail: e_agarkova@vniimi.org

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Агаркова, Е.Ю., Кондратенко, В.В.,
Рябова, А.Е., Яшин, А.Н., & Глазуно-
ва, Д.Н. (2025). Особенности форми-
рования потребительских свойств
поликомпонентных молочных систем.
Хранение и переработка сельхозсырья,
33(1), 68–81. [https://doi.org/10.36107/
spfp.2025.1.635](https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.635)

ПОСТУПИЛА: 13.12.2024

ДОРАБОТАНА: 05.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Исследования проведены
в рамках государственного
задания Министерства науки и
высшего образования Российской
Федерации FNSS-2025-0003
«Развить принципы интегральных
процессовых и методологических
наукоемких решений для повышения
эффективности и экологичности
промышленных технологий
переработки молока в условиях
последовательного ряда переделов».



АННОТАЦИЯ

Введение: Молочные поликомпонентные системы являются основой большинства молочных продуктов. Благодаря широкой вариативности состава, разработчики пищевых систем имеют неограниченные возможности при создании новых видов продуктов. Несмотря на это, при работе с нетрадиционными компонентами, такими как мука орехоплодных, неизбежно возникают проблемы формирования привлекательных потребительских характеристик, нивелировать которые возможно подобранными стабилизационными системами. При очевидной перспективности интегрирования компонентов орехоплодных в пищевые матрицы, существующие в мировой научной среде данные не позволяют спрогнозировать их свойства в сложноконпонентной молочной системе.

Материалы и методы: Объектами исследования являлись модельные системы «молоко-пектин-МГО» с различными массовыми долями пектина и МГО. Процедура исследования состояла из двух последовательных этапов: приготовление модельных систем и их исследование. Всего было подготовлено 100 модельных систем «молоко-пектин-МГО». Оценивалась активная кислотность, титруемая кислотность и органолептические показатели. Методы исследований стандартизованные и оригинальные, математическую обработку проводили на базе табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc.) и программного обеспечения TableCurve 3D.

Результаты: Анализ взаимосвязи между pH трёхкомпонентной системы и её интегральной органолептической оценкой показал наличие чётко очерченной границы множества экспериментальных данных в координатах «pH – органолептический показатель». Вблизи точек пересечения с этой границей наблюдалась минимальная неопределённость взаимосвязи, в то время как при удалении от неё неопределённость возрастала. Полученные данные позволяют заключить, что чем дальше значение pH отклоняется от некоторого промежуточного уровня, тем более выраженным становится влияние этого параметра на органолептические свойства системы. Напротив, вблизи данного значения pH возможно проявление маскирующего эффекта либо ослабление стабилизирующего действия со стороны неидентифицированных компонентов. Таким образом, pH, близкий к промежуточному значению, можно рассматривать как зону максимальной чувствительности системы к композиционным изменениям, а его отклонение – как фактор усиления предсказуемости органолептического отклика.

Выводы: Сложные взаимодействия внутри системы «молоко-МГО-пектин» предполагает более глубокое её изучение для детальной проверки фундаментальных гипотез и предположений и вызывает мысль о возможных путях ингредиентной корректировки системы. Одним из таких путей может быть внесение дополнительного компонента, направленно корректирующего протекание базовых процессов при формировании системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

молоко; поликомпонентные системы; органолептические свойства; титруемая кислотность; пектин; мука грецкого ореха

Features of the Formation of Consistency of Multicomponent Dairy Systems

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

Evgeniya Yu. Agarkova, Vladimir V. Kondratenko,
Anastasia E. Ryabova, Alexey N. Yashin, Dariya N. Glazunova

CORRESPONDENCE:

Evgeniya Yu. Agarkova

E-mail: e_agarkova@vniimi.org

FOR CITATIONS:

Agarkova, E.Yu., Kondratenko, V.V., Ryabova, A.E., Yashin, A.N., & Glazunova, D.N. (2025). Features of the Formation of Consumer Properties of Multicomponent Dairy Systems. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 68-81. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.635>

RECEIVED: 13.12.2024

REVISED: 05.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING:

The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FNSS-2022-0006 «To develop the principles of integrated process and methodological science-intensive solutions to improve the efficiency and environmental friendliness of industrial milk processing technologies in the context of a sequential series of stages».



ABSTRACT

Introduction: Milk-based multicomponent systems form the basis of most dairy products. Due to the broad variability of their composition, food system developers have virtually unlimited possibilities for creating new types of products. Nevertheless, the use of non-traditional components, such as nut flours, inevitably presents challenges in achieving desirable consumer characteristics. These challenges can be mitigated through the careful selection of stabilization systems. Despite the promising potential of integrating nut components into food matrices, existing international scientific data do not allow for reliable prediction of their behavior within complex dairy systems.

Materials and Methods: The study focused on model systems composed of milk, pectin, and walnut flour (WF), varying in the mass fractions of pectin and WF. The research procedure included two sequential stages: preparation of the model systems and their subsequent evaluation. A total of 100 model “milk–pectin–WF” systems were prepared. The parameters assessed included active acidity (pH), titratable acidity, and sensory attributes. Both standardized and original research methods were employed. Data analysis was carried out using Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc.) and TableCurve 3D software.

Results: The analysis of the relationship between the pH of the three-component system and its overall sensory evaluation revealed a clearly defined boundary of the experimental data set in the «pH – sensory index» coordinate space. Near the points where this boundary is intersected, the uncertainty of the relationship was minimal, whereas it increased with greater deviation from these points. The data suggest that the farther the pH value deviates from a certain intermediate level, the more pronounced its influence on the sensory properties of the system becomes. Conversely, at pH values close to this intermediate level, there may be a masking effect or a reduction in the stabilizing effect caused by unidentified components. Thus, the intermediate pH value can be considered a zone of maximum sensitivity of the system to compositional changes, while deviation from this value serves as a factor that increases the predictability of the sensory response.

Conclusion: The complex interactions within the “milk–WF–pectin” system require further in-depth study to verify foundational hypotheses and assumptions, and they point to possible approaches for ingredient-based system adjustment. One such approach may involve the introduction of an additional component aimed at selectively modulating the basic processes involved in system formation.

KEYWORDS

milk; multicomponent systems; sensory properties; titratable acidity; pectin; walnut flour

ВВЕДЕНИЕ

Создание поликомпонентных систем на молочной основе является базисным вектором развития направления разработки новых видов пищевых продуктов с акцентом на дополнительные полезные эффекты от их употребления (Донская и соавт., 2024; Креккер и соавт., 2023; Vasbous et al., 2024; Furuki et al., 2024). Кроме того, в тренде создания новых продуктов «правильного питания» актуальна тенденция по разработке пищевых систем, не содержащих «лёгкие» углеводы (Бычкова и соавт., 2014; Зобкова & Лазарева, 2021; Юдин, 2023). С другой стороны, современный образ жизни привёл к изменениям в пищевых привычках, таким как употребление в пищу продуктов с высоким содержанием насыщенных жиров, сахара и соли, которые являются факторами риска для неинфекционных заболеваний (Юрова и соавт., 2022; Offia-Olua, 2014). Изменить эту негативную тенденцию возможно, предлагая потребителю полезные продукты с новыми привлекательными потребительскими свойствами (Колоколова и соавт., 2024; Донская, 2020; Рожкова и соавт., 2020).

Одним из перспективных ингредиентов для интегрирования в молочные продукты с точки зрения их обогащения является мука орехоплодных, обладающая неоспоримой пользой для организма человека, в частности, мука грецкого ореха (МГО) (Алехина и соавт., 2023; Martín-Esparza et al., 2021; Nu et al., 2022). Регулярное употребление продуктов, содержащих МГО, способствует снижению содержания общего холестерина, а также уровня липопротеинов низкой плотности и повышению уровня липопротеинов высокой плотности в крови. МГО содержит до 72 % мононенасыщенных жирных кислот, является источником всех незаменимых жирных кислот, которые благодаря своему противовоспалительному действию помогают снизить риск гипертонии, ишемической болезни сердца, инсульта, а также рака молочной железы, толстой кишки и простаты (Offia-Olua, 2014; Santos et al., 2018).

Мука ГО является богатым источником фитохимических веществ с антиоксидантной активностью, включая мелатонин, эллаговую кислоту, витамин Е (гамма-токоферол), каротиноиды и полифенольные соединения. В состав МГО входит также ряд витаминов группы В, таких как рибофлавин, ниацин, тиамин, пантотеновая кислота, витамин В6 и фо-

лиевая кислота. Помимо этого, мука ГО отличается богатым минеральным комплексом, в состав которого входят марганец, медь, калий, кальций, железо, магний, цинк и селен, которые, в свою очередь, являются кофакторами для многих жизненно важных ферментов, включая цитохром-с-оксидазу, супероксиддисмутазу, глутатионпероксидазу и др. (Хуцишвили и соавт., 2018; Васипов & Вытовтов, 2016).

Несмотря на очевидную пользу для организма человека, мука грецкого ореха используется преимущественно в кондитерских изделиях и хлебопечении (Offia-Olua, 2014; Wójcik et al., 2023; Pycia & Juszczak, 2023; Burbano, 2022; Chochkov et al., 2016), что обусловлено проблемой стабилизации дисперсной фазы ореховой муки в молоке, обладающей ограниченной растворимостью. Максимальные значения растворимости МГО фиксируются при щелочном pH, нехарактерном для молочных пищевых систем, что сдерживает их применение в молокоперерабатывающей отрасли (Burbano et al., 2024). Существует ограниченное количество локальных исследований по включению МГО в рецептуры молочных и кисломолочных продуктов, свидетельствующие скорее о перспективности таких разработок, чем об их практической реализации (Хуцишвили и соавт., 2018; Афанасьева & Широкова, 2021). Помимо проблемы формирования привлекательной консистенции продуктов с МГО, возникает вероятность возникновения в потенциальном продукте горького привкуса, обусловленного высоким содержанием фенольных соединений в ядре и околоядерной пленке, которые в то же время обладают доказанным антиоксидантным эффектом (Santos et al., 2018; Almoraie, 2019; Deedam et al., 2020).

Достичь стабильной к расслоению текстуры продукта на основе молока с использованием МГО и нивелировать горечь возможно при помощи различных гидроколлоидов (Зобкова, 2025), самым перспективным из них является пектин, обладающий также рядом функциональных свойств и может выступать как безопасное натуральное детоксицирующее средство, выводящее из организма ионы тяжелых металлов (Nabiyeva et al., 2021). Высокометоксилированный пектин имеет широкое применение в технологиях кисломолочных продуктов, при средних значениях pH около 4,0, вступая во взаимодействие с казеином и способствуя формированию гелей (Jensen et al., 2010; Nobuhara et al., 2014; Laurent & Boulenguer, 2003). Низкоме-

токсигированный пектин, в отличие от высокометоксилированного, не вступает во взаимодействие с мицеллами казеина и компонентами ореховой муки, он имеет способность нейтрализовывать катионы кальция, тем самым предотвращая коагуляцию, позволяя достичь заданной нами вязко-текучей консистенции. По мнению некоторых исследователей, казеин просто служит источником ионов кальция, которые способствуют гелеобразованию пектина (Oakenfull et al., 2000; Wójcik, Dziki, Matwijczuk, & Gawlik-Dziki, 2023; Ye et al., 2024).

Разработка стойких дисперсных систем на молочной основе с использованием МГО, стабилизированных пектином, является актуальной с точки зрения создания новой линейки молочных продуктов, сочетающих пользу молочных и растительных компонентов. Целью текущего исследования являлось определение влияния дисперсной фазы МГО на активную и титруемую кислотность и органолептические показатели системы «молоко-пектин».

Исследовательские вопросы:

RQ#1: Какое влияние оказывает МГО на активную и титруемую кислотность и органолептические свойства систем «молоко-пектин»?

RQ#2: Какие факторы влияют на формирование органолептических свойств систем «молоко-пектин-МГО»?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектом исследования являлись модельные системы «молоко-пектин-МГО» с различными массовыми долями пектина (от 0,1 до 1,0 %) и МГО (от 1,0 до 10,0 %).

Материалы

Для приготовления и изучения модельных систем «молоко-пектин-МГО» использовали:

- (1) молоко топленое «Молочная станция» (АО «Верховский молочно-консервный завод», Россия);
- (2) обезжиренная мука грецкого ореха с массовой долей белка 15,0 %, массовая долей жира

18,0 %, массовой долей углеводов 3,0 % (промышленная компания «Народная Здрава», Россия);

- (3) низкоэтерифицированный амидированный пектин марки APC201Y со степенью этерификации (27 ± 3 %), степенью амидирования (22 ± 3 %) («DSM Andre Pectin», Китай);
- (4) натрий гидроокись 0,1N (ЗАО «Уралхиминвест», Россия);
- (5) спиртовой раствор фенолфталеина с массовой концентрацией 10 г/дм³.

Методы

Приготовление модельных систем

Необходимое количество компонентов отвешивали согласно рецептуре, далее в термостойкий стакан помещали пектин, добавляли по каплям 0,5 мл этилового спирта крепостью 96,0 % об., доливали предварительно нагретую до 60 °С дистиллированную воду при непрерывном перемешивании и выдерживали при этой температуре 30 мин на водяной бане Stegler WB-6 (Shanghai Jingke Scientific Instrument Co., Ltd; Китай) при температуре 60 °С. Затем раствор пектина охлаждали до 40 °С и при непрерывном перемешивании добавляли пастеризованное топленое молоко с такой же температурой. Смесь выдерживали на водяной бане 30 мин при температуре 40 °С. Далее в смесь добавляли заданное рецептурой количество МГО при непрерывном перемешивании до образования гомогенной дисперсной структуры, после чего полученную систему выдерживали 30 мин при температуре 40 °С и охлаждали до комнатной температуры.

Активная кислотность

Активную кислотность определяли потенциометрическим методом с помощью pH-метра inoLab pH/Cond Level 1 (Wissenschaftlich — Technische Werkstätten GmbH (WTW), Германия) с комбинированным стеклянным электродом WTW SenTix 81 согласно ГОСТ 32892–2014.

Титруемая кислотность

Титруемую кислотность в модельных системах определяли методом с применением индикатора фенолфталеина по ГОСТ 3624–92 с коэффициентом пересчета 10.

Органолептические показатели

Оценку органолептических показателей проводили по ГОСТ ISO 4121–2016 по однополярной интервальной числовой шкале от 0 до 5 баллов по методике условного профилирования.

Процедура исследования

Процедура исследования состояла из двух последовательных этапов: приготовление модельных систем и их исследование. Всего было подготовлено 100 модельных систем «молоко-пектин-МГО». Их состав рассчитывали так, чтобы массовая доля топленного молока была 50%, массовая доля пектина — от 0,1 до 1,0% с шагом 0,1, массовая доля МГО — от 1,0 до 10,0% с шагом 1,0. Объем до 100% доводили дистиллированной водой. Приготовленные модельные системы оставляли на хранение в течение 24 часов при температуре $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$. Далее определяли их активную и титруемую кислотность и органолептические показатели. Все эксперименты проводили в трехкратной повторности.

Анализ данных

Все результаты представлены по данным трех независимых экспериментов. Результаты представляли как среднее значение. Для обработки полученных данных и построения графиков использовали стандартные статистические методы на базе табличного процессора Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation Inc., США) и программного обеспечения TableCurve 3D (Grafiti LLC Headquarters, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка влияния пектина и МГО на активную и титруемую кислотность модельных систем

В результате проведенных исследований для каждого варианта соотношения «пектин — МГО» были получены экспериментальные данные, включающие активную (рН) и титруемую кислотность, а также основные органолептические показатели: консистенцию, вкус, запах, цвет. В общей совокупности данных имела место вариативность по рН в пределах от 5,4 до 6,4 и титруемой кислотности в пределах

от 10,67 до 77,33 °Т. Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение массовой доли пектина приводит к некоторому снижению рН трёхкомпонентной системы (Рисунок 1), что логично, поскольку пектин имеет в составе остатки галактуронозойной кислоты, несущие в том числе и свободные карбоксильные группы, и при увеличении концентрации кислотных групп в системе рН должен закономерно демонстрировать некоторое снижение.

На рисунке данное влияние прослеживается визуально. При этом коэффициент корреляции рассматриваемой взаимосвязи составляет $-0,67$, что говорит о преобладающей доле данного влияния, но недостаточной для прогностической оценки значения рН.

Теоретически, рН и титруемая кислотность, при рассмотрении их природы как результата накопления в системе свободных ионов гидроксония, должны демонстрировать определённую взаимосвязь друг с другом. Однако, вопреки ожиданиям, статистически значимого влияния массовой доли пектина на титруемую кислотность выявлено не было. Коэффициент корреляции составил всего $-0,19$. В противоположность пектину, на титруемую кислотность оказывала влияние массовая доля МГО (Рисунок 2).

Рисунок 1

Влияние массовой доли пектина на рН трёхкомпонентной системы

Figure 1

Effect of Pectin Mass Fraction on the pH for the Three-Component System

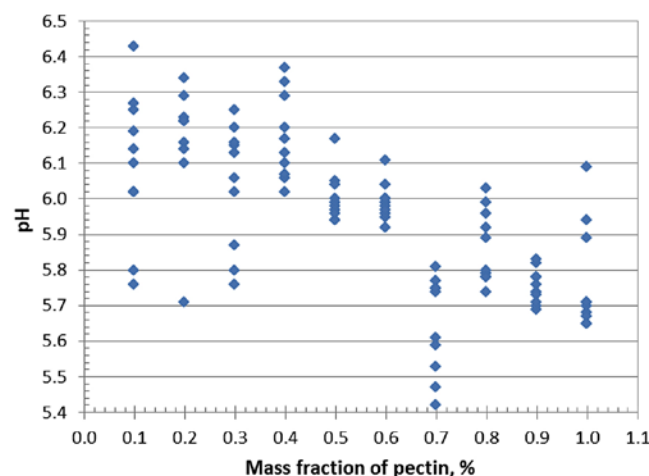
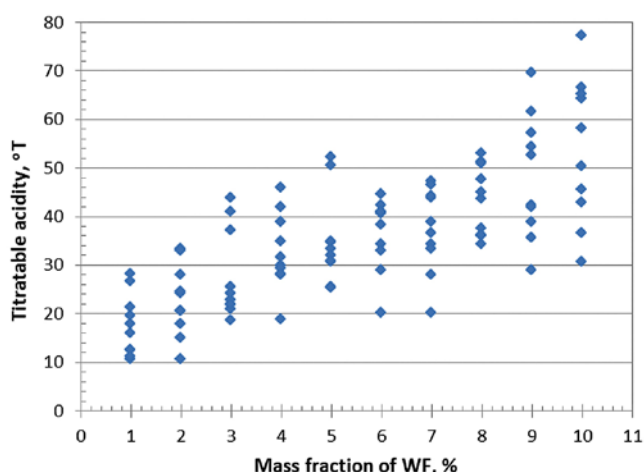


Рисунок 2

Влияние массовой доли МГО (в английской интерпретации WF – от «walnut flour») на титруемую кислотность трёхкомпонентной системы

Figure 2

Influence of MF Mass Fraction on Titratable Acidity of Three-Component System



С учётом некоторой доли неопределённости коэффициент корреляции составил 0,75. При этом визуально идентифицируется практически прямая зависимость, возмущаемая в сторону увеличения титруемой кислотности при массовой доле МГО, равной или меньшей 5, и – в сторону уменьшения показателя при массовой доле МГО, равной или большей 6. То есть, влияние МГО на титруемую кислотность оказалось выше, чем пектина на рН. Но, в свою очередь, массовая доля МГО практически не оказывала влияния на рН (коэффициент корреляции -0,13). В результате получили противоречие: оба показателя – и рН, и титруемая кислотность – теоретически, должны отражать суть проявления средой кислотных свойств, вследствие чего должна иметь место корреляция между ними или, что, фактически, то же самое, массовые доли пектина и МГО, показывая корреляцию с одним вариантом отображения кислотности, должны показывать наличие корреляции и с другим. Однако, как показали результаты исследований, этого не происходит. Отталкиваясь от природы рН, можем предположить, что в составе МГО содержатся компоненты, способные в сочетании с молоком и пектином проявлять себя в качестве кислот и оснований Льюиса, тем самым оказывая значимое влияние на титруемую кислотность без обязательной необходимости участия в процессе продуцирования катионов H^+ (Carey, 2003, Greenwood et al., 1997). Данное предположение

ложение косвенно подтверждается положительной корреляцией титруемой кислотности с массовой долей МГО. При этом вероятно, в рассматриваемой системе титруемая кислотность формируется преимущественно по данному механизму, поскольку вклад катионов H^+ , вносимый диссоциацией карбоксильных групп пектина, непосредственного влияния не оказывает.

В этой связи возникает вопрос о влиянии каждого из факторов кислотности на проявление органолептических свойств.

Исследование влияния величины рН, титруемой кислотности и состава модельных систем на их органолептические характеристики

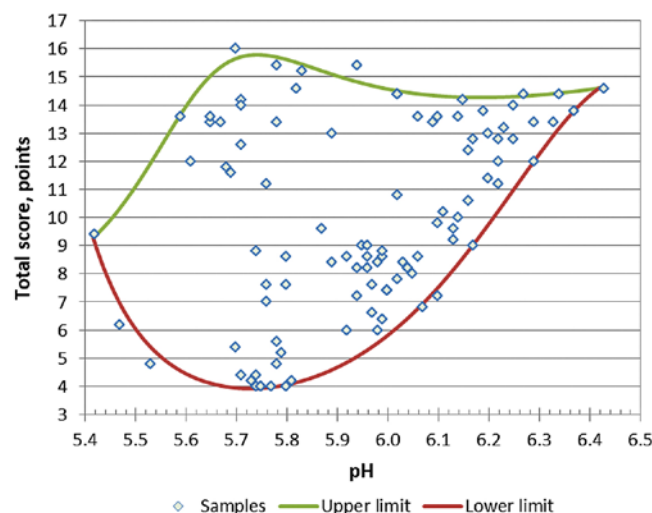
Для учёта всей совокупности органолептических свойств исследованных трёхкомпонентных систем, в дальнейшем оперировали интегральным показателем, представляющим собой сумму баллов. Результаты исследований показали нетривиальную картину взаимосвязи рН трёхкомпонентной системы и общей органолептической оценки (Рисунок 3). При отсутствии явно выраженной взаи-

Рисунок 3

Влияние рН системы «молоко – пектин – МГО» на интегральный органолептический показатель (Upper и Lower limit – верхняя и нижняя границы, соответственно, Samples – экспериментальные данные)

Figure 3

Effect of pH of the System “Milk – Pectin – WF” on the Total Score



мосвязи обращает на себя внимание резкая очерченность границы множества экспериментальных данных в координатах «рН — интегральный органолептический показатель».

В результате аппроксимации пограничных экспериментальных данных были определены эмпирические модели, адекватно описывающие, соответственно, нижнюю и верхнюю границы множества:

$$TS = \exp(a + b \cdot pH + c \cdot pH^2 + pH^3), \quad (1)$$

$$TS = \frac{a + c \cdot pH^{0.5} + e \cdot pH + g \cdot pH^{1.5}}{1 + b \cdot pH^{0.5} + d \cdot pH + f \cdot pH^{1.5}}, \quad (2)$$

где TS — сумма баллов органолептического анализа, балл; a — константы; b, c, d, e, f и g — коэффициенты.

Статистические характеристики моделей представлены в Таблице 2.

Верхняя и нижняя границы имеют выраженный максимум и минимум, соответственно, при рН системы в пределах 5.7–5.8. Обращает на себя внимание замкнутость границ: верхняя и нижняя границы пересекаются в точках [5.42; 9.27] и [6.42; 14.60], практически все экспериментальные данные находятся внутри области, между границами. При этом, чем ближе к точкам пересечения, тем меньше неопределённость взаимосвязи, и — наоборот. Этот факт может косвенно указывать, что чем дальше значение рН трёхкомпонентной системы от некоторого промежуточного значения, тем выше однозначность влияния показателя на её органолептические свойства, тогда как промежуточное значение является оптимумом для проявления неустанов-

ленными компонентами маскирующего эффекта, либо снижения ими стабилизирующего эффекта. Двуплечий характер проявления неопределённости позволяет предполагать, что эти компоненты имеют белковую природу, и изменение конформации вследствие изменения рН приводит либо к вовлечению в проявление органолептических свойств дополнительных функциональных групп, либо к частичной инактивации в области, вероятно, имеющей природу изоэлектрической точки, когда стабильность компонентов в системе снижается до минимума. Примечательно, что на данном этапе исследований обе гипотезы равнозначны, не имея друг перед другом каких-либо преимуществ.

В то же время каких-либо особенностей влияния титруемой кислотности как таковой на интегральный показатель органолептических свойств выявлено не было.

Нехарактерный результат был получен при анализе взаимосвязи рН трёхкомпонентных систем «молоко — пектин — МГО» и титруемой кислотности. Массив из ста точек, полученных в результате исследований, образовал в координатах «рН — титруемая кислотность» некоторое подобие треугольника с криволинейными сторонами и основанием, почти сонаправленным оси абсцисс, и выраженными вершинами (Рисунок 4).

Наложение экспериментальных данных, соответствующих верхней и нижней границам рисунка 3, не позволило выявить однозначной общей закономерности их распределения в пределах «криволинейного» треугольника на рисунке 4. Однако имели место некоторые частные закономерности, интервального характера, зашумленные данными

Таблица 2

Статистические характеристики моделей верхней и нижней границ множества данных влияния рН системы на её интегральный органолептический показатель

Table 2

Statistical Characteristics of Models for the Upper and Lower Bounds of the Data set for the Influence of the System' pH on Its Integral Organoleptic Index

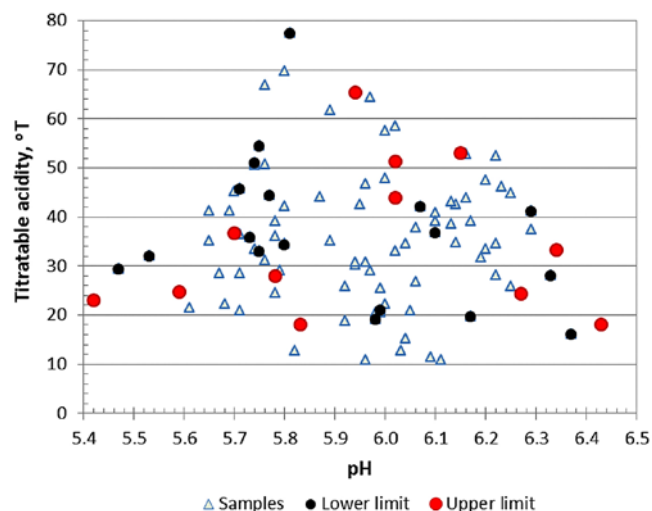
Модель	Константа и коэффициенты							r^2	$P > F$	
	a	b	c	d	e	f	g			
Нижняя граница	значение	1378.582	-681.542	112.038	-6.115	-	-	-	0.9935	< 10 ⁻⁵
	$P > t $	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	-	-	-		
Верхняя граница	значение	0.577	-1.162	0.206	0.447	-0.486	-0.057	0.125	0.9789	0.0005
	$P > t $	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵		

Рисунок 4

Эмпирическая взаимосвязь pH и титруемой кислотности в системе «молоко – пектин – МГО»

Figure 4

Empirical Relationship between pH and Titratable Acidity in the System “Milk – Pectin – WF”



с промежуточными значениями органолептической оценки. Так, визуально может быть идентифицировано значение pH 5,9, разделяющее треугольник на две области. В левой, в диапазоне меньших

значений pH, расположение точек верхней границы было стохастично относительно значений титруемой кислотности, тогда как расположение точек нижней границы демонстрировало прямую экспоненциальную зависимость титруемой кислотности от pH с увеличивающейся зашумленностью при приближении к границе раздела областей. В области, соответствующей диапазону больших значений pH, имела место обратная тенденция: на фоне стохастичного расположения относительно титруемой кислотности точек, соответствующих нижней границе, точки верхней границы демонстрировали зашумленную, но обратную, практически линейную взаимосвязь pH и титруемой кислотности. В целом, общий характер неопределённости между pH и титруемой кислотностью, так же, как и в случае с ситуацией, представленной на рисунке 3, наталкивает на мысль о белковой природе факторов, определяющих эту неопределённость и влияющих на её выраженность, с критической точкой (возможно — изоэлектрической) в районе pH 5,9.

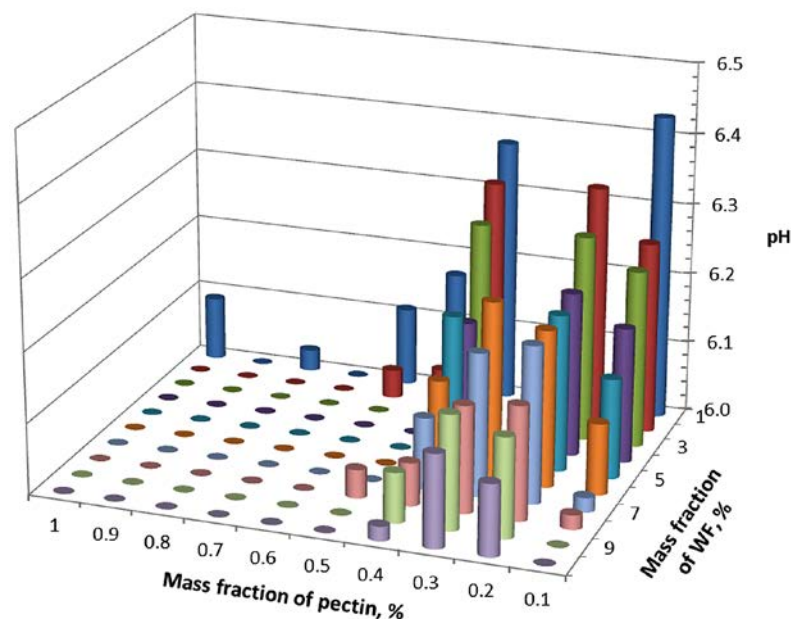
В этой связи довольно показательна картина комплексного влияния массовых долей пектина и МГО в трёхкомпонентной системе на pH в диапазоне значений зависимого фактора от 6 и выше (Рисунок 5).

Рисунок 5

Влияние массовых долей пектина и МГО в системе «молоко – пектин – МГО» на pH (в диапазоне pH от 6 и выше)

Figure 5

Effect of Pectin and WF Mass Fractions in the System “Milk – Pectin – WF” on pH (in pH range from 6 and above)



Несмотря на отсутствие общей корреляции между массовой долей МГО и рН, в диапазоне массовой доли пектина от 0,1 до 0,4% такая корреляция уже имеет место, и логично вписывается в картину формирования рН, уменьшая её значение при увеличении массовой доли МГО. И лишь при добавлении диапазона рН со значениями, меньшими 6, формируемого увеличением массовой доли пектина в системе, усиливают свою роль эффекты, которые мы выше определили как увеличение доли кислот и оснований Льюиса.

Анализ влияния массовой доли пектина оказывать возмущающий эффект на взаимосвязь титруемой кислотности и массовой доли МГО показал, что такой эффект действительно имеет место (Рисунок 6).

И при этом степень проявления возмущающего эффекта зависит как от массовой доли пектина, так и соотношения массовых долей пектина и МГО, что косвенно указывает на имеющие место взаимодействия как минимум компонентов МГО и пектина и наличие некоторого спектра как вариаций этого взаимодействия, так и его результатов. Последний вывод в общих чертах вполне согласуется с существующими представлениями об особенно-

стях взаимодействия пектиновых молекул с белками, в том числе молочными (Wusigale at al., 2020).

Анализ совокупности рассмотренных выше результатов исследований, предложенных гипотез, а также современных представлений о молекулярной структуре пектиновых молекул и сложном составе МГО позволяют предположить о весьма неоднозначном совместном влиянии массовых долей пектина и МГО на проявление органолептических свойств исследованных трёхкомпонентных систем с их участием. Результаты непосредственного исследования этого участия представлены на Рисунке 7.

Поскольку интегральный органолептический показатель включает значения органолептической оценки по четырём показателям, целесообразно рассматривать комплексное участие компонентов системы на его формирование в диапазоне значений, больших 12. В этом случае заслуживает внимания область, включающая диапазон массовой доли пектина от 0,4 до 0,8 и диапазон массовой доли МГО от 3,0 до 1,0%, для которой в пределах принятых допущений формирование трёхкомпонентной системы «молоко — пектин — МГО» не имеет смыс-

Рисунок 6

Влияние массовых долей пектина и МГО в системе «молоко — пектин — МГО» на титруемую кислотность

Figure 6

Effect of Pectin and MGO Mass Fractions in the System "Milk – Pectin – MGO" on Titratable Acidity

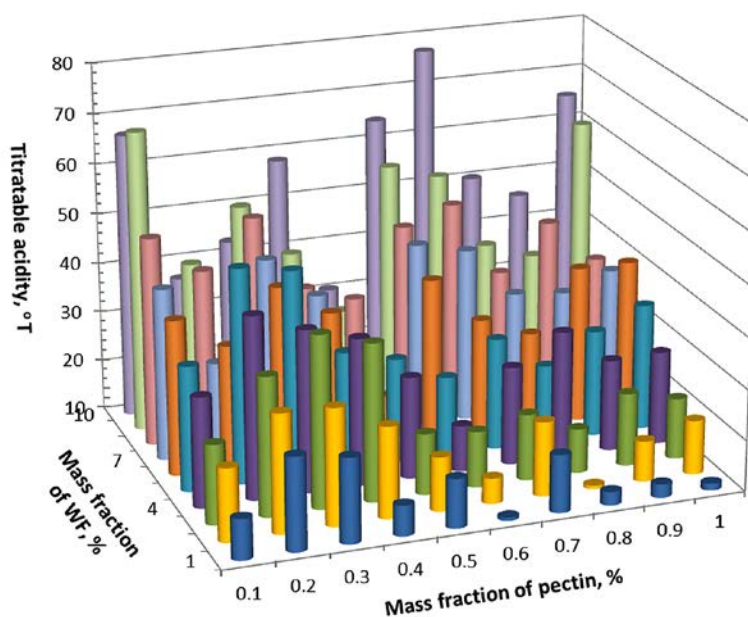
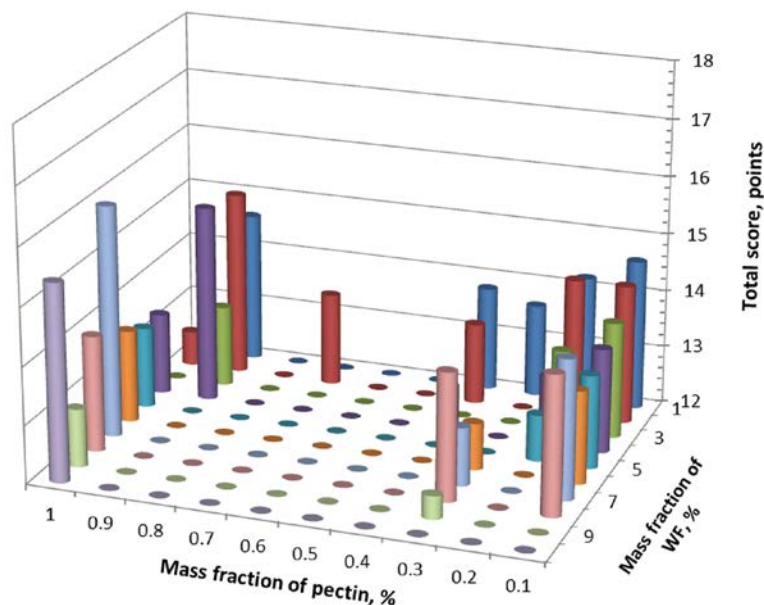


Рисунок 7

Влияние массовых долей пектина и МГО в системе «молоко – пектин – МГО» на интегральный органолептический показатель

Figure 7

Effect of Pectin and MGO Mass Fractions in the System “Milk – Pectin – MGO” on the on the Total Score



ла с точки зрения органолептической оценки полученного результата. При этом обращают на себя внимание два диапазона массовых долей пектина – от 0,1 до 0,3 % и 0,9%, – в которых интегральная органолептическая оценка системы удовлетворительна в широком интервале массовых долей МГО. В остальном диапазоне приемлемой являлась массовая доля МГО не более 0,4% или же совсем включающая приемлемые варианты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью текущего исследования являлось заполнение пробела существующих знаний посредством определения влияния дисперсной фазы МГО на активную и титруемую кислотность; органолептические показатели системы «молоко-пектин» как основы потенциальных продуктов нового поколения. Ранее проведенные исследования по проектированию пищевых систем с мукой орехоплодных были сфокусированы исключительно на продуктах хлебопекарной, кондитерской и мясной отрасли и не позволяют валидировать их на молочные системы (Алехина и соавт., 2023; Offia-Olua, 2014; Wójcik et al., 2023; Pycia & Juszczak, 2023; Burbano,

2022; Chochkov et al., 2016). Существующие знания о взаимодействии МГО с компонентами других пищевых продуктов неприменимы к молочным в силу специфики их состава и не могут быть адекватно применены к молочным системам. При этом особенности дисперсной фазы МГО свидетельствуют о прогнозируемом неоднозначном поведении в молоке, включая влияние на органолептические свойства, несмотря на очевидную пользу и перспективность её использования.

Выдвинутые предположения о неприменимости существующих знаний о влиянии МГО в сложноконтактной молочной системе были подтверждены отсутствием статистически значимого влияния массовой доли пектина на титруемую кислотность в присутствии МГО, поэтому возникал вопрос о необходимости изучения влияния каждого из факторов кислотности на проявление органолептических свойств.

Полученные результаты указывают на общий характер неопределённости между рН и титруемой кислотностью в исследуемых системах. Замкнутость границ и их пересечения могут отражать баланс между маскирующими и стабилизирующими

ми эффектами, обусловленными конформацией белков (гипотетически) вблизи изоэлектрической точки. Треугольное распределение данных и разделение при pH 5.9 косвенно подтверждают роль белковых структур, чья активность модулируется pH. Отсутствие общей корреляции титруемой кислотности с органолептическими свойствами указывает на доминирование иных факторов, таких как взаимодействие пектина с белками МГО, что согласуется с известными механизмами формирования пектин-белковых комплексов (Jensen et al., 2010; Nobuhara et al., 2014; Laurent & Boulenguer, 2003; Oakenfull et al., 2000). Оптимальные диапазоны компонентов подчёркивают нелинейность их совместного влияния, вероятно, связанную с конкурентными процессами связывания и денатурации.

Данное исследование имеет ряд сильных сторон. Например, результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили выявить особенности формирования органолептического профиля молочных систем с МГО и выявить интегральную корреляцию между ним и показателями кислотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов продемонстрировал, что при введении МГО значимое влияние массовой доли пектина на титруемую кислотность отсутствует. При этом влияние самой МГО на титруемую кислотность оказалось значимым, в отличие от pH. И титруемая, и активная кислотность в значительной степени влияют на органолептический профиль поликомпонентных молочных систем.

Предложенный подход к оценке взаимосвязи органолептических свойств и кислотности может быть использован и для оценки других физико-химических показателей, и планируется его практическое воплощение в дальнейших работах при разработке продуктов, в состав которых будет входить мука орехоплодных.

Основным ограничением исследования является то, что молочные продукты с мукой орехоплодных практически отсутствуют, несмотря на очевидную перспективность их разработки в качестве социально значимых с функциональным потенциалом.

Достаточно сложное поведение трехкомпонентной системы «молоко-МГО-пектин», с одной стороны, предполагает более глубокое её изучение для детальной проверки фундаментальных гипотез и предположений, представленных в рамках данного исследования, и, с другой стороны, наталкивает на мысль о возможных путях ингредиентной корректировки системы. Для более четкого понимания формирования органолептических свойств молочных продуктов с МГО необходимы дальнейшие исследования, посвященные поиску дополнительного компонента, направленно корректирующего протекание базовых процессов при формировании системы.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Евгения Юрьевна Агаркова: концептуализация; разработка методологии исследования; руководство исследованием.

Владимир Владимирович Кондратенко: создание рукописи и её редактирование; формальный анализ; работа с программным обеспечением.

Анастасия Евгеньевна Рябова: предоставление ресурсов; администрирование проекта.

Алексей Николаевич Яшин: создание черновика рукописи; визуализация данных.

Дарья Николаевна Глазунова: проведение исследований.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Evgeniya Yu. Agarkova: conceptualization; development of research methodology; research management.

Vladimir V. Kondratenko: creation of the manuscript and its editing; formal analysis; work with software.

Anastasia E. Ryabova: providing resources; project administration.

Alexey N. Yashin: drafting manuscript; data visualization.

Dariya N. Glazunova: conducting research.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Алехина, Н.Н., Пономарева, Е.И., Бакаева, И.А. (2023). Разработка технологии хлеба функционального назначения на основе хлебопекарной смеси из биоактивированной пшеницы и ржи. *FOOD METAENGINEERING*, 1(2), 41–53. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.2.16>
- Alekhina, N. N., Ponomareva, E. I., & Bakaeva, I. A. (2023). Development of functional bread technology using bioactivated wheat and rye flour. *FOOD METAENGINEERING*, 1(2), 41–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.37442/fme.2023.2.16>
- Афанасьева, М. М., & Широкова, Н. В. (2021). Актуальность использования растительных ингредиентов в технологии кисломолочного продукта. *Инновационные технологии продуктов питания и кормов* (с. 6–9). Ростов-на-Дону: Донской государственный аграрный университет.
- Afanasyeva, M. M., & Shirokova, N. V. (2021). The relevance of using plant-based ingredients in fermented milk product technology. *Innovative technologies of food and feed* (pp. 6–9). Rostov-on-Don: Don State Agrarian University. (In Russ.)
- Бычкова, Т.С., Донская, Г.А., Крутина, Е.М., Дягилева, Ю.А. (2024). Кисломолочный продукт с противолучевой добавкой как средство стабилизации антиоксидантного статуса организма. *Пищевая промышленность*, (12), 74–79. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.12.12.014>
- Bychkova, T.S., Donskaya, G.A., Krutina, E.M., Dyagileva, Yu.A. (2024). Fermented milk product with antiradiation additive as a means of stabilizing the antioxidant status of the body. *Food Industry*, (12), 74–79. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.12.12.014> (In Russ.)
- Васипов, В. В., & Вытовтов, А. А. (2016). Обоснование использования муки из жмыха грецкого ореха (*Juglans regia* L.) в рецептуре мучных кондитерских и хлебобулочных изделий специализированного назначения. *Пищевые инновации и биотехнологии: материалы IV Международной научной конференции* (с. 42–45). Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.
- Vasipov, V. V., & Vytovtov, A. A. (2016). Rationale for the use of walnut meal flour in specialized bakery and confectionery formulations. *Food innovations and biotechnologies: Proceedings of the 4th International Scientific Conference* (pp. 42–45). Kemerovo: Kemerovo Technological Institute of Food Industry. (In Russ.)
- Донская, Г.А. (2020). Антиоксидантные свойства молока и молочных продуктов: обзор. *Пищевая промышленность*, (12), 86–91. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10150>
- Donskaya, G. A. (2020). Antioxidant properties of milk and dairy products: A review. *Food Industry*, (12), 86–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10150>
- Донская, Г.А., Креккер, Л.Г., Колосова, Е.В. (2024) Радиопротекторные ингредиенты композиционного молочного продукта. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*, 27(2), 193–204. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-193-204>
- Donskaya, G.A., Krekker, L.G., Kolosova, E.V. (2024) Radioprotective ingredients of a composite dairy product. *Vestnik of MAU. Works of Murmansk Arctic University*, 27(2), 193–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-193-204>
- Зобкова, З. С. (2025). Влияние пищевых добавок на качество кисломолочных продуктов. *Молочная промышленность*, (1), 38–41.
- Zobkova, Z. S. The influence of food additives on the quality of fermented milk products. *Dairy industry*, (1), 38–41. (In Russ.)
- Зобкова, З. С., & Лазарева, Е. Г. (2021). Оценка антиоксидантных свойств обогащенного кисломолочного продукта с повышенной биологической ценностью. *Пищевая промышленность*, (8), 51–53. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.013>
- Zobkova, Z. S., & Lazareva, E. G. (2021). Evaluation of antioxidant properties of enriched fermented milk product with high biological value. *Food Industry*, (8), 51–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.013>

- Колоколова, А. Ю., Кишилова, С. А., Рожкова, И. В., Митрова, В. А. (2024) Изучение стимулирования роста бифидобактерий постбиотическим комплексом кисломолочного продукта как один из факторов повышения его биологической эффективности. *FOOD METAENGINEERING*, 2(2), 12-21. <https://doi.org/10.37442/fme.2024.2.56>
- Kolokolova, A. Y., Kishilova, S. A., Rozhkova, I. V., & Mitrova, V. A. (2024). The role of postbiotic composition in the growth stimulation of bifidobacteria. *FOOD METAENGINEERING*, 2(2), 12-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.37442/fme.2024.2.56>
- Креккер, Л.Г., Донская, Г.А., Колосова Е.В., В. К. Карапетян, В.К. (2023). Радиопротекторные ингредиенты для получения молочных продуктов. *Переработка молока*, 9(287), 16–20. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-193-204>
- Krekker, L.G., Donskaya, G.A., Kolosova, E.V., V.K. Karapetyan, V.K. (2023). Radioprotective ingredients for dairy products. *Milk Branch*, 9(287), 16–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-2-193-204>
- Рожкова, И. В., Бегунова, А. В., & Крысанова, Ю. И. (2020). Разработка кисломолочных продуктов с использованием пробиотиков. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*, 1(1), 45–50. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-457-461>
- Rozhkova, I. V., Begunova, A. V., & Krysanova, Y. I. (2020). Development of fermented dairy products using probiotics. *Current Issues in the Dairy Industry, Interdisciplinary Technologies, and Quality Management Systems*, 1(1), 45–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-457-461>
- Хуцишвили, М. Г., Друкер, О. В., & Крючкова, В. В. (2017). Мука грецкого ореха как растительный ингредиент в технологии обогащенного творожного продукта. *Вестник Донского государственного аграрного университета*, 4–1(26), 127–133.
- Khutsishvili, M. G., Druker, O. V., & Kryuchkova, V. V. (2017). Walnut flour as a plant-based ingredient in enriched curd product technology. *Bulletin of the Don State Agrarian University*, 4–1(26), 127–133. (In Russ.)
- Юдин, С. А. (2023). Рекламное продвижение на рынке здорового питания. *Молодёжь третьего тысячелетия* (часть 1, с. 45–50). Омск: Издательство ОмГАУ.
- Yudin, S. A. (2023). Advertising promotion in the healthy food market. *Youth of the third millennium* (part 1, pp. 45–50). Omsk: Omsk State Agrarian University Publishing House. (In Russ.)
- Юрова, Е. А., Фильчакова, С. А., & Ананьева, Н. В. (2022). Молоко как основа для производства специализированных продуктов питания с улучшенными нутритивными свойствами. *Вестник КрасГАУ*, 5(182), 206–215. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-206-215>
- Yurova, E. A., Filchakova, S. A., & Ananeva, N. V. (2022). Milk as a base for producing specialized food products with enhanced nutritional properties. *BULLETIN OF KSAU*, 5(182), 206–215. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-5-206-215>
- Almoraie, N. M. (2019). The effect of walnut flour on the physical and sensory characteristics of wheat bread. *International Journal of Food Science*, 2019(1), Article 5676205. <https://doi.org/10.1155/2019/5676205>
- Basbous, M., Yehya, N., Salti, N., Tamim, H., & Nabulsi, M. (2024). Cost-benefit analysis of a multicomponent breastfeeding promotion and support intervention in a developing country. *PLOS ONE*, 19(7), e0295194. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295194>
- Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2022). Gluten-free cakes with walnut flour: A technological, sensory, and microstructural approach. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 4772–4781. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15591>
- Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2024). Characterization and techno-functional properties of high protein walnut flour from an oil by-product. *Plant Foods for Human Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01219-1>
- Carey, F. A. (2003). *Organic chemistry* (5th ed.). Boston: McGraw-Hill.

- Chochkov, R., Ivanova, P., Petkova, N., & Desseva, I. (2016). The influence of walnut flour quantity on the quality of wheat bread. *International Journal of Engineering Research*, 7, 1161–1164.
- Deedam, N. J., China, M. A., & Wachukwu, H. I. (2020). Proximate composition, sensory properties and microbial quality of chin-chin developed from wheat and African walnut flour blends for household food security. *European Journal of Nutrition and Food Safety*, 12(6), 56–67. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2020/v12i830260>
- Furuki, T. et al. (2024) Reentrant condensation of a multicomponent cola/milk system induced by polyphosphate. *Food Chemistry: X*, 21, 101165. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101165>
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Hu G. G. et al. (2022) Applications of plant protein in the dairy industry. *Foods*, 11(8), 1067. <https://doi.org/10.3390/foods11081067>
- Jensen, S., Rolin, C., & Ipsen, R. (2010). Stabilisation of acidified skimmed milk with HM pectin. *Food Hydrocolloids*, 24(4), 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.10.004>
- Laurent, M. A., & Boulenguer, P. (2003). Stabilization mechanism of acid dairy drinks (ADD) induced by pectin. *Food Hydrocolloids*, 17(4), 445–454. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(03\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(03)00028-6)
- Martín-Esparza, M. E. et al. (2021). Role of hydrocolloids in the structure, cooking, and nutritional properties of fiber-enriched, fresh egg pasta based on tiger nut flour and durum wheat semolina. *Foods*, 10(10), 2510. <https://doi.org/10.3390/foods10102510>
- Nabiyeva, Z., Alimardanova, M., & Hasanova, S. (2021). Development of dairy products technology with application low-etherificated pectin products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(11), 111–118. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233821>
- Nobuhara, T., Matsumiya, K., Nambu, Y., Nakamura, A., Fujii, N., & Matsumura, Y. (2014). Stabilization of milk protein dispersion by soybean soluble polysaccharide under acidic pH conditions. *Food Hydrocolloids*, 34, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.022>
- Oakenfull D., Nishinari K., & Miyoshi E. A. (2000). Comparative study of milk gels formed with κ -carrageenan or low-methoxy pectin. *Hydrocolloids*, 2, 153–163. <https://doi.org/10.1016/B978-044450178-3/50080-9>
- Offia-Olua, B. I. (2014). Chemical, functional and pasting properties of wheat (*Triticum spp*)-walnut (*Juglans regia*) flour. *Food and Nutrition Sciences*, 5(16), 1591–1604. <https://doi.org/10.4236/fns.2014.516172>
- Pycia, K., & Juszczak, L. (2023). Influence of hazelnut and walnut oil cakes powder on thermal and rheological properties of wheat flour. *Foods*, 12(22), 4060. <https://doi.org/10.3390/foods12224060>
- Santos, J., Álvarez-Ortí, M., Sena-Moreno, E., Rabadán, A., Pardo, J. E., & Beatriz, M. (2018). Effect of roasting conditions on the composition and antioxidant properties of defatted walnut flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(5), 1813–1820. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8657>
- Wilbanks, D. J., Yazdi, S. R., & Lucey, J. A. (2022) Effects of varying casein and pectin concentrations on the rheology of high-protein cultured milk beverages stored at ambient temperature. *Journal of Dairy Science*, 105(1).72–82. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20597>
- Wójcik, M., Dżiki, D., Matwijczuk, A., & Gawlik-Dżiki, U. (2023). Walnut flour as an ingredient for producing low-carbohydrate bread: Physicochemical, sensory, and spectroscopic characteristics. *Foods*, 12(17), 3320. <https://doi.org/10.3390/foods12173320>
- Wusigale, L. L., & Luo, Y. (2020). Casein and pectin: Structures, interactions, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 391–403. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.027>
- Ye, X., Wei, L., Sun, L., Xu, Q., Cao, J., Li, H., Pang, Z., & Liu, X. (2024). Fabrication of food polysaccharide, protein, and polysaccharide-protein composite gels via calcium ion inducement: Gelation mechanisms, conditional factors, and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135397–135397. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135397>

Органолептические и физико-химические показатели качества пива с использованием солода и зерна озимой тритикале

¹ Самарский государственный аграрный университет, г. Самара. Российская Федерация

² Самарский ФИЦ РАН, Самарский НИИСХ им. Н. М. Тулайкова, г. Самара. Российская Федерация

³ Самарский государственный технический университет, г. Самара. Российская Федерация

Д.В. Зипаев¹, А.Н. Макушин¹, Т.А. Горянина², А.Н. Кожухов³

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Дмитрий Владимирович Зипаев

E-mail: dvz7@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Зипаев, Д.В., Макушин, А.Н., Горянина, Т.А., & Кожухов, А.Н. (2025). Органолептические и физико-химические показатели качества пива с использованием солода и зерна озимой тритикале. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 82-94. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.619>

ПОСТУПИЛА: 11.10.2024

ДОРАБОТАНА: 05.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Ввиду высоких темпов процессов импортозамещения в пивоваренной отрасли наиболее перспективным направлением является использование нетрадиционного растительного сырья, возделываемого на территории РФ и последующее его использование в технологии солода и пива. Благодаря сочетанию генетических и технологических свойств именно озимая тритикале представляет интерес с научной точки зрения в области биотехнологии броидильных производств.

Цель: Изучение органолептических и физико-химических показателей качества пива с использованием солода и зерна нового сорта озимой тритикале выведенного на территории Самарской области для реализации программы импортозамещения.

Материалы и методы: Материалами для исследований служили полученные экспериментальные образцы пива с различным содержанием соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале сорта Спика. Определение органолептических показателей осуществлялось согласно ГОСТ 30060-22 с привлечением респондентов для дегустационной оценки напитка. Физико-химические свойства определяли с использованием следующей нормативно-технической документации: ГОСТ 12787-2021, ГОСТ 12788-87, 12789-2022, ГОСТ 12789-2022, ГОСТ 34789-2021.

Результаты: Получены опытные образцы пива с 10, 15 и 25%-ным содержанием солода и зерна тритикале сорта Спика. При исследовании органолептических свойств установлено, что применение тритикалевого солода массовой долей 15 % от общего объема используемых зернопродуктов является наилучшим по сравнению с другими вариантами опытных образцов.

Выводы: В ходе проведения эксперимента было установлено, что наилучшие свойства показал образец пива с содержанием 15 % тритикалевого солода, однако у образца с содержанием 20 % солода из озимой тритикале наблюдалась наилучшая пеностойкость. В целом экспериментальные исследования показали прямую зависимость массовой доли вносимого солода и зерна тритикале сорта Спика на органолептические и физико-химические свойства готового напитка. Полученные результаты исследований позволят специалистам броидильной отрасли расширить ассортимент выпускаемой продукции из отечественного сырья, использовать тритикалевым солод в качестве замены используемых ранее в производстве импортных солодов (например, пшеничного или ржаного), а также значительно сократить время при разработке новых или корректировки существующих рецептур получения различных марок пива на отечественном рынке пивоваренной продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

озимая тритикале; сорт Спика; тритикалевым солод; несоложенное зерно; производство пива; органолептические показатели качества; физико-химические показатели; индустрия брожения

Organoleptic and physicochemical quality indicators of beer using winter triticale malt and grain

¹ Samara State Agrarian University,
Samara, Russian Federation

² SSRAI – Branch of SamSC RAS,
Samara, Russian Federation

³ Samara State Technical University,
Samara, Russian Federation

Dmitry V. Zipaev¹, Andrey N. Makushin¹, Tatyana A. Goryanina²,
Alexander N. Kozhukhov³

CORRESPONDENCE:

Dmitry V. Zipaev

E-mail: dvz7@mail.ru

FOR CITATIONS:

Zipaev, D.V., Makushin, A.N., Goryanina, T.A., & Kozhukhov, A.N. (2025).

Organoleptic and physicochemical quality indicators of beer using winter triticale malt and grain. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 82-94. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.619>

RECEIVED: 11.10.2024

REVISED: 05.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Considering the high rates of import substitution processes in the brewing industry, the most promising direction is the use of non-traditional plant raw materials grown in the Russian Federation and their subsequent use in malt and beer technology. Due to the combination of genetic and technological properties, winter triticale holds significant interest in the field of biotechnology of fermentation industries.

Purpose: To study organoleptic and physicochemical indicators of beer quality using malt and grain of a new variety of winter triticale bred in the Samara region for the implementation of the import substitution program.

Materials and Methods: The obtained experimental samples of beer with different contents of malted and unmalted raw materials of Spica winter triticale variety served as the materials for the research. The organoleptic indicators were determined according to GOST 30060-22 and with a tasting assessment of the drink by the respondents. The physicochemical properties were determined using: GOST 12787-2021, GOST 12788-87, 12789-2022, GOST 12789-2022, GOST 34789-2021.

Results: Experimental samples of beer with 10, 15 and 25 % malt and triticale grain of the Spica variety were obtained. The analysis of the organoleptic properties demonstrated that a 15 % triticale malt inclusion (by total grain product volume) yielded superior results compared to the other experimental samples.

Conclusion: During the experiment, it was found that the best properties were demonstrated by a beer sample containing 15 % triticale malt, but the best foam stability was observed in a sample containing 20 % winter triticale malt. In general, the experimental studies showed a direct dependence of the mass fraction of added malt and triticale grain of the Spica variety on the organoleptic and physicochemical properties of the finished drink. The obtained research results will allow specialists in the fermentation industry to expand the range of products manufactured from domestic raw materials, use triticale malt as a replacement for previously used imported malts (for example, wheat or rye), and significantly reduce the time required to develop new or adjust existing recipes for obtaining various brands of beer on the domestic brewing market.

KEYWORDS

winter triticale; Spica variety; triticale malt; unmalted grain; beer production; organoleptic quality indicators; physicochemical indicators; fermentation industry

ВВЕДЕНИЕ

В виду значительного перераспределения потоков поставляемого сырья из-за рубежа для пивоваренной отрасли, а также политики его импортозамещения ушедших с рынка ряда ключевых поставщиков, значительных изменений в ассортименте выпускаемой продукции пивоваренными компаниями из-за аннулирования лицензий на выпуск продукции иностранных брендов, становится все более актуальным вопрос разработки новых сортов пива, не уступающих по качеству и категории ушедших с потребительского рынка компаний поставщиков сырья и готовой продукции (Bogdan et al., 2017; Goode et al., 2006). Одной из важнейших задач становится реализация проектов разработки новых российских сортов пива с использованием местных зерновых культур (Баланов и соавт., 2017; Моргунова и соавт., 2022). Наиболее перспективным направлением переработки нетрадиционного растительного сырья в технологии броидильных производств с экономической и технологической точек зрения является применение одного их новых сортов озимой тритикале, выведенных на территории Самарской области в Самарском НИИСХ — филиале СамНЦ РАН (Горянина, 2022). Данная культура обладает значительным потенциалом для использования в пивоваренной отрасли, как с технологической точки зрения, так и с точки зрения ее качественных характеристик (Зипаев и соавт., 2017; Glattharetal., 2002).

В научной литературе отсутствуют исследования посвященные изучению свойств пива полученного с использованием нового сорта озимой тритикале выведенного и районированного в зоне рискованного земледелия, к которой относится Самарская область.

Цель текущего исследования: изучение органолептических и физико-химических показателей качества пива с использованием солода и зерна нового сорта озимой тритикале выведенного на территории Самарской области для реализации программы импортозамещения. Исследовательские вопросы:

RQ#1: Насколько целесообразно использование нового сорта озимой тритикале в качестве сырья для пивоваренной отрасли в Российской Федерации?;

RQ#2: Каковы органолептические свойства пива, полученного с использованием соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале?;

RQ#3: Каковы физико-химические показатели качества пива, произведённого с использованием соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале?

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Основные направления исследования озимой тритикале

Современные исследования сосредоточены не только на использовании тритикале, как культуры как таковой в соложенном и несоложенном виде (Pribić et al., 2024), но и посвящены изучению реологических свойств (Rosa et al., 2022) получаемого суслу при различном соотношении зерна или солода из тритикале к ячменному солоду. Ячменный солод был и остаётся базовым компонентом зернового сырья при производстве пива и играет роль стабилизирующего агента при неблагоприятных технологических условиях процесса затирания и фильтрации суслу (Тян и соавт., 2021). В частности, Glatthar et al. (2003) и Ambriz-Vidal et al. (2019), делают акцент на увеличение вязкости получаемого суслу из зерна и солода тритикале. Существенное значение имеет белковый состав того или иного сорта тритикале выведенные учеными-селекционерами в различных почвенно-климатических зонах. Отсюда и весьма широкий диапазон полученных результатов исследований: у одних исследователей требуется дополнительное использование различных ферментативных препаратов, (Bogdan et al., 2017; Кобелев и соавт., 2016) у других — без их использования (Моргунова и соавт., 2022; Grujić et al., 2007; Rosa et al., 2022) получают весьма достойные результаты: удалось снизить вязкость суслу до 1,5 мПа·с, благодаря использованию инфузии на стадии затирания или использованию смеси солодов полученных из зерна различных сортов озимой тритикале при получении пивного суслу.

Область применения озимой тритикале

Подход к подбору сортов тритикале для использования в производстве напитков брожения представляет собой перспективное направление исследований. Долгое время этот гибрид пшеницы и ржи использовался преимущественно в качестве кормовой культуры как в нашей стране (Шпилев и соавт., 2023; Гольдварг и соавт., 2010; Потапова и соавт., 2009), так и в странах Европы (Lithourgidis et al., 2018; Giunta et al., 2016; De Zutter et al., 2023) и Северной Америки (Ayalew et al., 2018; Gill et al., 2016). Однако расширение сфер его применения в пищевой промышленности может существенно повысить его значимость как зерновой культуры. Glatthar et al., 2003 и Cadenas et al. (2021) отмечают, что использование ферментов при получении тритикалевого суслу с использованием соложенного и несоложенного сырья (Glatthar et al., 2005) снижает его вязкость и повышает его массовую долю с 60 до 80 % в общем объеме используемых зернопродуктов при получении пива (Grujić et al., 2010; 2007).

Применение в технологии бродильных производств

В российских публикациях (Кобелев и соавт., 2014) с точки зрения использования в бродильных производствах в основном использовались сорта тритикале культивируемые на территориях Ростовской, Кировской и Московской областей (Кобелев и соавт., 2016; Кобелев и соавт., 2013). Существенная роль при исследованиях отводилась изучению экстрактивности получаемого светлого и темного тритикалевого солода, а также уделено внимание изучению содержания крахмала и белка, а также подбору комплекса ферментных препаратов для увеличения выхода экстрактивных веществ в процессе затирания зернопродуктов (Оверченко и соавт., 2014). Другие же ученые рассматривают возможность использование тритикале не только в пивоваренной отрасли, но и для использования солода из различных сортов тритикале для расширения ассортимента кваса (Волкова и соавт., 2015) или вовсе для получения этилового спирта в ликеро-водочной промышленности (Калужина и соавт., 2024).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования являются образцы пива полученные посредством проведения шести экспериментальных варок пива с использованием зерна и солода из озимой тритикале сорта «Спика» (Таблица 1).

Таблица 1

Соотношение компонентов, в ходе экспериментальных варок

Table 1

Ratio of Components During Experimental Brews

Номер экспериментальной варки	Компоненты и их процентное соотношение в заторе, %		
	Ячменный солод	Зерно тритикале	Солод тритикале
1	90	10	–
2	85	15	–
3	80	20	–
4	90	–	10
5	85	–	15
6	80	–	20

Материалы и оборудование

Основываясь на ранее проведенном изучении показателей качества, выведенных научно-исследовательским институтом сортов и линий озимой тритикале (Зипаев и соавт., 2024), нами был выделен сорт «Спика», как наиболее подходящий к дальнейшему проведению экспериментов по определению параметров процесса солодоращения и, как следствие получению опытных образцов пива с различным содержанием соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале.

Для приготовления нового пивного напитка использовалось зерно озимой тритикале сорта «Спика», выведенного в лаборатории селекции серых хлебов Самарского НИИСХ — филиала СамНЦ РАН.

Сорт озимой тритикале «Спика» — гексаплоидный. К внешним особенностям можно отнести: средней длины колос (от 7,0 до 9,5 см) призматической формы, средней плотности (от 21 до 26 члеников на 10 см стержня); листья средней длины, зеленые,

без воскового налета; тип куста — полу прямо-стоячий; стебель характеризуется средней толщиной, он полый, прочный; высота не превышает 118 см. Данный сорт выделяется хорошей зимостойкостью, высокой устойчивостью к засухе, лёгкостью обмолачивания, а также отсутствием осыпания. Обладает высокой плотностью продуктивного стеблестоя 472 ст./м². Коэффициент хозяйственной полезности колоса тритикале сорта Спика составляет от 70 до 89%, а масса 1000 зерен колеблется от 31,7 до 48,7 г. (Шевченко и соавт., 2022)¹.

В процессе изучения основных параметров технологического процесса солодоращения озимой тритикале была задействована лабораторная установка по методике МЕВАК (Pribićetal., 2024). Благодаря климатической камере, в последствии, был получен солод, используемый в дальнейшем при проведении экспериментальных варок пива (Макушин, 2015).

В свою очередь, в качестве базового нами использовался светлый пивоваренный ячменный солод, произведенный на территории РФ, а также гранулированный хмель *Magnum*, который относится к горьким видам, придающим сортам пива выраженную горечь, с легкими цветочно-фруктовыми тонами. Используемый нами хмель *Magnum* содержит 12–13% α-горьких кислот и 5–7% β-горьких кислот, содержание хмелевого масла от 1,6 до 2,6 мл/100 г., влажность его не более 7,5%, а размер гранул от 0,5 до 1,5 мм с Ø до 0,6 см. Для приготовления пива использовались дрожжи низового брожения *SafLagerS-23*, которые достаточно быстро выпадают в осадок и по способности флокулировать относятся ко второму классу. Вода, используемая для приготовления пива, соответствовала тре-

бованиям нормативно-технической документации (СанПин 1.2.3685)².

Методы и процедура

Все экспериментальные варки пива осуществляли на пивоваренном модуле. В процессе разработки схемы опытных варок пива с применением солода и зерна озимой тритикале сорта «Спика», нами был определен диапазон доли внесения нового соложенного и несоложенного сырья в общую массу используемых зернопродуктов при затирании с целью определения в последующей рецептуре нового сорта пива. Полученные в последствии опытные образцы пива были проанализированы по органолептическим (прозрачность, цвет, аромат, вкус, пенообразование, пеностойкость) в соответствии с ГОСТ 30060–22³ и физико-химическим показателям (объемная доля этилового спирта, экстрактивность начального сула, цветность пива, содержание изогумулон, содержание диацетила, массовая доля белка по Кьельдалю) в соответствии с ГОСТ 12787–2021⁴, ГОСТ 12788–87⁵, 12789–2022⁶ и ГОСТ 34789–2021⁷.

Анализ данных

Данные, полученные в результате проведенных исследований в трехкратной повторности, подвергались статистической обработке (методом определения погрешности прямых измерений) экспериментальных данных с помощью лицензионного программного обеспечения Microsoft Excel 2013.

¹ Каталог сортов Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова / С.Н. Шевченко, А.А. Вьюшков А.В. Милехин и др.; Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова — филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук. — Самара: Самарский научный центр РАН, 2022. — 64 с.

² СанПин 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». — М.: Издательство стандартов. 2021. — 986 с.

³ ГОСТ 30060–2022 (2022) Пивоваренная продукция. Методы определения органолептических показателей. М.: Российский институт стандартизации

⁴ ГОСТ 12787–2021 (2021) Продукция пивоваренная. Методы определения объемной доли этилового спирта, массовой доли действующего экстракта и расчет экстрактивности начального сула. М.: Российский институт стандартизации

⁵ ГОСТ 12788–87 (2011) Пиво. Методы определения кислотности. М.: Стандартиформ

⁶ ГОСТ 12789–2022 (2022) Пивоваренная продукция. Методы определения цвета. М.: Российский институт стандартизации

⁷ ГОСТ 34789–2021 (2021) Продукция пивоваренная. Идентификация. Определение массовой концентрации общего азота методом Кьельдаля. М.: Российский институт стандартизации

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование органолептических свойств напитка

Результаты исследований органолептических свойств пива с 10%-ной добавкой сырья озимой тритикале

Полученные в ходе экспериментальных варок образцы пива были изучены по органолептическим показателям качества. На Рисунке 1 представлена профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 10% солода и зерна тритикале.

Как следует из данных представленных на Рисунке 1 исследуемый образец тритикалевого пива имеет горечь, которая уступает только образцу с 15%-ным содержанием соложенного сырья (Рисунок 2). В свою очередь, у образца с содержанием несоложенного сырья наблюдается минимальная насыщенность диоксида углерода по сравнению со всеми остальными исследуемыми образцами пива. Тем не менее, образец с содержанием солода

из тритикале имеет самую большую опалесценцию, которая сохраняется и у образца пива с содержанием 15%-ной добавки солода. Аромат и прозрачность пива у образцов с содержанием 10%-ной добавки зерна и солода из озимой тритикале имеет в целом среднее значение среди исследуемых образцов пива.

Результаты исследований органолептических свойств пива с 15%-ной добавкой сырья озимой тритикале

На Рисунке 2 представлена профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 15% солода и зерна тритикале.

Из Рисунка 2 следует, что образец пива с содержанием солода 15% показал самые высокие органолептические свойства по четырем показателям: горечь, цвет, аромат и прозрачность. Насыщенность CO₂ у образцов пива с содержанием 15% солода и зерна на одном уровне с образцом пива содержащем 20%-ную добавку солода.

Рисунок 1

Профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 10% солода и зерна тритикале

Figure 1

Profilogram of the Organoleptic Characteristics of Beer Containing 10% Malt and Triticale Grain

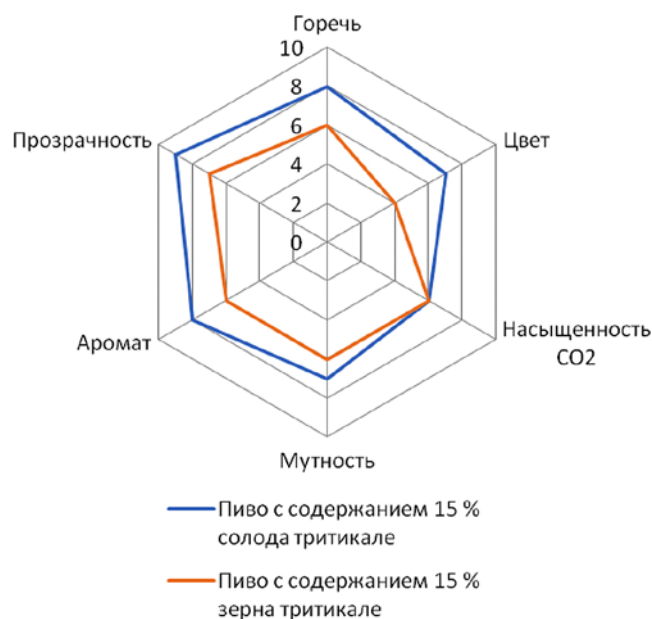


Рисунок 2

Профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 15% солода и зерна тритикале

Figure 2

Profilogram of the Organoleptic Characteristics of Beer Containing 15% Malt and Triticale Grain



Результаты исследований органолептических свойств пива с 20%-ной добавкой сырья озимой тритикале

На Рисунке 3 представлена профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 20% солода и зерна тритикале.

Как следует из представленных результатов (Рисунок 3) образцы с содержанием соложенного и несоложенного сырья тритикале в отличие от других образцов пива с одинаковым содержанием зернопродуктов имеют одинаковые значения по горечи и прозрачности. Тем не менее, такие показатели, как цвет, мутность и аромат у образцов с 20%-ным содержанием солода и зерна различен из-за особенностей исходного сырья при получении пива (солодоращение и содержание клейковины в зерне тритикале). Наблюдаются более яркие органолептические свойства у образца, содержащего 20%-ную добавку солода.

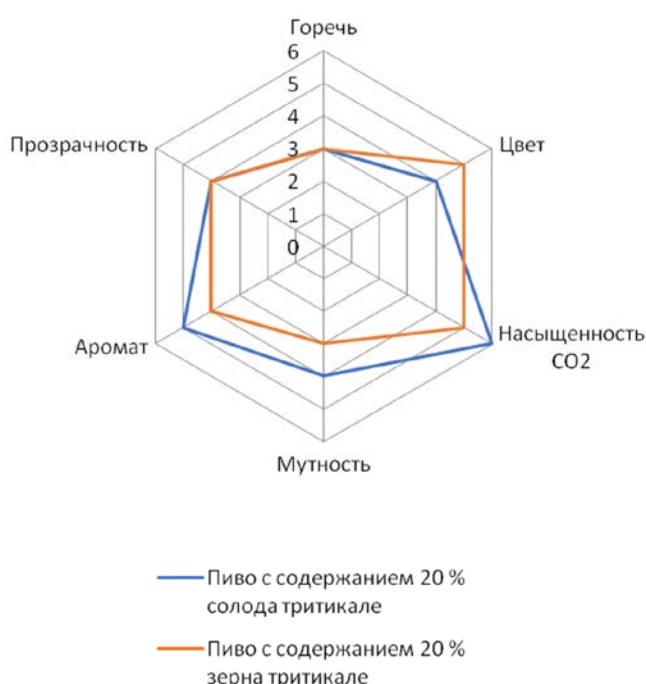
Анализ профилограмм позволяет отследить тенденцию, при которой органолептические показате

Рисунок 3

Профилограмма оценки органолептических показателей пива, содержащего 20% солода и зерна тритикале

Figure 3

Profilogram of the Organoleptic Characteristics of Beer Containing 20% Malt and Triticale Grain



тели пива с использованием солода тритикале превосходят значения своих аналогов, использующих вместо солода зерно тритикале. Среди всех образцов пива наилучшими значениями органолептических показателей обладал образец, содержащий 15% солода тритикале.

Горечь, прозрачность, аромат и цвет напитка с использованием 15% солода тритикале, были выше на 2 ед., по сравнению с образцом, содержащим 15% несоложенного зерна озимой тритикале. По показателю мутности пива, значение у образца с содержанием 15% тритикалевого солода, был значительно выше, чем с таким же содержанием несоложенного сырья в пиве. В свою очередь, доля диоксида углерода для двух образцов напитков была идентичной. Тем не менее, образец с содержанием 15% зерна и солода из тритикале, значительно уступал по насыщенности диоксидом углерода образцу, содержащему 20% зерна тритикале. Остальные органолептические показатели напитка с содержанием 20% добавки зерна и солода по сравнению с напитком, содержащим 15% солода из зерна тритикале были значительно ниже (горечь, прозрачность, мутность) или одинаковыми (аромат напитка) по сравнению с напитком, содержащим 15% солода из зерна тритикале.

Исследование физико-химических свойств напитка

Исследование физико-химических свойств полученных образцов пива осуществлялось по восьми показателям: экстрактивность начального сусла, содержание алкоголя, кислотность, цветность, содержание изогумулон, содержание диацетила, общее содержание белка, высота пены, пеностойкость. Результаты которых представлены в Таблице 2.

Как видно из Таблицы 2, с увеличением доли несоложенного тритикале в рецептуре пива, происходит снижение экстрактивности начального сусла. В результате образец с максимальным содержанием заменителя ячменного солода (20%), показал самое низкое значение экстрактивности начального сусла, аналогичное с заменой зерном тритикале — 11,5%. В зависимости от начальной экстрактивности сусла, зависит также концентрация этилового спирта в напитке. Это связано с увеличением сбраживаемых сахаров в сусле, имеющих важное значе

Таблица 2

Физико-химические показатели пива с использованием солода и зерна тритикале

Table 2

Physicochemical Parameters of Beer Using Malt and Triticale Grain

№ п/п	Показатели	Процентное соотношение сырья при затирании					
		10 % несо- ложенного тритикале	10 % солод из тритикале	15 % несо- ложенного тритикале	15 % солод из тритикале	20 % несо- ложенного тритикале	20 % солод из тритикале
1	Экстрактивность началь- ного сусла, %	11,6	11,7	11,95	12,1	11,5	11,55
2	Массовая доля этилового спирта, % об.	4,75	4,73	4,9	5	4,53	4,55
3	Кислотность, к. ед.	1,3	1,4	2,1	1,9	2,8	3,0
4	Цветность, ц.е.	0,8	1,1	0,7	1,7	0,65	2,4
5	Содержание изогумулон, мг/л	12,5	12,1	12,9	13,2	16,1	16,6
6	Содержание диацетила, мг/л (0,4–1)	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,08
7	Общий белок, % (63–76)	60,0	59,4	57,0	56,0	63,7	64,4
8	Высота пены (не менее 40 мм)	+	+	+	+	+	+
9	Пеностойкость, мин	4	4	4	4	4	5

ние для дрожжей, которые в процессе метаболизма образуют алкоголь. Подобная закономерность прослеживается в Таблице 2, где в образце пива с добавлением 20 % несоложеного тритикале, с наименьшей экстрактивностью начального сусла в 11,5 %, наблюдалась наименьшая объемная доля этилового спирта, составляющая 4,53 %, что на 0,47 % меньше, чем у образца с наибольшей объемной долей этилового спирта. Аналогичные значения получились для образца с содержанием 15 % соложеного тритикале. В данном образце, при наибольшем значении экстрактивности начального сусла, в 12,1 %, среди всех образцов, прослеживалась максимальная объемная доля этилового спирта в 5 %.

Цветность пивных напитков, с использованием несоложеного тритикале, закономерно снижается, в зависимости от доли зерна тритикале, вплоть до 0,65 ед. ц. А у напитков, с использованием солода тритикале, наоборот, возрастает, и достигает значений в 2,4 ед. ц. Это обусловлено изменением цветности сусла, с добавлением используемых заменителей ячменного солода. А вследствие изме-

нения цветности сусла закономерно изменяется цветность готового напитка.

Образование диацетила в пиве зависит в первую очередь от бродильной активности используемых дрожжей, чем выше данный показатель, тем быстрее дрожжи синтезируют данный компонент, и тем быстрее он трансформируется в бутандиол. Косвенно, на процесс образования диацетила, влияет скорость роста самих дрожжей, в свою очередь, данный показатель зависит от содержания аминокислот в сусле, которые являются для дрожжей питательными компонентами, используемыми, для развития и роста. Показатель общего содержания белка, включает в себя содержащиеся в сусле аминокислоты. Поэтому, следовательно, чем выше данный показатель, тем больше аминокислот содержится в сусле, а значит и питания для дрожжей будет больше, в результате чего, диацетила будет образовываться закономерно больше. В Таблице 2 представлена подобная зависимость, у напитка содержащего 20 % солода тритикале, наблюдалось наибольшее значение белка, в 64,4 %,

среди всех образцов, как и большее содержание диацетила, 0,08 мг/л.

Пеностойкость пива зависит от наличия поверхностно-активных веществ в продукте, к ним относят полипептиды и горькие вещества хмеля. Следовательно, по количеству белка и содержанию изогумулон в напитке можно судить о пеностойкости получаемого продукта (Таблица 2). Так, пиво с содержанием 20% солода тритикале, обладал наибольшей пеностойкостью, составляющей 5 мин, при наивысших значениях белка, в 64,4%, из всех анализируемых образцов напитка. Также, данный образец имел наибольшее значение содержания изогумулон, в 16,6 мг/л, что дополнительно подтверждает зависимость пеностойкости напитка от содержания полипептидов и горьких веществ хмеля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании были проанализированы органолептические и физико-химические характеристики шести экспериментальных образцов пива, полученных с использованием от 10 до 20% соложенного и несоложенного зерна нового сорта озимой тритикале «Спика».

Полученные результаты в целом коррелируют с данными, представленными в работах польских исследователей (Cioch-Skoneczny et al., 2019; Zdaniewicz et al., 2020), в которых особое внимание уделено варьированию технологических параметров производства пива (Zdaniewicz et al., 2020), а также исследованию различных соотношений компонентов пивного суслу (Cioch-Skoneczny et al., 2019). В частности, в работе Cioch-Skoneczny и соавт. (2019) описаны три варианта соотношений тритикалевого и ячменного солодов: 1:0, 1:1 и 0:1, что представляет интерес для сопоставления с нашими экспериментальными образцами.

Наибольшее сходство по составу с образцами, исследованными в данной работе, демонстрирует образец пива с 10% содержанием тритикалевого солода, описанный в публикации Zdaniewicz et al. (2020). При сравнительном анализе было установлено, что изученные нами образцы отличаются по ряду показателей: цветность — на 41,8%, кислотность — на 6%, массовая доля этилового спир-

та — на 26%. Причины таких расхождений могут быть связаны с различиями в химическом составе зерна озимой тритикале, особенностями технологических параметров процесса соложения и пивоварения, а также с использованием различных штаммов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

По содержанию диацетила наблюдается полное соответствие между нашими образцами и образцами, представленными в работах Cioch-Skoneczny et al. (2019) — 0,05 мг/л. Это указывает на корректность выбора температурных режимов на стадиях основного брожения и дображивания, обеспечивающих стабильные показатели по данному параметру.

При сравнении органолептических характеристик исследуемых напитков с образцами, полученными польскими исследователями (Cioch-Skoneczny et al., 2019; Zdaniewicz et al., 2020), установлено, что наши образцы уступают по показателю цветности. Это, по-видимому, обусловлено меньшей долей тритикалевого солода в рецептуре: в польских исследованиях его содержание варьировалось от 50 до 100%, тогда как в нашей работе не превышало 20%.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение доли соложенного или несоложенного зерна озимой тритикале в составе рецептуры до 15% при одновременном снижении содержания ячменного солода способствует улучшению как органолептических, так и физико-химических показателей пива. Эти результаты подтверждают потенциал использования озимой тритикале нового сорта в технологии пивоварения и создают основу для дальнейших исследований по оптимизации состава и технологических параметров производства напитка.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Во-первых, работа ограничена изучением одного сорта озимой тритикале («Спика»), что сужает возможность обобщения выводов на другие генотипы. Во-вторых, исследование проводилось в условиях лабораторного пивоварения, что может не в полной мере отражать особенности промышленного технологического процесса. Кроме того, дегустационная оценка

органолептических показателей базировалась на выборке ограниченного числа респондентов, не репрезентативной для широкой потребительской аудитории. Также не рассматривались микробиологические аспекты стабильности полученных напитков и влияние длительного хранения на их качество. В дальнейшем требуется расширение экспериментальной базы, включение дополнительных сортов тритикале, анализ влияния штаммов дрожжей, а также оценка потребительских предпочтений в более широком масштабе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования были охарактеризованы шесть экспериментальных образцов пива, отличающихся содержанием соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале. Оценка проводилась по шести органолептическим показателям (горечь, цвет, насыщенность диоксидом углерода, мутность, аромат, прозрачность) и девяти физико-химическим параметрам (экстрактивность начального сусла, массовая доля этилового спирта и белка, кислотность, цветность, содержание изогумулона и диацетила, пеноустойчивость, пенообразование).

Установлено, что добавление 15 % солода из озимой тритикале сорта «Спика» обеспечивает оптимальный баланс органолептических и физико-химических характеристик готового напитка. Полученные данные подтверждают возможность эффективного замещения импортного соложенного и несоложенного сырья отечественным аналогом без потери качества пива.

Результаты настоящего исследования представляют практическую ценность для производителей пивоваренной продукции, способствуя расширению ассортимента за счет внедрения инновационных рецептур с использованием зернового сырья отечественной селекции. Это открывает перспективы не только для российских предприятий, но и для производителей государств — участников ЕАЭС.

В дальнейшем предполагается сосредоточить внимание на оптимизации технологических параметров процесса получения пива с включением соложенного и несоложенного сырья озимой тритикале, включая масштабирование производства и оцен-

ку стабильности потребительских характеристик на разных этапах хранения.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Дмитрий Владимирович Зипаев: контроль, планирование и проведение исследования; создание черновика рукописи; редактирование рукописи.

Андрей Николаевич Макушин: проверка воспроизводимости результатов исследования; создание и подготовка рукописи.

Татьяна Александровна Горянина: создание и подготовка рукописи; визуализация полученных данных.

Александр Николаевич Кожухов: проверка воспроизводимости результатов исследования; создание и подготовка рукописи.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Dmitry V. Zipaev: supervision; writing — review & editing.

Andrey N. Makushin: verification, writing — review & editing.

Tatyana A. Goryanina: visualization, writing — review & editing.

Alexander N. Kozhukhov: verification, writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Баланов, П.Е., Смотраева, И.В., Иванченко, О.Б., & Хабибуллин, Р.Э. (2017). Исследование вторичных материальных ресурсов при производстве солода из тритикале. *Вестник Технологического университета*, 20(14), 116–119.
- Balanov, P.E., Smotraeva, I.V., Ivanchenko, O.B., & Xabibullin, R.E. (2017). Issledovanie vtorichny`x material`ny`x resursov pri proizvodstve soloda iz tritikale. *Herald of Technological University*, 20(14), 116–119. (In Russ.)
- Волкова, Т.Н., Селина, И.В., Созинова, М.С., & Осипов, В.В. (2015). Микобиота зерна озимой тритикале как пивоваренного сырья. *Пиво и напитки*, (6), 26–31.
- Volkova, T.N., Selina, I.V., Sozinova, M.S., & Osipov, V.V. (2015). Mycobiota of winter triticale grain as brewing raw material. *Beer and Beverages*, (6), 26–31. (In Russ.)
- Гольварг, Б.А., Гриценко, В.Г., Бораева, Л.Н., & Ковтушенко, В.Я. (2010). Озимая тритикале — ценная кормовая культура. Тритикале: материалы международной научно-практической конференции (с. 284–287). Ростов-на-Дону: Издательство «Юг».
- Goldvarg, B.A., Gritsienko, V.G., Boraeva, L.N., & Kovtunencko, V.Ya. (2010) Winter — annual triticale is valuable green crop *Triticale: Proceedings of international scientific-practical conference* (pp. 284–287). Rostov-on-Don: Publishing House South. (In Russ.)
- Горянина, Т.А. (2022). Новые сорта озимой тритикале селекции Самарского НИИСХ. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Сельскохозяйственные науки*, 1(3), 26–32. <https://doi.org/10.37313/2782-6562-2022-1-3-26-32>
- Goryanina, T.A. New varieties of winter triticale selection of the Samara Research Institute. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Agricultural Sciences*, 1(3), 26–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.37313/2782-6562-2022-1-3-26-32>
- Зипаев, Д.В., Макушин, А.Н., Горянина, Т.А., & Кожухов, А.Н. (2024). Изучение показателей качества зерна и солода из озимой тритикале для использования в пивоваренной отрасли на территории Приволжского федерального округа. *Актуальные вопросы аграрной науки. Труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции* (с. 304–308.). Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ.
- Zipaev, D.V., Makushin, A.N., Goryanina, T.A., & Kozhukhov, A.N. (2024). Study of grain and malt quality indicators from winter triticale for use in the brewing industry in the territory of the Volga Federal District. *Aktual`ny`e voprosy` agrarnoy nauki. Trudy` Vserossiyskoj (nacional`noj) nauchno-prakticheskoy konferencii* (pp. 304–308). Nal`chik: FGBOU VO Kabardino-Balkarskiy GAU. (In Russ.)
- Зипаев, Д.В., & Никитченко, Н.В. (2017). Изучение качества и показателей безопасности пивного напитка с тритикале хроматографическим методом. *Пиво и напитки*, (2), 28–32.
- Zipaev, D.V., & Nikitchenko, N.V. (2017). Study of quality and safety of beer whith triticale by chromatographic metod. *Beer and Beverages*, (2), 28–32. (In Russ.)
- Калужина, О.Ю., Леонова, С.А., Кузнецова, Е.А., & Латыпова, Р.Р. (2024). Разработка способа получения нового штамма дрожжей для спиртового производства. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(2), 51–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.543>
- Kaluzhina, O.Yu., Leonova, S.A., Kuznetsova, E.A., & Latypova, R.R. (2024). Development of a method for obtaining a new yeast strain for the alcohol industry. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(2), 51–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.543>
- Кобелев, К.В., Бойков, А.В., Грибкова, И.Н., Селина, И.В., & Созинова, М.С. (2014). Производство солода из тритикале для напитков брожения. *Пиво и напитки*, (5), 36–39.
- Kobelev, K.V., Boikov, A.V., Gribkova, I.N., Selina, I.V., & Sozinova, M.S. (2014). Triticale malt production for beverages. *Beer and Beverages*, (5), 36–39. (In Russ.)
- Кобелев, К.В., Гернет, М.В., & Хурушудян, С.А. (2016). Тритикале — перспективная зерновая культура для натуральных напитков брожения. *Пиво и напитки*, (3), 26–29.
- Kobelev, K.V., Gernet, M.V., & Hurushudjan, S.A. (2016). Triticale — A promising crops for natural fermented beverages. *Beer and Beverages*, (3), 26–29. (In Russ.)

- Кобелев, К.В., Грибкова, И.Н., Бойков, А.В., Селина, И.В., Созинова, М.С., & Лаптева, Н.К. (2013). Мониторинг качества ржи и тритикале. *Пиво и напитки*, (1), 40–43.
- Kobelev, K.V., Gribkova, I.N., Boikov, A.V., Selina, I.V., Sozinova, M.S., & Lapteva, N.K. (2013). Monitoring of quality of a rye and triticum, which were grown. *Beer and Beverages*, (1), 40–43. (In Russ.)
- Макушин, А.Н. (2015). Технология производства просяного солода. *Вклад молодых ученых в аграрную науку. Труды Международной научно-практической конференции* (с. 470–474). Кинель: ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.
- Makushin, A.N. (2015). Technologiya proizvodstva prosyanogo soloda. *Vklad molody`x ucheny`x v agrarnuyu nauku. Trudy` Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* (с. 470–474). Kinel`: FGBOU VO Samarskaya GSXA. (In Russ.)
- Моргунова, Е.М., Кулаковская, В.И., & Симоненко, С.В. (2022). Натуральные напитки брожения на зерновом сырье: инновации, технологии, решения. *Пищевая промышленность*, (11), 80–84. <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.018>
- Morhunova, E.M., Kulakovskaya, V.I., & Simonenko, S.V. (2022). Natural fermentatoin beverages on grain raw materials: Innovations, technologies, solutions. *Food Industry*, (11), 80–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2022.11.11.018>
- Оверченко, М.Б., Игнатова, Н.И., Сербя, Е.М., Шелехова, Н.В., Веселовская, О.В., Абрамова, И.М., & Римарева, Л.В. (2014). Исследование различных сортов тритикале для использования их в спиртовом производстве. *Пиво и напитки*, (6), 14–18.
- Overchenko, M.B., Ignatova, N.I., Serba, E.M., Shelehova, N.V., Veselovskaya, O.V., Abramova, I.M., & Rimareva, L.V. (2014). Study triticale different varieties for use in alcohol production. *Beer and Beverages*, (6), 14–18. (In Russ.)
- Потапова, Г.Н., & Жакубеков, К.К. (2009). Озимые рожь и тритикале — важная часть зеленого конвейера. *Земледелие*, (6), 24–25.
- Potapova, G.N., & Zhakubekov, K.K. Winter rye and triticale are the important part of the green production line. *Zemledelie*, (6), 24–25. (In Russ.)
- Тян, А., & Баязитова, М.М. (2021). Подбор режима затирания при приготовлении пивного сусла с использованием пшеничного солода. *Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии*, (3), 94–98. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.57>
- Tyan, A., & Bayazitova, M.M. (2021). Selection of the mashing mode in the preparation of beer wort using wheat malt. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series Chemistry and Technology*, (3), 94–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.57>
- Шпилев, Н.С., Лебедько, Л.В., Шепелев, С.И., Ториков, В.Е., & Мельникова, О.В. (2023). Тритикале — важная кормовая культура. *Вестник Брянской ГСХА*, 4(98), 19–24. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2023-98-4-19-24>
- Shpilyov N.S., Lebed`ko L.V., Shepelev S.I., Torikov V.E., & Mel`nikova, O.V. (2023). Triticale is an important forage crop. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*, 4(98), 19–24 (In Russ.). <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2023-98-4-19-24>
- Ambriz-Vidal, T.N., Mariezcurrena-Berasain, M.D., Heredia-Olea, E., Pinzon Martinez, D.L., & Gutierrez-Ibañez, A.T. (2019). Potential of triticale (X Triticosecale Wittmack) malts for beer wort production. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(4), 282–286. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1670030>
- Bogdan, P., & Kordialik-Bogacka, E. (2017). Alternatives to malt in brewing. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.001>
- Cadenas, R., Caballero, I., Nimubona, D., & Blanco, C.A. (2021). Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer. *Foods*, 10(8), 1726. <https://doi.org/10.3390/foods10081726>
- Cioch-Skoneczny, M., Zdaniewicz, M., Pater A., & Skoneczny, S. (2019). Impact of triticale malt application on physiochemical composition and profile of volatile compounds in beer. *European Food Research and Technology* 245(7), 1431–1437. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03284-2>

- Gill, K.S., & Omokanye, A.T. (2016). Spring triticale varieties forage yield, nutrients composition and suitability for beef cattle production. *Journal of Agricultural Science*, 8(10), 1–14. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n10p1>
- Giunta, F., Motzo, R., Viridis, A., & Cabiglieria, A. (2017). The effects of forage removal on biomass and grain yield of intermediate and spring triticales. *Field Crops Research*, 200, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.002>
- Glatthar, J., Heinisch, J., & Senn, T. (2002). A study on the suitability of unmalted triticale as a brewing adjunct. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 60(4), 181–187. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-60-0181>
- Glatthar, J., Heinisch, J.J., & Senn, T. (2003). The Use of Unmalted Triticale in Brewing and its Effect on Wort and Beer Quality. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 61(4), 182–190. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-61-0182>
- Glatthar, J., Heinisch, J.J., & Senn, T. (2005). Unmalted triticale cultivars as brewing adjuncts: effects of enzyme activities and composition on beer wort quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(4), 647–654. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1941>
- Goode, D.L., & Arendt, E.K. (2006). Developments in the supply of adjunct materials for brewing. In *Brewing* (pp. 30–67). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691738.30>
- Grujić, O.S., Pejin, J.D., & Denčić, S.S. (2010). The application of triticale variety Odyssey as the substitute for malt in wort production. *Acta Periodica Technologica*, (41), 7–17. <https://doi.org/10.2298/APT1041007G>
- Grujić, O.S., & Pejin, J.D. (2007). The application of triticale malt as the substitute for barley malt in wort production. *Acta Periodica Technologica*, (38), 117–126. <https://doi.org/10.2298/APT0738117G>
- Habtam, A.T., Kumssa, T.T., Butler, T.J., & Ma, X.-F. (2018). Triticale improvement for forage and cover crop uses in the southern great plains of the United States. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1130. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01130>
- Lithourgidis, A.S., Vasilakoglou, I.B., Dhima, K.V., Dordas, C.A., & Yiakoulaki, M.D. (2006). Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 99, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.03.008>
- Pribić, M., Kamenko, I., Despotović, S., Miroslavljević, M., & Pejin, J. (2024). Modeling and optimization of triticale wort production using an artificial neural network and a genetic algorithm. *Foods*, 13(2), 343. <https://doi.org/10.3390/foods13020343>
- Rosa, R.S., & Lannes, S.C. (2022). Impact of the use of unmalted adjuncts on the rheological properties of beer wort. *Food Science and Technology*, 42, e101021. <https://doi.org/10.1590/fst.101021>
- Zdaniewicz, M., Pater, A., Hrabia, O., Duliński, R., & Cioch-Skoneczny, M. (2020). Tritordeum malt: An innovative raw material for beer production. *Journal of Cereal Science*, 96, 103095. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103095>
- Zutter, A.D., Landschoot, S., Vermeir, P., Waes, C.V., Muylle, H., Roldán-Ruiz, I., Doudah, L., Boever, J.D., & Haesaert, G. Variation in potential feeding value of triticale forage among plant fraction, maturity stage, growing season and genotype. *Heliyon*, 9(1), e12760. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12760>

¹ Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва, Российская Федерация

² Институт физической химии и электрохимии им. А.Н.Фrumкина Российской академии наук г. Москва, Российская Федерация

³ Северный филиал Государственного научного центра Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Архангельск, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Татьяна Анатольевна Игнатова

E-mail: ignatova@vniro.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Игнатова, Т.А., Байгильдиев, Т.М., Березина, М.О., Баскакова, Ю.А., Плакун, Л.К. (2025). Оценка возможности использования сверхкритической углекислотной экстракции при комплексной переработке морских водорослей. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 95-115. <https://doi.org/10.36107/spfrp.2025.1.630>

ПОСТУПИЛА: 14.12.2024

ДОРАБОТАНА: 10.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

ГХ-МС анализ CO₂-экстрактов из водорослей выполнен при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственной темы № 124041900012-4.



Оценка возможности использования сверхкритической углекислотной экстракции при комплексной переработке морских водорослей

Т. А. Игнатова¹, Т. М. Байгильдиев², М. О. Березина³,
Ю. А. Баскакова¹, Л. К. Плакун¹

АННОТАЦИЯ

Введение: Водоросли представляют собой ценный источник разнообразных биологически активных веществ (БАВ), которые широко применяются в медицине, пищевой промышленности, косметологии и других областях, благодаря своим антиоксидантным, противовоспалительным и иммуномодулирующим свойствам. Несмотря на значительный потенциал водорослей в настоящее время отсутствуют комплексные технологические решения, обеспечивающие максимальное извлечение БАВ из данного вида сырья с использованием углекислотной экстракции, а также не имеется информации о химическом составе и биологической активности водорослевых CO₂-экстрактов. Разработка новых подходов, включающих оптимизацию процессов извлечения БАВ, станет ключевым фактором для повышения эффективности использования водорослей и расширения областей их применения.

Цель: Провести оценку возможности последовательного использования CO₂- и водной экстракций с целью получения при комплексной переработке водорослей-макрофитов полисахаридов, которые используются в пищевой промышленности в качестве загустителей и гелеобразователей, а также CO₂-экстрактов содержащие в своем составе вещества обладающие биологической активностью.

Материалы и методы: Для получения экстрактов использовали бурые и красные водоросли видов *Ascophyllum nodosum*, *Fucus distichus*, *F. vesiculosus*, *Ahnfeltia plicata*, *A. tobuchiensis*, *Vertebrata fucoides*. Получение CO₂-экстрактов водорослей осуществляли на установке КОЭРС1. Сравнение состава, антимикробных и антиоксидантных свойств CO₂-экстрактов проводили в сравнение со спиртовыми и эфирными экстрактами водорослей. Анализ состава экстрактов водорослей осуществляли с использованием современного аналитического оборудования (газового хромато-масс-спектрометра Shimadzu GCMS-TQ 8040, газового хроматографа Agilent 8890GC System Custom, спектрофотометра Cary 3500 Compact UV-Vis) с использованием общепринятых методик. Антимикробные свойства водорослевых экстрактов тестировали в отношении *Salmonella abony*, *Candida albicans*, *Proteus vulgaris*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* с использованием диско-диффузионного метода. Оценка антиоксидантной активности проводили в соответствии с патентом РФ № 2170930. Выделение полисахаридов из водорослей и шрота, образующегося после CO₂-экстракции, проводили путем их водного экстрагирования при температурах 98 и 120°C в нейтральной и щелочной среде.

Результаты: На состав полученных CO₂-экстрактов водорослей оказывает большее влияние условия экстракции, нежели чем вид используемой водоросли. По качественному составу CO₂-экстракты бурых и красных водорослей-макрофитов отличаются в основном только по двум компонентам гамма-ситостерол и стигмаста-5,24(28)-диен-3-ол, (3.бета.,24Z). Водорастворимые полисахариды, полученные из водорослевого шрота, по своим физико-химическим характеристикам практически не отличались от тех, что были выделены непосредственно из водорослей.

Выводы: Доказана возможность последовательного использования CO₂- и водной экстракций для извлечения БАВ и полисахаридов при комплексной переработке водорослей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Экстракты водорослей; антимикробная активность экстракта; антиоксидантные свойства экстракта; жирнокислотный состав липидов водорослей; ГХ-МС-анализ экстрактов водорослей; свойства водорастворимых полисахаридов водорослей

¹ State Science Center of the Russian Federation Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography «VNIRO», Moscow, Russian Federation

² Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ State Science Center of the Russian Federation North branch of the Federal State Budget Scientific Institution "Russian Research Institute of Fisheries and oceanography" (North branch of «VNIRO» («Severnny»), Arkhangelsk, Russian Federation

Possibility Evaluation of Using Supercritical Carbon Dioxide Extraction in Complex Processing of Algae

Tatiana A. Ignatova¹, Timur M. Baygildiev², Marina O. Berezina³, Yulia A. Baskakova¹, Larisa K. Plakun¹

CORRESPONDENCE:

Tatiana A. Ignatova

E-mail: ignatova@vniro.ru

FOR CITATIONS:

Ignatova, T.A., Baygildiev, T.M., Berezina, M.O., Baskakova, Yu.A., & Plakun, L.K. (2025). Possibility evaluation of using supercritical carbon dioxide extraction in complex processing of algae. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 95-115. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.630>

RECEIVED: 14.12.2024

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The GC-MS analysis of CO₂ extracts from algae was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124041900012-4).



ABSTRACT

Introduction: Algae are a valuable source of various biologically active substances (BAS), which are widely used in medicine, food industry, cosmetology and other areas due to their antioxidant, anti-inflammatory and immunomodulatory properties. Despite the significant potential of algae, there are currently no comprehensive technological solutions that ensure maximum extraction of BAS from this type of raw material using carbon dioxide extraction, and there is no information on the chemical composition and biological activity of algal CO₂ extracts. The development of new approaches, including optimization of BAS extraction processes, will be a key factor in increasing the efficiency of algae use and expanding the areas of their application.

Purpose: To evaluate the possibility of sequential use of CO₂ and water extractions for the purpose of obtaining polysaccharides during the complex processing of macrophyte algae, which are used in the food industry as thickeners and gelling agents, as well as CO₂ extracts containing substances with biological activity.

Materials and Methods: Brown and red algae of the following species were used to get the extracts: *Ascophyllum nodosum*, *Fucus distichus*, *F. vesiculosus*, *Ahnfeltia plicata*, *A. tobuchiensis*, *Vertebrata fucoides*. CO₂ extracts of algae were obtained using the KOERS1 unit. The composition, antimicrobial and antioxidant properties of the CO₂ extracts were compared with alcohol and ether extracts of algae. The composition of the algae extracts was analyzed using modern analytical equipment (Shimadzu GCMS-TQ 8040 gas chromatography mass spectrometry system, Agilent 8890GC System Custom gas chromatograph, Cary 3500 Compact UV-Vis spectrophotometer) using generally accepted techniques. The antimicrobial properties of algae extracts were tested against *Salmonella abony*, *Candida albicans*, *Proteus vulgaris*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* using the disk diffusion method. The antioxidant activity was assessed in accordance with Russian Patent No. 2170930. Polysaccharides were isolated from algae and meal formed after CO₂ extraction by their aqueous extraction at temperatures of 98 and 120°C in a neutral and alkaline environment.

Results: It was found that the composition of the obtained CO₂ extracts of algae is more influenced by the extraction conditions than by the type of algae used. In terms of qualitative composition, CO₂ extracts of brown and red macrophyte algae differ mainly in two components: gamma-sitosterol and stigmasta-5,24(28)-dien-3-ol, (3.beta.,24Z). Water-soluble polysaccharides isolated from algal meal were practically no different in their physicochemical characteristics from those isolated from algae.

Conclusion: The possibility of sequential use of CO₂ and water extraction for the extraction of BAS and polysaccharides in the complex processing of algae was proved.

KEYWORDS

Algae extracts; antimicrobial activity of the extract; antioxidant properties of the extract; fatty acid composition of algae lipids; GC-MS analysis of algae extracts; properties of water-soluble polysaccharides of algae

ВВЕДЕНИЕ

Запасы водорослей в Российской Федерации

В морях Российской Федерации к промысловым водорослям относятся: виды рода *Saccharina* (*S. latissima*, *S. japonica*, *S. angustata*, *S. gurjanovae*, *S. bongardiana*), виды рода *Laminaria* (*L. digitata*, *L. hyperborea*, *L. dentigera*, *L. yezoensis*, *L. longipes*), виды рода *Fucus* (*F. vesiculosus*, *F. distichus*, *F. serratus*), *Ascophyllum nodosum*, виды рода *Cystoseira* (*Gongolaria barbata* (= *Cystoseira barbata*), *Ericaria crinita* (= *C. crinita*), *Ericaria bosphorica* (= *C. bosphorica*), и виды рода *Ahnfeltia* (*A. fastigiata* var. *tobuchiensis* (= *Ahnfeltia tobuchiensis*)), *A. plicata*). Общий запас промысловых водорослей в морях России ориентировочно оценивается в 1,3 млн. т сырой массы (Евсеева и соавт., 2024). В Белом море осуществляется добыча промысловых видов бурых водорослей — фукоидов и ламинариевых. Ежегодно заготавливают от 0,9 до 1,2 тыс. т сырой массы, в среднем — 1,0 тыс. т ламинариевых водорослей, что составляет 3% от рекомендованного вылова, фукоидов — от 0,5 до 1,1 тыс. т сырой массы (в среднем 0,8 тыс. т, или 5% от рекомендованного вылова) (Березина, 2024). В этом бассейне также разрешен сбор штормовых выбросов красной водоросли *Ahnfeltia plicata*. Освоение *Ahnfeltia tobuchiensis*, произрастающей в Дальневосточном регионе, не происходит, при этом величина общей биомассы анфельции составляет 119,3 тыс. т. (Евсеева и соавт., 2024).

Биологически активные вещества водорослей

Водоросли являются ценным источником биологически активных веществ (БАВ), включающих полисахариды, минералы, белки, аминокислоты, каротиноиды, полифенолы, липиды и витамины (Подкорытова & Игнатова, 2022). Липиды морских макрофитов содержат в своем составе моно-, ди- и триглицериды, фосфолипиды, каротиноиды, жирорастворимые витамины и стеринны (Holdt & Kraan, 2011; Schuhmann et al., 2012; Li et al., 2014). Длина цепи и степень ненасыщенности жирных кислот у морских водорослей выше, чем у растений (Kumari et al., 2013). Следует отметить, что липиды водорослей-макрофитов не имеют специфического рыбного привкуса, в отличие от жира, получаемого из рыбного сырья (Хотимченко, 2004). Эти компоненты об-

ладают ценными пищевыми, фармакологическими и косметическими свойствами, такими как антиоксидантная, антимикробная и противовоспалительная активности (Balk et al., 2004; Schacky, 2008; Jung et al., 2014; Thomsen et al., 2020).

Промышленная переработка водорослей, добываемых в Российских морях, в основном направлена на получение пищевой и косметической продукции, а также коммерческих полисахаридов пищевого назначения, таких как каррагинан, альгинат и агар (Pereira et al., 2012; Li et al., 2014; Machmudah et al., 2018, Подкорытова & Игнатова, 2022). Со временем возник интерес к получению масел пищевого, фармацевтического и косметического назначения из водорослей (Mendes, 2003; Wang, 2007; Ota et al., 2009; Mercer & Armenta, 2011). Отсутствие экономически эффективных и безопасных технологий выделения БАВ из водорослей сдерживает процесс расширения сфер применения таких высокоценных компонентов в различных отраслях деятельности человека.

Одним из наиболее перспективных подходов для извлечения биологически активных веществ является сверхкритическая CO₂-экстракция (Рубчевская, Ушаноова, Журавлева, 2005). Эта технология отличается безопасностью, селективностью, экологичностью и позволяет минимизировать термическую деградацию и окисление извлекаемых веществ (Li et al., 2014; Lorenzen, 2017; Georgiopoulou et al., 2022). Однако преимущественно CO₂-экстракция изучалась в контексте переработки микроводорослей с целью получения биотоплива и отдельных БАВ (Metzger & Largeau, 2004; Santana et al., 2012; Pour Hosseini et al., 2017). Исследования на микроводорослях ограничены отдельными зарубежными работами (Cheung et al., 1998; Terme et al., 2018; Cid et al., 2021), и практически отсутствуют работы, посвященные использованию CO₂-экстракции в сочетании с другими методами для комплексной переработки промысловых видов водорослей российских морей.

Настоящее исследование направлено на устранение существующего пробела, связанного с отсутствием комплексного подхода к использованию CO₂-экстракции совместно с водной экстракцией для переработки морских макроводорослей, добываемых в российских водах. Цель: оценка возможности последовательного применения сверхкрити-

ческой углекислотной (CO₂) и водной экстракций при комплексной переработке морских макроводорослей для получения биологически активных веществ и гидроколлоидов с последующим изучением их химического состава и биологической активности.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Преимущества сверхкритической CO₂-экстракции

Сверхкритическая CO₂-экстракция представляет собой инновационный и эффективный подход к извлечению биологически активных веществ из растительного сырья. CO₂ в сверхкритическом состоянии объединяет свойства газа и жидкости, благодаря чему он обладает низкой вязкостью, высокой диффузионной способностью и повышенной растворяющей силой. Это позволяет эффективно извлекать липиды, каротиноиды, стерины и другие неполярные вещества без их термического разрушения и окисления, в отличие от традиционных методов экстракции органическими растворителями (Li et al., 2014; Georgiopoulou et al., 2022).

Условия и модификаторы сверхкритической CO₂-экстракции

Эффективность и селективность сверхкритической CO₂-экстракции существенно зависят от выбранных условий процесса: давления и температуры. Установлено, что подбор оптимальных параметров позволяет значительно повысить выход необходимых групп биологически активных веществ. Кроме того, использование модификаторов, таких как этанол, метанол и гексан, расширяет спектр экстрагируемых веществ за счет увеличения полярности CO₂. В результате модификации процесса экстракции возможным становится эффективное извлечение фосфолипидов, гликолипидов, каротиноидов и фенольных соединений, которые обладают высокой биологической активностью и практической значимостью (Pour Hosseini et al., 2017; Prafulla et al., 2018; Obeid et al., 2018; Georgiopoulou, 2022).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования являлись морские виды бурых и красных водорослей, спиртовые, эфирные и CO₂-экстракты водорослей, водорослевый шрот, водорастворимые полисахариды водорослей.

Материалы

Для получения экстрактов использовали сушеные водоросли *Ascophyllum nodosum*, *Fucus distichus*, *F. vesiculosus*, *Ahnfeltia plicata*, собранные в прибрежной зоне Онежского залива Белого моря (у о. Большой Соловецкий и посёлка Рабочеостровск), а также *Ahnfeltia tobuchiensis*, заготовленную у острова Кунашир в заливе Измены (северо-западная часть Тихого океана). Данные образцы водорослей были заготовлены в августе 2019 г. Помимо основных промысловых видов были проанализированы образцы красной водоросли *Vertebrata fucoides*, собранной в прибрежной зоне Белого моря у посёлка Рабочеостровск в июле 2020 г. Данный вид водорослей содержит ряд веществ, обладающих антимикробными и антиоксидантными свойствами (Игнатова и соавт., 2023).

Методы, оборудование и процедура исследований

Для выявления различий в применении CO₂-экстракции и экстракции с использованием органических растворителей для извлечения БАВ из водорослей проводили сравнение состава, антимикробных и антиоксидантных свойств CO₂-, спиртовых и эфирных экстрактов, полученных из водоросли *V. fucoides*.

Для установления влияния использования CO₂-экстракции перед стадией водного экстрагирования на выход и реологические характеристики водорастворимых полисахаридов водорослей осуществляли выделение этих компонентов из исходных водорослей *A. plicata*, *A. tobuchiensis*, *V. fucoides* и их шрота, образуемого после проведения CO₂-экстракции и сравнении данных показателей.

Содержание воды, золы и общего азота в исследуемых образцах проводили согласно ГОСТ 33331¹. Содержание белка в образцах рассчитывали как произведение содержания общего азота на коэффициент 6,25.

Получение эфирного экстракта из *V. fucoides*

Навеску сушеной *V. fucoides* заливали диэтиловым эфиром при соотношении водоросль: эфир по объему 1:30. Экстракцию проводили при комнатной температуре в течение 7 дней. Затем экстракт сливали, а водорослевый остаток заливали новой партией эфира (соотношение водоросль:эфир 1:20 по объему). Вторую экстракцию проводили в течение 6 дней. После окончания экстракции обе фракции объединяли и фильтровали через бумажный фильтр. Полученный экстракт использовали для дальнейших исследований.

Получение спиртового экстракта № 1 из *V. fucoides*.

Навеску водорослей заливали 70% раствором этилового спирта при соотношении водоросль:спирт по объему 1:20. Процесс получения и дальнейшую очистку экстракта проводили аналогично, как при получении эфирного экстракта из *V. fucoides*.

Получение спиртового экстракта № 2 из *V. fucoides*

Навеску водорослей заливали 70% раствором этилового спирта при соотношении водоросль:спирт по объему 1:20. Экстрагирование проводили при температуре 70°C в течение 2 часов, после чего экстракт сливали и охлаждали. Охлажденный экстракт фильтровали через бумажный фильтр и использовали для анализа.

Получение CO₂-экстрактов из водорослей

Сушеные водоросли перед проведением экстракции измельчались до размера частиц от 2 до 5 мм, в зависимости от вида водоросли, а затем загружа-

лись в экстрактор. Экстрагирование компонентов из водорослей проводили сжиженным углекислым газом в течение 90 мин при температуре в экстракторе 50°C и давлении 300 атм (30 МПа) на установке КОЭРС1.

Определение антимикробной активности экстрактов

Спиртовой или эфирный экстракт водорослей полностью упаривали на роторном испарителе UL-1100 (КНДР). Сухой остаток экстракта растворяли в 6 мл экстрагента. Полученный концентрат экстракта наносили на стерильный бумажный диск диаметром 1 см и высушивали при комнатной температуре. В качестве контроля использовали диск, пропитанный экстрагентом и высушенный при комнатной температуре. Для выращивания микроорганизмов использовали «Питательный агар сухой для культивирования широкого спектра микроорганизмов». На поверхность питательной среды наносили бактериальную суспензию, а затем помещали подготовленный диск с экстрактом. Количество микробов в бактериальной суспензии ориентировочное соответствует по ОСО 10 МЕ. Инкубацию проводили при температуре 37°C в течение 24 ч. Тест-объектами являлись 8 штаммов микроорганизмов: *Salmonella abony* IHE 103/39, *Candida albicans* NCTC 885–653, *Proteus vulgaris* HX 19 (штамм 222), *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, *Staphylococcus aureus* «Виотко», *Listeria monocytogenes* 766, *Pseudomonas aeruginosa* 27/99, *Escherichia coli* ATCC 25922.

Определение антиоксидантной активности

Антиоксидантную активность определяли в соответствии с патентом РФ № 2170930².

Определение содержания хлорофилла в водорослевых экстрактах

Содержание хлорофилла определяли по методам, изложенным в Rodriguez-Amaya (2001)³ и Кудря-

¹ ГОСТ 33331–2015. (2016). Водоросли, травы морские и продукция из них. Методы определения массовой доли воды, золы и посторонних примесей. Стандартинформ.

² Максимова Т. В., Никулина, И. Н., Пахомов, В. П. Шкарина, Е. И., Чумакова, З. В., Арзамасцев, А.П. (2001). Способ определения антиокислительной активности (патент Российская Федерация № 2170930). Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ. https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002170930_20010720_C1_RU/

³ Rodriguez-Amaya, D. B. (2001). *A guide to carotenoid analysis in foods*. Basic Books

шов и др. (2011)⁴ на спектрофотометре Cary 3500 Compact UV-Vis (Малайзия).

Определение фракционного состава липидов водорослей

Фракционный состав липидов спиртового экстракта определяли после упаривания образца до полного удаления растворителя и разведением его в хлороформе до концентрации 10 мг/мл. CO₂-экстракты растворяли в гексане до концентрации 10 мг/мл. Подготовленный образец экстракта наносили на стеклянную пластину с кизельгелем и помещали ее в хроматографическую камеру с элюентом. В качестве элюента использовали смесь гексана, диэтилового эфира и уксусной кислоты концентрированной в соотношении 80:20:2. Пластины в камере оставляли на 30 мин. Затем для проявления пластину опускали в раствор, состоящий из фосфорномолибденовой кислоты в изопропиловом спирте (10 г на 200 мл спирта) подсушивали на воздухе и нагревали над плиткой. Проявленную пластину анализировали на денситометре CS-930 Shimadzu (Dual-wavelength tlc scanner) при длине волны 520 нм (Кейтс, 1975).

Определение жирнокислотного состава липидов

Спиртовые экстракты перед анализом на ЖКС упаривали на ротаторном испарителе до полного удаления растворителя. Для определения ЖКС липиды подвергались прямому метилированию с использованием в качестве катализатора хлористого ацетила в метаноле в соответствии с МУК,⁵ метиловые эфиры жирных кислот анализировали на хроматографе Agilent 8890GC System Custom (КНДР) в соответствии с ГОСТ 31663⁶ на капиллярной колонке MEGA-10 (100 м × 0,25 мм × 0,2 мкм). Температура ввода образца: 120 °С, режим ввода: с делением потока в отношении 1:50, газ-носитель: азот, скорость потока газа-носителя: 1 мл/мин, режим программирования температуры: нагрев с 120 до 180 °С со скоростью 3 °С/мин, время выдержки 15 мин, далее нагрев с 180 до 220 °С со скоростью 6 °С/мин

и выдержка 22 мин. Время выполнения анализа 63,667 мин.

ГХ-МС-анализ CO₂-экстрактов

Перед проведением анализа методом газовой хроматографии масс-спектрометрии (ГХ-МС) 50 мг образца CO₂-экстракта водоросли растворяли в 1 мл гексана. Далее экстракт пропускали через шприцевой мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Затем перед анализом полученный раствор разбавляли в 10 раз гексаном.

ГХ-МС анализ проводили при помощи газового хромато-масс-спектрометра Shimadzu GCMS-TQ 8040 (Япония). Для хроматографического разделения использовали капиллярную неполярную колонку Rtx-5MS (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм). Начальная температура колонки: 40 °С, температура ввода образца: 250 °С, режим ввода: с делением потока в отношении 1:5, газ-носитель: гелий, скорость потока газа-носителя: 1,21 мл/мин, режим программирования температуры: нагрев с 40 до 320 °С со скоростью 9 °С/мин, далее 9 мин температура удерживается на значении 320 °С, температура ионного источника: 200 °С, регистрация хроматограммы по полному ионному току проводилась в диапазоне от 40 до 500 m/z со скоростью сканирования: 0,3 сек/скан.

ГХ-МС-анализ спиртового экстракта № 2 *V. fucoides*

Спиртовой экстракт перед ГХ-МС анализом пропустили через шприцевой фильтр с диаметром пор 1 мкм.

ГХ-МС-анализ спиртового экстракта проводили на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-TQ 8040 (Япония). Для хроматографического разделения использовали капиллярную полярную колонку HP-INNOWAX (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм). Начальная температура колонки: 40 °С; температура ввода образца: 240 °С; режим ввода: с делением потока в отношении 1:3; газ-носитель: гелий; ско-

⁴ Кудряшов, А. П., Дитченко, Т. И., Молчан, О. В., Смолич, И. И., & Яковец, О. Г. (2011). *Физиология растений: лабораторный практикум для студентов биологического факультета*. Минск: БГУ.

⁵ Подкорытова, А. В., Кадникова, И. А. (2009) Качество, безопасность и методы анализа продуктов из гидробионтов. Руководство по современным методам исследований морских водорослей, трав и продуктов их переработки. Вып. 3., 108 с.

⁶ ГОСТ 31663–2012 (2019) Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот. М.: Стандартинформ.

рость потока газа-носителя: 0,9 мл/мин; градиентный режим хроматографирования: с 0 по 3 мин температура удерживается на значении 40 °С, далее нагрев 40 до 230 °С со скоростью 10 °С/мин, далее 20 мин температура удерживается на значении 230 °С; температура ионного источника: 250 °С; регистрация хроматограммы по полному ионному току проводилась в диапазоне от 40 до 600 m/z со скоростью сканирования: 0,3 сек/скан.

Методика выделения водорастворимого полисахарида из водоросли и шрота *V. fucoides* полученного после CO₂- и спиртовой экстракции

Шрот *V. fucoides* после спиртовой экстракции высушивали на воздухе при комнатной температуре в течение 24 часов, а затем измельчали и использовали для извлечения водорастворимого полисахарида.

Навеску водоросли или водорослевого шрота заливали водой (соотношение водоросль или шрот: вода 1:18) и настаивали при комнатной температуре в течение 1 часа. Затем воду сливали, а водоросли или шрот промывали проточной водой. Промытые водоросли или шрот заливали водой при соотношении водоросли или шрот:вода 1:11 и проводили экстракцию в течение 5 часов при температуре 98 °С. Полученный экстракт фильтровали через капроновое сито и охлаждали. Полученный экстракт (раствор водорастворимого полисахарида) использовали для измерения вязкости.

Методика получения природного агара из шрота *A. plicata* и *A. tobuchiensis*

Навеску водорослей или водорослевого шрота заливали водой в соотношении водоросли или шрот:вода 1:40 и настаивали при комнатной температуре. Спустя 17 часов воду сливали, водоросли или шрот промывали проточной водой и снова заливали водой в соотношении водоросли или шрот:вода 1:40. Экстракцию природного агара из водорослей или шрота *A. plicata* проводили в течение 5 часов при температуре 98 °С или 1 ч при температуре 120 °С. Из водорослей или шрота *A. tobuchiensis* выделение агара проводили при температуре 120 °С в течение 1 часа. Извлечение агара при температуре 120 °С осуществляли в автоклаве марки СПВА-75-I-НН. Вторую экстракцию осуществляли при аналогичных условиях. Каждую фракцию

агара (экстракт 1 и экстракт 2) фильтровали через капроновое сито, а затем охлаждали. Гель, образовавшийся после охлаждения экстракта, нарезали на куски и замораживали, при температуре минус 20 °С. Спустя сутки гель размораживали на капроновом сите. Образовавшийся коагель промывали водой, затем подвергали прессованию для удаления несвязанной воды и использовали для приготовления геля 1% р-ра агара.

Методика получения модифицированного агара из водорослей и шрота *A. plicata* и *A. tobuchiensis*

Навеску водорослей или водорослевого шрота заливали суспензией окиси кальция (содержание СаО в суспензии 2% к массе водорослей или шрота) в соотношении водоросли или шрот:суспензия 1:40 и настаивали при комнатной температуре в течение 17 часов. Затем суспензию сливали, а водоросли или шрот промывали проточной водой. Промытые водоросли или шрот помещали в емкость и заливали суспензией оксида кальция (содержание оксида кальция в суспензии 1% к массе водоросли или шрота) и проводили экстракцию в течение 5 часов при температуре 98 °С или 1 ч при температуре 120 °С для водорослей или шрота *A. plicata* и 1 ч при температуре 120 °С для водорослей и шрота *A. tobuchiensis*. Вторую экстракцию проводили при тех же параметрах, как и первую. Дальнейшую очистку и концентрирование агаровых экстрактов осуществляли как в методе при получении природного агара.

Определение выхода CO₂-экстрактов

Выход CO₂-экстракта выражали как количество экстракта в % полученное из 100 г сырья.

Определение выхода водорастворимого полисахарида *V. fucoides*

Выход водорастворимого полисахарида вычисляли как соотношение произведения массы экстракта на содержания в нем сухих веществ к массе водоросли.

Определение выхода агара

Выход агара вычисляли как соотношение произведения массы коагеля на содержания в нем сухих веществ к массе водоросли.

Определение прочности геля 1% раствора агара

Коагель агара заливали необходимым количеством дистиллированной воды. Затем полученную смесь нагревали до температуры 98 °С и выдерживали при данной температуре до полного растворения коагеля в воде. Горячий раствор агара разливали в стаканчики и охлаждали при комнатной температуре, а затем выдерживали его при данных условиях в течение 3 часов. Измерение прочности агара проводили на универсальной испытательной машине ST-1000 фирмы SALT (Южная Корея). Измерение проводили с использованием цилиндрической насадки диаметром 12,7 мм.

Определение вязкости раствора водорастворимого полисахарида *V. fucoides*

Измерение вязкости раствора полисахарида *V. fucoides* проводили на вискозиметре BROOKFIELD DV-II+Pro при использовании насадки S61 и скорости её вращения 60 об/мин и температуре 22 ± 1 °С.

Анализ данных

Идентификацию жирных кислот при анализе жирнокислотного состава липидов проводили путем сравнением полученных пиков с пиками стандартной смеси Supelco 37 component FAME MIX.

В ГХ-МС-анализе для расчёта индексов удерживания использовали смесь алканов C₇–C₄₀ в гексане (1000 мкг/мл, Sigma-Aldrich, США), а также отдельные стандарты алканов C₅, C₆, C₈ (ХромЛаб, Россия).

Идентификацию в ГХ-МС-анализе соединений проводили путем сравнения зарегистрированных масс-спектров электронной ионизации с масс-спектрами из базы данных NIST 23 (NIST, США). Соединения со спектральным сходством менее 75 исключались из анализа. Для уточнения идентификации кандидатов из списка с уровнем спектрального сходства более 75 использовалось программное обеспечение SVEKLA (Sholokhova et al., 2023). Идентификация считалась успешной, если различие между экспериментальным и предсказанным индексами удерживания не превышало 75 единиц. Кандидаты, у которых предсказанные индексы удерживания отличались от экспериментальных на более чем 75 единиц, также исключались из рассмотрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для комплексной переработки водорослевого сырья с целью получения полисахаридов и CO₂-экстрактов, содержащих в своем составе БАВ, был применен технологический подход, который заключался в последовательном применении двух видов экстракции. На первом этапе из водорослевого сырья извлекались БАВ с использованием сжиженного CO₂. В проведенных исследованиях представлены данные по выходу данного продукта из водорослей произрастающих в морях России. Изучение состава CO₂-экстрактов показало наличие в них важных для человека, с физиологической точки зрения, БАВ. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения CO₂-экстрактов для производства БАД и лекарственных препаратов. В результате анализа водорослевого шрота, образовавшегося после проведения углекислотной экстракции, показана целесообразность его использования для извлечения водорастворимых полисахаридов. Исследования подтвердили идентичность качественных показателей полисахаридов полученных из шрота и водорослевого сырья, что доказало возможность последовательного использования двух видов экстракции для комплексной переработки этого вида сырья.

Выход CO₂-экстрактов из водорослей

В результате проведенных исследований были получены шесть образцов CO₂-экстрактов из красных и бурых водорослей, выход которых варьировался от 2 до 3,8% к массе сушеных водорослей (Рисунок 1).

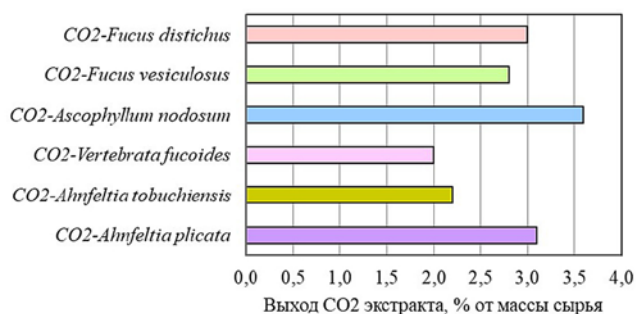
Таким образом, выход CO₂-экстрактов не превышает 4% от массы сырья. Не установлена взаимосвязь выхода CO₂-экстрактов с систематической принадлежностью водорослей. Содержание липидов в бурых и красных водорослях-макрофитах зависит от вида, места и времени их сбора и варьируется от 1 до 6% (Хотимченко, 2004, Наумов и соавт., 2015; Миронов и соавт., 2021). Таким образом, с помощью углекислотной экстракции из водорослей извлекается порядка 60% липидов.

Рисунок 1

Выход CO₂-экстрактов из водорослей

Figure 1

The Yield of the CO₂-Extracts from Algae



Состав экстрактов водорослей

Качественный состав исследуемых CO₂-экстрактов был проведен с использованием ГХ-МС-анализа. Хромато-масс-спектрометрические профили экстрактов показали, что анализируемые образцы были схожи между собой и содержали сведения, относящиеся к классам альдегидов, спиртов, кетонов, терпенов и терпеноидов, жирных кислот и их эфиров, углеводов, стеролов и витаминов, а также фенольных соединений. Всего было идентифицировано порядка 60 соединений (Рисунок 2).

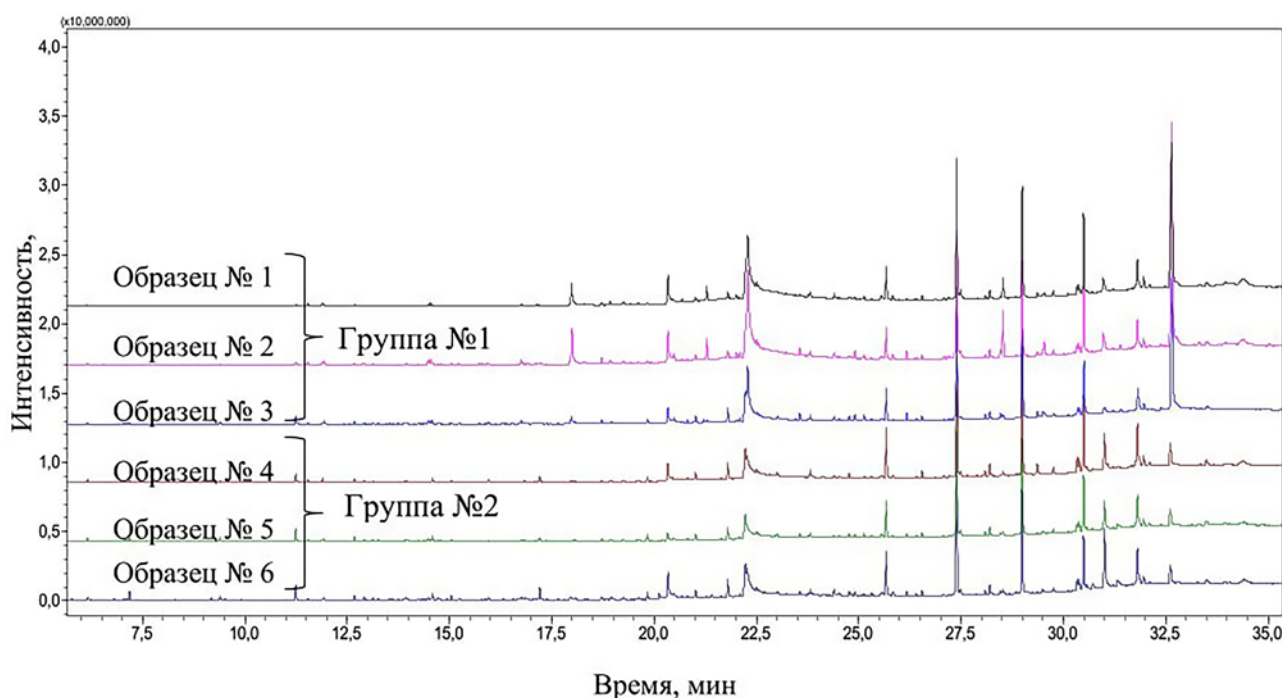
Детальный анализ профилей экстрактов, анализируемых образцов позволил разделить CO₂-экстракты на две группы по схожести: образцы 1, 2, 3 – группа №1 и образцы 4, 5, 6 – группа №2

Рисунок 2

ГХ-МС профили тестируемых CO₂-экстрактов водорослей в гексане

Figure 2

GC-MS Profiles of the Tested CO₂-Extracts of Algae in Hexane



№ образца	Наименование образца	№ образца	Наименование образца
1	CO ₂ <i>F. distichus</i>	4	CO ₂ <i>A. tobuchiensis</i>
2	CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>	5	CO ₂ <i>A. plicata</i>
3	CO ₂ <i>A. nodosum</i>	6	CO ₂ <i>V. fucoides</i>

(Рисунок 2). Основными драйверами, вызывающими различие группы №1 от группы №2 являются следующие идентифицированные соединения: миристиновая кислота, метил стеаридонат, олеиновая кислота, сквален, витамин Е, дельта-токоферол, бета-токоферол и стигмаста-5,24(28)-диен-3-ол, (3.бета.,24Z), которые содержались в значительно больших количествах в группе №1. Стигмаста-5,24(28)-диен-3-ол, (3.бета.,24Z) полностью отсутствовал в образцах из группы №2, однако данная группа содержала соединение гамма-ситостерол, которое обладало очень близким временем удерживания по сравнению с стигмаста-5,24(28)-диен-3-олом, (3.бета.,24Z) из группы №1 и не содержалось в образце данной группы. Таким образом, описанные выше соединения, вызывающие различие групп, предположительно могут быть использованы в качестве маркеров,

по которым возможно проводить идентификацию водорослей (до уровня отдела) и CO₂-экстрактов.

В Таблице 1 представлен паспорт ГХ-МС-хроматограммы CO₂-экстракта *F. vesiculosus* и спиртового экстракта № 2 из *V. fucoides*, в котором отражены основные преобладающие вещества, обнаруженные в данных образцах.

В спиртовом экстракте, также как и в CO₂-экстракте, присутствуют ряд жирных кислот пальмитиновая, пальмитолеиновая и миристиновая. Одновременно с этим идентифицировано противовоспалительное вещество диметилсульфоксид и неофитадиен, который оказывает анксиолитическое и противосудорожное действие (Таблица 1) (Capriotti, Capriotti, 2012; Gonzalez-Rivera et al., 2023).

Таблица 1

Паспорт ГХ-МС-хроматограммы CO₂-экстракта *F. vesiculosus* и спиртового экстракта № 2 из *V. fucoides*

Table 1

GC-MS Chromatogram Protocol for the CO₂-Extract of *F. vesiculosus* and Alcoholic Extract No. 2 from *V. fucoides*

Наименование образца экстракта					
CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>			Спиртовой экстракт № 2 из <i>V. fucoides</i>		
время удерживания, мин	площадь пика, %	название идентифицированного соединения	время удерживания, мин	площадь пика, %	название идентифицированного соединения
17,996	3,41	Миристиновая кислота	2,179	4,01	Диметилсульфид
20,339	3,12	Пальмитиновая кислота	12,302	3,17	Уксусная кислота
21,286	1,3	Метилстеаридонат	13,978	21,44	Диметилсульфоксид (ДМСО)
22,250	3,29	Линолевая кислота	14,667	4,79	2-Пропеновая кислота
22,293	17,66	Олеиновая кислота	15,279	4,82	Гептадекан
27,391	10,51	Гептакозан	17,866	1,92	Неофитадиен
28,523	3,24	Сквален	20,552	1,44	1,4:3,6-Диангидро-альфа-d-глюкопираноза
28,993	7,02	Нонакозан	21,876	2,24	Глицерин
29,532	1,02	Дельта-токоферол	26,306	4,33	Миристиновая кислота
30,237	0,11	Бета-токоферол	26,558	1,75	Дибутилфталат
30,494	4,97	Гентриаконтан	30,882	32,71	Пальмитиновая кислота
30,971	1,57	Витамин Е	31,986	8,51	Пальмитолеиновая кислота
31,806	3,28	1-Триакоктанол			
31,961	0,81	Тритриакоктан			
32,104	0,27	Стигмаста-4,22-диен-3.бета.-ол			
32,645	25,66	Стигмаста-5,24(28)-диен-3-ол, (3.бета.,24Z)			

Изучение фракционного состава липидов полученных экстрактов показало, что в CO₂-экстрактах водорослей более половины липидов представлены в виде триглицеридов, а на свободные жирные кислоты приходится от 15 до 24% от общей суммы липидов. Спиртовые экстракты *V. fucoides* в своем составе содержат в основном фосфолипиды (70–80% от общей суммы липидов), а эфирный — углеводороды и высшие алифатические спирты (Таблица 2).

Идентичность качественного состава исследуемых CO₂-экстрактов водорослей, полученных при одинаковых параметрах процесса, также подтверждается данными жирнокислотного состава полученных экстрактов (Таблица 3).

Из данных Таблицы 3 видно, что полученные CO₂-экстракты в основном состоят из олеиновой

и линолевой кислот независимо от вида сырья, из которого получен экстракт. В жирнокислотном составе эфирного экстракта доминировала олеиновая жирная кислота, а также почти в равных соотношениях содержалась миристиновая, пальмитиновая и арахидоновая кислоты. Жирные кислоты в спиртовых экстрактах *V. fucoides* представлены насыщенной и мононенасыщенной жирными кислотами, такими как пальмитиновая и пальмитолеиновая кислоты. Эйкозапентаеновая жирная кислота, которая относится к незаменимым жирным кислотам, была обнаружена в достаточном количестве только в спиртовом экстракте № 1. Таким образом, показано, что на селективность извлечение жирных кислот из водорослей влияет не только тип экстрагента, но температура и продолжительность процесса, поскольку спиртовой экстракт № 1 был получен при комнатной температуре в течение 14 дней (Таблица 3).

Таблица 2

Фракционный состав липидов экстрактов водорослей, % от общей суммы липидов

Table 2

Fractional Composition of Lipids in Algae Extracts, % of Total Lipid Content

Наименование фракции липидов	Наименование экстракта								
	Эфирный из <i>V. fucoides</i>	Спиртовой № 1 из <i>V. fucoides</i>	Спиртовой № 2 из <i>V. fucoides</i>	CO ₂ <i>V. fucoides</i>	CO ₂ <i>A. plicata</i>	CO ₂ <i>A. tobuchiensis</i>	CO ₂ <i>A. nodosum</i>	CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>	CO ₂ <i>F. distichus</i>
Фосфолипиды	5,00	80,00	70,00	0,75	0,43	0,47	0,66	0,97	0,76
Моноглицериды	н. о.	н. о.	20,00	0,54	0,27	0,43	0,45	0,74	0,43
Диглицериды	н. о.	10,00	н. о.	0,28	0,27	0,31	0,27	н. о.	н. о.
О-Диалкиловые эфиры глицерина	н. о.	н. о.	н. о.	4,68	5,20	7,25	3,62	8,17	8,27
Фитостерины	10,00	н. о.	10,00	4,79	5,91	7,03	8,72	14,50	6,64
Высшие алифатические спирты	20,00	10,0	10,00	4,93	4,25	4,56	4,45	н. о.	6,43
Неидентифицированная фракция	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	8,32	8,94	н. о.	н. о.	н. о.
Свободные жирные кислоты	5,00	н. о.	н. о.	22,10	15,61	16,15	20,96	23,72	23,72
Триглицериды	н. о.	н. о.	н. о.	61,94	59,73	54,84	60,87	51,89	53,75
Углеводороды	60,00	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.

Примечание. н.о. — не обнаружено

Таблица 3

Жирнокислотный состав экстрактов водорослей, % от общей суммы жирных кислот

Table 3

Fatty Acid Composition of Algae Extracts, % of Total Fatty Acids

Жирные кислоты	Наименование экстракта								
	Эфирный из <i>V. fucoides</i>	Спиртовой 1 из <i>V. fucoides</i>	Спиртовой 2 из <i>V. fucoides</i>	CO ₂ <i>V. fucoides</i>	CO ₂ <i>A. plicata</i>	CO ₂ <i>A. tobu-chiensis</i>	CO ₂ <i>A. nodosum</i>	CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>	CO ₂ <i>F. distichus</i>
14:0 (Миристиновая)	12,81	5,12	7,97	1,46	н. о.	0,29	2,98	3,38	1,37
16:0 (Пальмитиновая)	15,43	34,25	42,53	11,58	7,07	7,26	7,25	9,26	8,22
С 16:1 n7-с9 Пальмитолеиновая	1,37	28,96	16,16	5,38	1,18	0,80	2,34	0,81	0,30
18:0 (Стеариновая)	0,99	н. о.	0,93	3,47	2,90	2,92	1,75	3,13	3,73
С 18:1 n9с Олеиновая	39,36	н. о.	5,16	20,75	18,28	16,96	20,28	28,99	24,35
С 18:2 n6с Линолевая	8,15	н. о.	1,46	43,31	48,78	42,53	27,47	41,99	56,49
С 18:3 n3-с9, с12, с15 альфа- Линоленовая	2,08	н. о.	0,83	2,92	12,17	17,51	21,88	3,12	1,08
С 20:1 Гондоиновая	0,24	н. о.	0,09	1,98	0,46	0,31	н. о.	1,20	0,46
С 20:2 с-11, 14 Эйкозадиеновая	1,31	н. о.	н. о.	0,15	н. о.	н. о.	н. о.	0,03	н. о.
С 20:4 n6с-5, с8, с11, с14 Арахидоновая	10,51	н. о.	1,85	0,32	7,61	10,42	13,46	2,86	1,53
С 22:1 n9с-13 Эруковая	0,30	н. о.	н. о.	0,84	н. о.	н. о.	н. о.	0,21	0,16
С 20:5 n3-5, 8,11,14,17 Эйкозапентаеновая	3,83	31,67	8,17	3,97	0,59	н. о.	1,47	2,06	0,82
С 22:6 n3с-4,7,10,13,16,19 Докозагексаеновая	0,05	н. о.	н. о.	1,50	н. о.	н. о.	н. о.	0,35	0,06
Прочие	3,57	0	14,85	2,37	0,96	1,00	1,12	2,61	1,43
ΣНасыщенные	30,49	39,37	55,23	17,93	10,95	11,48	13,11	17,36	14,50
ΣМононенасыщенные	41,88	28,96	30,95	29,60	19,91	18,07	22,61	31,48	25,33
ΣПолиненасыщенные	27,63	31,67	13,82	52,47	69,14	70,45	64,28	51,16	60,18
омега-3	6,39	31,67	9,77	8,45	12,75	17,51	23,35	5,63	1,96
омега-6	19,94	0	4,69	43,87	56,39	52,95	40,93	45,50	58,22
омега-9	39,65	0	5,16	21,59	18,28	16,96	20,28	29,20	24,52
омега-6/омега-3	3,12	0	0,48	5,89	4,42	3,02	1,75	8,08	29,70

Примечание. н.о. – не обнаружено

Биологическая активность экстрактов водорослей

Оценку биологической активности CO₂-экстрактов водорослей осуществляли по таким показателям, как антимикробная и антиоксидантная активность, и проводили в сравнении с экстрактами, полученными с использованием органических растворителей из *V. fucoides*. В результате исследований установлено, что только четыре CO₂-экстракта, полученные из *V. fucoides*, *A. tobuchiensis*, *A. nodosum*, *F. distichus*, обладали антимикробной активностью в отношении культуры *L. monocytogenes* (Таблица 4).

Спиртовой экстракт №2 из *V. fucoides* проявлял антимикробную активность в отношении четырех штаммов микроорганизмов, таких как *C. albicans*, *E. faecalis*, *S. aureus*, *L. monocytogenes*, *P. aeruginosa* (Таблица 4).

Оценка антиоксидантных свойств полученных экстрактов показала, что спиртовые экстракты содержат в своем составе больше антиоксидантов, по сравнению с CO₂-экстрактами. Так, в одном грамме сухих веществ спиртовых экстрактов содержится антиоксидантов от 40,11 до 41,72 мг экв. кверцетина (Таблица 5).

Таблица 4

Антибактериальная активность экстрактов водорослей

Table 4

Antibacterial Activity of the Algae Extracts

Наименование экстракта	Наименование культуры микроорганизма							
	<i>S. abon</i>	<i>C. albicans</i>	<i>P. vulgaris</i>	<i>E. faecalis</i>	<i>S. aureus</i>	<i>L. monocytogenes</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>
Эфирный из <i>V. fucoides</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
Спиртовой № 1 из <i>V. fucoides</i>	-	-	-	-	+	+	-	-
Спиртовой № 2 из <i>V. fucoides</i>	-	+	-	+	+	+	+	-
CO ₂ <i>V. fucoides</i>	-	-	-	-	-	+	-	-
CO ₂ <i>A. plicata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ <i>A. tobuchiensis</i>	-	-	-	-	-	+	-	-
CO ₂ <i>A. nodosum</i>	-	-	-	-	-	+	-	-
CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ <i>F. distichus</i>	-	-	-	-	-	+	-	-

Таблица 5

Антиоксидантные свойства экстрактов водорослей и содержания в них хлорофилла

Table 5

Antioxidant Properties of the Algae Extracts and their Chlorophyll Content

Наименование экстракта	Антиоксидантная активность, мг экв. кверцетина/г	Хлорофилл а, мг/г	Хлорофилл b, мг/г	Сумма хлорофиллов a+b, мг/г
Спиртовой 1 из <i>V. fucoides</i> ¹	40,11	0,78	0,65	1,43
Спиртовой 2 из <i>V. fucoides</i> ¹	41,72	0,95	0,78	1,73
CO ₂ <i>V. fucoides</i>	18,76	2,26	0,02	2,28
CO ₂ <i>A. plicata</i>	33,91	0,35	0,04	0,40
CO ₂ <i>A. tobuchiensis</i>	37,39	0,21	0,09	0,31
CO ₂ <i>A. nodosum</i>	22,89	1,18	0,04	1,22
CO ₂ <i>F. vesiculosus</i>	19,99	3,90	0,03	3,93
CO ₂ <i>F. distichus</i>	19,49	2,85	0,01	2,87

Примечание – для жидких экстрактов антиоксидантную активность и содержание хлорофилла выражали на 1 г сухих веществ экстракта.

Известно, что хлорофилл обладает антиоксидантными свойствами (Чупахина и др., 2016), в связи с чем были проведены исследования по оценке его содержания в полученных экстрактах водорослей. Из экспериментальных данных видно, что наибольшее содержание хлорофилла соответствовало экстрактам бурых водорослей и *V. fucoides*. В то же время в CO₂-экстракте *V. fucoides* содержание хлорофилла в 1,3–1,6 раза больше, чем в спиртовых, что указывает на преимущество использования сжиженного CO₂ для экстракции данного пигмента из водоросли по сравнению с этиловым спиртом (Таблица 5).

Химический состав водорослевого шрота

В результате CO₂-экстракции в качестве отхода образуется водорослевый шрот, который по химическому составу существенно не отличается от исходных водорослей и состоит в основном из углеводов (Таблица 6).

Выход и вязкость водорастворимых полисахаридов из шрота *V. fucoides*

На примере красных водорослей были проведены исследования по сравнению выхода и реологических характеристик водорастворимых полисахаридов, полученных из шрота, образовавшегося после CO₂- и спиртовой экстракций и исходных водорослей. Так, выход водорастворимого полисахарида из *V. fucoides* был на 5–6% больше из шрота, полученного после CO₂- и спиртовой экстракций по сравнению с исходными водорослями. Данное различие объясняется тем, что талломы у водорослевого шрота имеют меньше размер из-за предварительного их измельчения перед CO₂-экстракцией (Рисунок 3).

Разница в значении вязкости полученных образцов 1% растворов водорастворимого полисахарида *V. fucoides* составила порядка 15–20 сП, что не является существенным (Рисунок 3).

Таблица 6

Химический состав водорослей, шрота после CO₂ и спиртовой экстракции

Table 6

Chemical Composition of Algae and the Meal after CO₂ and Alcoholic Extraction

Наименование показателя	Вид водоросли					
	красные			бурые		
	<i>V. fucoides</i>	<i>A. plicata</i>	<i>A. tobuchiensis</i>	<i>A. nodosum</i>	<i>F. vesiculosus</i>	<i>F. distichus</i>
Водоросли						
Зола	28,6	14,0	21,4	17,3	20,6	16,8
Белок	18,25	16,34	19,67	8,55	6,86	9,70
Углеводы	53,2	69,7	58,9	74,1	72,5	73,5
Шрот после CO ₂ экстракции						
Зола	32,1	19,1	24,4	18,9	25,7	20,9
Белок	18,20	19,38	17,15	7,90	8,88	8,70
Углеводы	49,7	61,5	58,5	73,2	65,4	70,4
Шрот после спиртовой экстракции						
Зола	28,7	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Белок	20,20	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Углеводы	51,1	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.

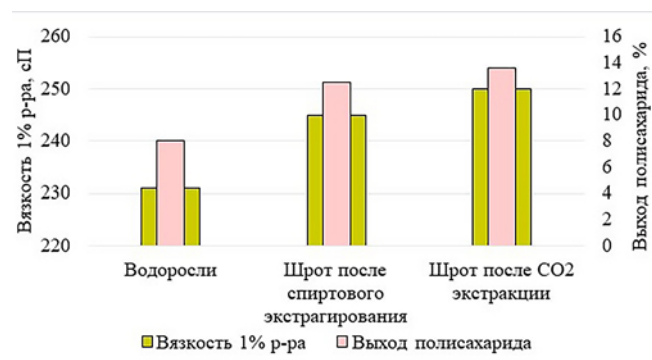
Примечание – н. о. – не определяли

Рисунок 3

Выход и вязкость раствора водорастворимого полисахарида *V. fucoides*

Figure 3

Yield and Viscosity of the Water-Soluble Polysaccharide Solution of *V. fucoides*



Выход и прочность агара из шрота *A. plicata* и *A. tobuchiensis*

Поскольку из *A. plicata* возможно получать два типа агара, используя различные способы (Игнатова & Подкорытова, 2022), то в связи с этим были проведены работы, по выделению этих полисахаридов, применяя различные подходы. Сравнение выхода и прочности геля агара, полученного из водоросли и водорослевого шрота, показали отсутствие серьезных отличий в образцах по данным показателям (Таблица 7).

Аналогичные результаты были получены при сравнении выхода и прочности агара выделенного из водоросли *A. tobuchiensis* и её шрота (Рисунок 4).

Таблица 7

Выход и прочность геля 1% раствора агара полученного из *A. plicata* при разных температурах экстракции полисахарида

Table 7

Yield and Strength of a 1% Agar Gel Obtained from *A. plicata* at Different Polysaccharide Extraction Temperatures

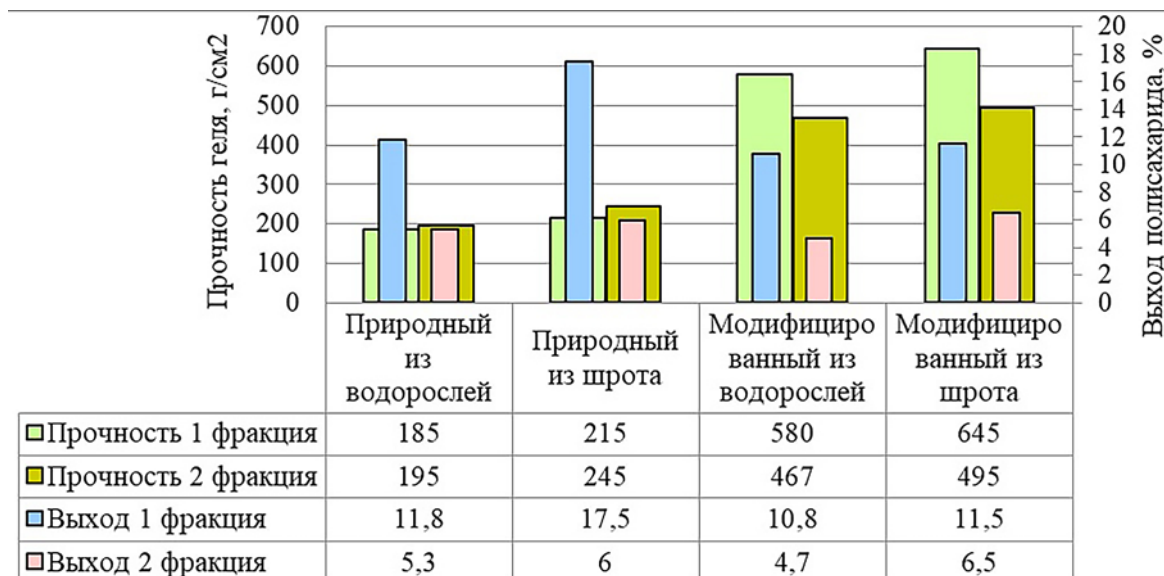
Наименование типа агара	Номер фракции	Прочность геля, г/см ²	Выход по фракции, %	Выход общий, %
Температура экстракции 98±2°C				
Природный из водоросли	1	100	11,4	16,7
	2	140	5,3	
Природный из шрота	1	100	13,1	20,0
	2	175	6,9	
Модифицированный из водоросли	1	170	3,6	5,5
	2	245	1,9	
Модифицированный из шрота	1	165	3,8	5,8
	2	250	2,0	
Температура экстракции 120±2°C				
Природный из водоросли	1	115	14,7	21,8
	2	145	7,1	
Природный из шрота	1	110	20,1	24,0
	2	180	3,9	
Модифицированный из водоросли	1	229	4,0	6,2
	2	345	2,2	
Модифицированный из шрота	1	295	4,6	8,0
	2	355	3,4	

Рисунок 4

Выход и прочность геля агара, полученного из *A. tobuchiensis*

Figure 4

Yield and Strength of the Agar Gel Obtained from *A. tobuchiensis*



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках проведённого исследования была осуществлена оценка эффективности сверхкритической углекислотной (CO₂) экстракции как ключевого этапа комплексной переработки морских макрофитных водорослей с целью получения биологически активных веществ (БАВ) и водорастворимых полисахаридов. Полученные данные подтверждают высокую селективность CO₂ в отношении неполярных компонентов биомассы, таких как триглицериды, свободные жирные кислоты, воски и токоферолы, что согласуется с результатами предыдущих исследований (Sajilata et al., 2008; Santana et al., 2012; Prafulla, 2018). Полярные вещества более эффективно извлекаются с использованием этилового спирта, что обосновывает необходимость этапной экстракции с применением растворителей различной полярности.

Химический анализ CO₂-экстрактов продемонстрировал преобладание таких жирных кислот, как миристиновая, пальмитиновая и олеиновая, а также наличие физиологически значимых соединений, включая токоферолы (β- и δ-формы), сквален и ряд углеводов растительного происхождения. Обнаружение сквалена, обладающего выраженными

кардиопротекторными и антиоксидантными свойствами (Cárdeno et al., 2015), а также стигмастеролов — компонентов фукостерольного ряда с установленной антидиабетической активностью in vivo (Lee et al., 2004) — подтверждает функциональную значимость полученных экстрактов для медицины и функционального питания.

Качественный состав CO₂-экстрактов, полученных из бурых и красных водорослей, варьировался незначительно, демонстрируя устойчивость набора основных БАВ вне зависимости от таксономической принадлежности исходного сырья. Исключение составили два соединения — γ-ситостерол и стигмаста-5,24(28)-диен-3-ол, (3β,24Z), варьировавшие между образцами, что может быть связано с видоспецифическими различиями метаболического профиля. Также установлено, что для образцов, полученных из *V. fucoides* и *F. vesiculosus*, соотношение жирных кислот семейства омега-6 и омега-3 соответствовало физиологически обоснованной норме (МР 2.3.1.0253–21, 2021), что подчёркивает потенциал использования данных экстрактов в диетическом питании.

Антиоксидантная активность экстрактов варьировалась в зависимости от вида водорослей: наи-

большие значения были зафиксированы для образцов, полученных из *A. plicata* и *A. tobuchiensis*. Выявленная вдвое большая антиоксидантная активность спиртовых по сравнению с CO₂-экстрактами из *V. fucoides* указывает на преимущественно полярную природу антиоксидантных компонентов данного вида. Отсутствие прямой зависимости между содержанием хлорофилла и уровнем антиоксидантной активности экстрактов свидетельствует о присутствии в их составе других соединений с выраженными редокс-свойствами.

Водорослевый шрот, образующийся после CO₂-экстракции, является ценным вторичным сырьем. Анализ показал, что водорастворимые полисахариды, выделенные из данного шрота, не уступают по физико-химическим характеристикам, полученным из сушёных водорослей. Это подтверждает возможность рационального использования остаточной биомассы в рамках безотходной технологии. Увеличение выхода полисахаридов при водной экстракции из шрота обусловлено не качественными изменениями биоматериала, а улучшением доступности целевых компонентов за счёт предварительного механического измельчения.

Таким образом, совокупность полученных результатов подтверждает целесообразность применения последовательной CO₂- и водной экстракции как эффективной стратегии комплексной переработки морских водорослей. Установленные химические и функциональные характеристики полученных экстрактов позволяют рекомендовать разработку каскадных экстракционных комплексов, обеспечивающих целенаправленное выделение БАВ и полисахаридов с возможностью дальнейшего масштабирования технологии.

Ограничения исследования

Выявленные в CO₂-экстрактах компоненты относятся к летучим соединениям, доступные для определения методом ГХ-МС. Для еще более глубокого изучения химического состава целесообразно дополнить исследование методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрией высокого разрешения, позволяющим расширить спектр идентифицируемых веществ за счет нелетучих и полярных компонентов экстрактов. Наличие в составе CO₂-экстрактов широ-

кого спектра БАВ обосновывает необходимость проведение исследований по определению их токсичности и установлению летальной дозы, что обеспечивает безопасность их применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило технологическую и биотехнологическую целесообразность последовательного применения сверхкритической углекислотной и водной экстракций при комплексной переработке водорослей-макрофитов. Данная стратегия обеспечивает получение двух целевых фракций — CO₂-экстрактов, содержащих широкий спектр биологически активных веществ, и водорастворимых полисахаридов, востребованных в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности.

Установлено, что физико-химические характеристики полисахаридов, извлечённых из шрота, образующегося после CO₂-экстракции, сопоставимы с параметрами полисахаридов, полученных непосредственно из водорослевого сырья, что подтверждает эффективность вторичной переработки биомассы. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии деградации или структурной модификации целевых углеводных компонентов в результате предварительной CO₂-обработки.

Комплексный анализ химического состава, а также антимикробной и антиоксидантной активности CO₂-экстрактов показал наличие жирных кислот семейств омега-6 и омега-3 в физиологически обоснованном соотношении, что наряду с присутствием соединений с доказанным антиоксидантным и противодиабетическим потенциалом (токоферолы, фукостеролы, сквален) подчёркивает перспективность использования экстрактов в качестве функциональных ингредиентов при создании биологически активных добавок и специализированных пищевых продуктов. Таким образом, предложенный каскадный подход к переработке водорослевого сырья позволяет существенно повысить эффективность его использования, минимизируя количество отходов и расширяя спектр получаемых целевых компонентов. Полученные результаты могут служить научной основой для дальнейшей разработки ресурсосберегающих технологий комплексной переработки водорослей.

В перспективе планируется проведение углублённого химического профилирования CO₂-экстрактов с использованием высокоэффективной жидкостной хроматографии, сопряжённой с масс-спектрометрией высокого разрешения (HPLC-HRMS), а также проведение доклинической *in vivo*-оценки безопасности и биологической активности экстрактов на модельных животных.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Татьяна Анатольевна Игнатова: концептуализация; администрирование данных; проведение исследования; написание черновика рукописи и её редактирование.

Тимур Муратович Байгильдиев: проведение исследования; создание рукописи и её редактирование.

Марина Олеговна Березина: написание черновика рукописи и её редактирование.

Юлия Александровна Баскакова: проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

Лариса Камилевна Плакун: проведение исследования, создание рукописи и её редактирование.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Tatiana A. Ignatova: conceptualization; project administration; investigation; writing — original draft preparation & editing.

Timur M. Baygildiev: investigation; writing — review & editing.

Marina O. Berezina: writing — original draft preparation & editing.

Yulia. A. Baskakova: investigation; writing — review & editing.

Larisa K. Plakun: investigation; writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Березина, М.О. (2024). Состояние запасов и перспективы использования водорослей Белого моря. *Материалы Международной научно-практической конференции* (с. 66–69). М.: Изд-во ВНИРО.
- Berezina, M.O. (2024). Sostojanie zapasov i perspektivy ispol'zovanija vodoroslej Belogo morja. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (s. 66–69). М.: Izd-vo VNIRO. (In Russ.)
- Евсеева, Н. В., Матюшкин, В.Б., Березина, М.О., Мельник, Р.А., Левицкий, А.Л., Власов, Д.О., Саенко, Е.М., Жильцова, Л.В., Белый, М.Н., Дуленин, А.А., Прохорова, Н.Ю., Сологуб, Д.О., Ботнев Д.А. (2024). Состояние ресурсов и промысел водорослей и морских трав в морях России в 2000–2020 гг. *ТРУДЫ ВНИРО*, 195(1), 232–248. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-232-248>
- Evseeva, N.V., Matyushkin, V.B., Berezina, M.O., Melnik, R.A., Levitsky, A.L., Vlasov, D.O., Saenko, E.M., Zhiltsova, L.V., Belyj, M.N., Dulenin, A.A., Prokhorova, N.Y., Sologub, D.O., & Botnev, D.A. (2024). State of resources and fishery of commercial Seaweeds and Seagrasses in the Seas of Russia in 2000–2020. *Trudy VNIRO*, 195(1), 232–248. (In Russ.) <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-195-232-248>
- Игнатова, Т. А., Подкорытова, А. В., Евсеева, Н. В., Баскакова, Ю. А., & Мулянова, М. П. (2023). Красные водоросли Белого моря: оценка их потенциала как сырья для получения фармацевтических субстанций антимикробного действия. Рыбохозяйственный комплекс России: проблемы и перспективы развития. *Материалы I Международной научно-практической конференции* (с. 353–358). М.: Изд-во ВНИРО.
- Ignatova, T. A., Podkorytova, A. V., Evseeva, N. V., Baskakova, Ju. A., & Muljanova, M. P. (2023). Krasnye vodorosli Belogo morja: ocenka ih potenciala kak syr'ja dlja poluchenija

- farmaceuticheskikh substancij antimikrobnogo dejstvija. *Rybohozajstvennyj kompleks Rossii: problemy i perspektivy razvitija. Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (s. 353–358). M.: Izd-vo VNIRO. (In Russ.)
- Игнатова, Т. А., & Подкорытова, А. В. (2022). Управление качеством гелеобразующих полисахаридов, экстрагируемых из *Ahnfeltia plicata* Белого моря. *Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы X международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов* (с. 331–333). М.: Изд-во ВНИРО.
- Ignatova, T. A., & Podkorytova, A. V. (2022). Upravlenie kachestvom geleobrazujushhih polisaharidov, jekstragiruemyh iz *Ahnfeltia plicata* Belogo morja. *Sovremennye problemy i perspektivy razvitija rybohozajstvennogo kompleksa: Materialy X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchjonyh i specialistov* (s. 331–333). M.: Izd-vo VNIRO. (In Russ.)
- Кейтс, М. (1975). *Техника липидологии. Выделение, анализ и идентификация липидов*. М: Издательство «МИР».
- Kejts, M. (1975). *Tehnika lipidologii. Vydelenie, analiz i identifikacija lipidov*. M.: Izdatel'stvo «MIR». (In Russ.)
- Миронов О. А., Миронов О. Г., & Муравьева И. П. (2021). Содержание липидов в макрофитах разных районов прибрежной акватории Севастополя (Чёрное море). *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского — природного заповедника РАН*, 6(1), 17–23. <https://doi.org/10.21072/eo.2021.17.02>
- Mironov, O. A., Mironov, O. G., & Muravyova, I. P. (2021). The content of lipids in macrophytes of different coastal water areas of Sevastopol (The black sea). *Proceedings of the Karadag Scientific Station named after T. I. Vyazemsky — Nature Reserve of the Russian Academy of Sciences*, 6(1), 17–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21072/eo.2021.17.02>
- Наумов, И. А., Буркова, Е. А., Канарская, З. А., & Канарский, А. В. (2015). Водоросли — источник биополимеров, биологически активных веществ и субстрат в биотехнологии (часть 1. Биополимеры клеток тканей водорослей). *Вестник Технологического университета*, 18(1), 184–188.
- Naumov, I. A., Burkova, E. A., Kanarskaja, Z. A., & Kanarskij, A. V. (2015). Vodorosli — istochnik biopolimerov, biologicheski aktivnyh veshhestv i substrat v biotehnologii (chast' 1. Biopolimery kletok tkanej vodoroslej). *Vestnik Tehnologicheskogo universiteta*, 18(1), 184–188. (In Russ.)
- Подкорытова, А. В., & Игнатова, Т. А. (2022). Морские красные водоросли — неиссякаемый источник биологически активных веществ, для медицины и фармацевтики. *Труды ВНИРО*, 188, 151–165. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-188-151-165>
- Podkorytova, A. V., & Ignatova, T. A. (2022). Marine red algae as an inexhaustable source of biologically active substances for medicine and pharmaceuticals. *Trudy VNIRO*, 188, 151–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-188-151-165>
- Рубчевская, Л. П., Ушанова, В. М., & Журавлева, Л. Н. (2005). Биологически активные вещества углекислотных и пропан-бутановых экстрактов древесной зелени. *Российский химический журнал*, XLVIII(3), 80–83. <https://doi.org/10.6060/rcj.2025691.1>
- Rubchevskaja, L. P., Ushanova, V. M., & Zhuravleva, L. N. (2005). Biologicheski aktivnye veshhestva uglekislotnyh i propan-butanovyh jekstraktov drevesnoj zeleni. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal (Russian Chemistry Journal)*, XLVIII(3), 80–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/rcj.2025691.1>
- Хотимченко, С. В., & Гусарова, И. С. (2004). Красные водоросли залива Петра Великого как источник арахидоновой и эйкозапентаеновой кислот. *Биологич моря*, 30(3), 215–218.
- Khotimchenko, S. V., & Gusarova, I. S. (2004). Red algae of Peter the Great Bay as a source of arachidonic and eicosapentaenoic acids. *Russian Journal of Marine Biology*, 30(3), 183–187. <https://doi.org/10.1023/B:RUMB.0000033953.67105.6b> (In Russ.)
- Чупахина Г. Н., Масленников П. В., Скрыпник Л. Н., Чупахина Н. Ю., & Федуреав П. В. (2016). *Антиоксидантные свойства культурных растений Калининградской области*. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта.

- Chupahina G. N., Maslennikov P. V., Skrypnik L. N., Chupahina N. Ju., & Feduraev P. V. (2016). *Antioksidantnye svojstva kul'turnyh rastenij Kaliningradskoj oblasti*. Kaliningrad: Baltijskij federal'nyj universitet imeni Immanuila Kanta. (In Russ.)
- Balk, E., Chung, M., Lichtenstein, A., Chew, P., Kupelnick, B., Lawrence, A., DeVine, D., & Lau, J. (2004). Effects of omega-3 fatty acids on cardiovascular risk factors and intermediate markers of cardiovascular disease. *Evidence Report Technology Assessment*, 93, 1–6.
- Capriotti, K., & Capriotti, J. A. (2012). Dimethyl sulfoxide: History, chemistry, and clinical utility in dermatology. *Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*, 5(9), 24–6.
- Cárdeno, A., Aparicio-Soto, M., Montserrat-de la Paz, S., Bermudez, B., Muriana, F. J. G., & Alarcón-de-la-Lastra, C. (2015). Squalene targets pro- and anti-inflammatory mediators and pathways to modulate over-activation of neutrophils, monocytes and macrophages. *Journal of Functional Foods*, 14, 779–790. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jff.2015.03.009>
- Cheung, P. C. K., Leung, A. Y. H., & Ang, P. O. (1998). Comparison of supercritical carbon dioxide and soxhlet extraction of lipids from a brown seaweed, *Sargassum hemiphyllum* (Turn.) C. Ag. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 4228. <https://doi.org/10.1021/JF980346H>
- Cid, U., Rodríguez-Seoane, P., Díaz-Reinoso, B., & Domínguez, H. (2021). Extraction of fatty acids and phenolics from *Mastocarpus stellatus* using pressurized green solvents. *Marine Drugs*, 19, 453. <https://doi.org/10.3390/md19080453>
- Georgiopoulou, I., Tzima, S., Louli, V., & Magoulas, K. (2022). Supercritical CO2 extraction of high-added value compounds from *Chlorella vulgaris*: experimental design, modelling and optimization. *Molecules*, 27, 5884. <https://doi.org/10.3390/molecules27185884>
- Gonzalez-Rivera, M., Barragan-Galvez, J. C., Gasca-Martínez, D., Hidalgo-Figueroa, S., Isiordia-Espinoza, M., & Alonso-Castro, A. J. (2023). In Vivo neuropharmacological effects of neophytadiene. *Molecules*, 28, 3457. <https://doi.org/10.3390/molecules28083457>
- Holdt, S. L., Kraan, S. (2011). Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23, 543–597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- Jung, J. Y., Kwon, H. H., Hong, J. S., Yoon, J. Y., Park, M. S., Jang, M. Y., & Suh, D. H. (2014). Effect of dietary supplementation with omega-3 fatty acid and gamma-linolenic acid on acne vulgaris: A randomised, double-blind, controlled trial. *Acta Dermato-Venereologica*, 94, 521–525. <https://doi.org/10.2340/00015555-1802>
- Kumari, P., Kumar, M., Reddy, C. R. K., & Jha, B. (2013). Algal lipids, fatty acids and sterols. In *functional ingredients from algae for foods and nutraceuticals* (pp. 87–134). Woodhead Publishing Limited. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857098689>
- Lee, Y. S., Shin, K. H., Kim, B-K, & Lee, S. (2004). Anti-diabetic activities of fecosterol from *Pelvetia siliquosa*. *Archives Pharmacal Research*, 27, 1120–1122. <https://doi.org/10.1007/bf02975115>
- Li, Y., Naghdi, F. G., Garg, S., Adarme-Vega, T. C., Thurecht, K. J., Ghafor, W. A., Tannock, S., & Schenk, P. M. (2014). A comparative study: the impact of different lipid extraction methods on current microalgal lipid research. *Microbial Cell Factories*, 13, 14. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-14>
- Lorenzen, J., Igl, N., Tippelt, M., Stege, A., Qoura, F., Sohling, U., & Brück, T. (2017). Extraction of microalgae derived lipids with supercritical carbon dioxide in an industrial relevant pilot plant. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 40, 911–918. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1755-5>
- Machmudah, S., Diono, W., Kanda, H., & Goto, M. (2018). Supercritical fluids extraction of valuable compounds from algae: Future perspectives and challenges. *Engineering Journal*, 22(5), 13–30. <http://dx.doi.org/10.4186/ej.2018.22.5.13>
- Mendes, R. L., Nobre, B. P., Cardoso, M. T., Pereira, A. P., & Palavra, A. F. (2003). Supercritical carbon dioxide extraction of compounds with pharmaceutical importance from microalgae. *Inorganica Chimica Acta*, 356, 328–334. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(03\)00363-3](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(03)00363-3)
- Mercer, P., Armenta, R. E. (2011). Development in oil extraction from microalgae. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(5), 539–547. <https://doi.org/10.1002/EJLT.201000455>

- Metzger, P., & Largeau, C. (2004). Botryococcus braunii: A rich source for hydrocarbons and related ether lipids. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(5), 486–96. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1779-z>
- Obeid, S., Beaufilsa, N., Camyd, S., Takache, H., Ismail, A., & Pontalier, P.-Y. (2018). Supercritical carbon dioxide extraction and fractionation of lipids from freeze-dried microalgae *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, 34, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.003>
- Ota, M., Watanabe, H., Kato, Y., Watanabe, M., Sato, Y., Smith, R. L., & Inomata, H. (2009). Carotenoid production from *Chlorococcum littorale* in photoautotrophic cultures with downstream supercritical fluid processing. *Journal of Separation Science*, 32, 2327–2335, <https://doi.org/10.1002/jssc.200900154>
- Pereira, H., Barreira, L., Figueiredo, F., Custódio, L., Vizetto-Duarte, C., Polo, C., Rešek, E., Engelen, A., & Varela, J. (2012). Polyunsaturated fatty acids of marine macroalgae: Potential for nutritional and pharmaceutical applications. *Marine Drugs*, 10, 1920–1935. <https://doi.org/10.3390/md10091920>
- Pour Hosseini, S. R., Tavakoli O., & Sarrafzadeh M. H. (2017). Experimental optimization of SC-CO₂ extraction of carotenoids from *Dunaliella salina*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 121, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.11.006>
- Prafulla, D. P., Kodanda, P. R. D., Wang, J., Deng, Q., & Deng, S. (2018). Extraction of bio-oils from algae with supercritical carbon dioxide and co-solvents. *The Journal of Supercritical Fluids*, 135, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.019>
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kamat, M. Y. (2008). Supercritical CO₂ extraction of γ-linolenic acid (GLA) from *Spirulina platensis* ARM 740 using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 84, 321–26. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.028>
- Santana, A. S., Jesus, M. A., Larrayoz, M. A., & Filho R. M. (2012). Supercritical carbon dioxide extraction of algal lipids for the biodiesel production. *Procedia Engineering*, 42, 1755–1761. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.569>
- Schacky, C. V. (2008). Omega-3 fatty acids: Antiarrhythmic, proarrhythmic or both? *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 11(2), 94–99. <https://doi.org/10.1097/mco.0b013e3282f44bdf>
- Schuhmann, H., Lim, D. K. Y., & Schenk, P. M. (2012). Perspectives on metabolic engineering for increased lipid contents in microalgae. *Biofuels*, 3, 1–86. <https://doi.org/10.4155/bfs.11.147>
- Sholokhova, A. Y., Matyushin, D. D., Grinevich O. I., Borovikova, S. A., & Buryak, A. K. (2023). Intelligent workflow and software for non-target analysis of complex samples using a mixture of toxic transformation products of unsymmetrical dimethylhydrazine as an example. *Molecules*, 28(8), 3409. <https://doi.org/10.3390/molecules28083409>
- Terme, N., Boulho, R., Kucma, J.-P., Bourgougnon, N., & Gilles, B. (2018). Radical scavenging activity of lipids from seaweeds isolated by solid-liquid extraction and supercritical fluids. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 25(5), D505. <https://doi.org/10.1051/ocl/2018054>
- Thomsen, B. J., Chow, E. Y., & Sapijaszko, M. J. (2020). The potential uses of omega-3 fatty acids in dermatology: A review. *Journal of Cutaneous Medicine and Surgery*, 24, 481–494. <https://doi.org/10.1177/1203475420929925>
- Wang, L., Pan, B., Sheng, J., Xu, J., & Hu, Q. (2007). Antioxidant activity of *Spirulina platensis* extracts by supercritical carbon dioxide extraction. *Food Chemistry*, 105, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.054>

Перспективы совместного применения *Pseudomonas koreensis* и *Pseudomonas plecoglossicida* для биологического обогащения растений азотом

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

² Лаборатория селекции и агротехники полевых культур Кемеровский НИИСХ – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, пос. Новостройка, г. Кемерово, Российская Федерация

Ю. Р. Серазетдинова¹, Н. Н. Богачёва¹, К. В. Карчин¹,
О. А. Исачкова², О. А. Неверова¹, Л. К. Асякина¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Н. Н. Богачёва

E-mail: nataliakhoroshkina@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Серазетдинова, Ю.Р., Богачёва, Н.Н., Карчин, К.В., Исачкова, О.А., Неверова, О.А., & Асякина, Л.К. (2025). Перспективы совместного применения *Pseudomonas koreensis* и *Pseudomonas plecoglossicida* для биологического обогащения растений азотом. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 116-129. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.1.573>

ПОСТУПИЛА: 13.10.2024

ДОРАБОТАНА: 03.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Исследование потенциала ростостимулирующих бактерий для повышения агрономической биофортификации пшеницы» (шифр FZSR-2024-0009).



АННОТАЦИЯ

Введение: Значительные экономические затраты и возможные экологические риски, связанные с неправильным применением минеральных удобрений, обуславливают необходимость разработки альтернативных стратегий азотного питания сельскохозяйственных культур. Одним из таких подходов является биологическая фиксация азота азотфиксирующими микроорганизмами. Процесс биологической фиксации наиболее изучен в контексте симбиотических взаимодействий с бобовыми культурами, однако современные исследования сосредоточены на расширении его применения для небобовых растений. В этом контексте значительный интерес представляют несимбиотические диазотрофы рода *Pseudomonas*, азотфиксирующий потенциал которых требует дальнейшего изучения и верификации. Настоящее исследование характеризует функциональный потенциал отечественных штаммов *Pseudomonas* и формирует научную основу для их эффективного совместного применения с целью улучшения азотного питания небобовых культур.

Цель: Охарактеризовать азотфиксирующую способность *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802, а также изучить перспективы совместного применения штаммов в улучшении азотного питания растений.

Материалы и методы: объектами исследования являлись штаммы *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802, полученные из Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт». Способность штаммов фиксировать атмосферный азот исследовали с помощью анализатора азота Rapid N. Способность штаммов продуцировать аммиак оценивали спектрофотометрическим методом. Лабораторную апробацию проводили на яровой мягкой пшенице (*Triticum aestivum* L. emend.) «Сибирский Альянс». Количество азота и белка в надземной части растений в фазе проростка по шкале десятичного кода определяли по методу Дюма.

Результаты: Изученные штаммы фиксировали азот при выращивании на безазотной питательной среде, а также обладали способностью к продуцированию аммиака. Настоящее исследование является первым заявлением об азотфиксирующей способности *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802. Штаммы не ингибировали рост друг друга, что позволило сконструировать консорциумы на их основе. Оптимальное соотношение 2:1 (*P. koreensis*: *P. plecoglossicida*) интенсифицировало азотфиксацию (289,76 мкг/мл) и продуцирование аммиака (344,20 мкг/мл). Лабораторная апробация показала статистически достоверное увеличение всхожести, длин надземной и корневой части *Triticum aestivum* L. emend. при обработке консорциумом в сравнении с контрольным вариантом на 17 %, (2,4 и 1,7 см, соответственно). Также надземная часть *Triticum aestivum* L. emend., обработанная консорциумом, содержала на 0,51 % больше азота и на 1,15 % больше белка, чем контрольный вариант.

Выводы: Перспективным является применение консорциума, состоящего из *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 в соотношении 2 к 1, в качестве биоудобрения для повышения азотного питания и урожайности пшеницы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

биологическая фиксация азота; пшеница; микробный консорциум; *Pseudomonas*; ризобактерии

Prospects for the combined use of *Pseudomonas koreensis* and *Pseudomonas plecoglossicida* for biological enrichment of plants with nitrogen

¹ Kemerovo State University», Kemerovo, Russian Federation

² Kemerovo Research Institute of Agricultural Sciences – branch of the Siberian Federal Scientific Center for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences, village New building, Kemerovo, Russian Federation

Yuliya R. Serazetdinova¹, Natalia N. Bogacheva¹,
Konstantin V. Karchin¹, Olga A. Isachkova², Olga Al. Neverova¹,
Lyudmila K. Asyakina¹

CORRESPONDENCE:

Natalia N. Bogacheva

E-mail: nataliakhoroshkina@mail.ru

FOR CITATIONS:

Serazetdinova, Yu.R., Bogacheva, N.N., Karchin, K.V., Isachkova, O.A., Neverova, O.A., & Asyakina, L.K. (2025). Prospects for the combined use of *Pseudomonas koreensis* and *Pseudomonas plecoglossicida* for biological enrichment of plants with nitrogen. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 116-129. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.573>

RECEIVED: 13.10.2024

REVISED: 03.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The work was funded by the state task «Research of the potential of growth-stimulating bacteria to increase the agronomic biofortification of wheat» (code FZSR-2024-0009)



ABSTRACT

Introduction: Significant economic costs and potential environmental risks associated with improper use of mineral fertilizers necessitate the development of alternative strategies for nitrogen nutrition of agricultural crops. One of such approaches is biological nitrogen fixation by nitrogen-fixing microorganisms. The process of biological fixation has been studied best in the context of symbiotic interactions with legumes, but modern research is focused on expanding its application to non-legumes. In this context, non-symbiotic diazotrophs of the genus *Pseudomonas* are of considerable interest; their nitrogen-fixing potential requires further study and verification. This study characterizes the functional potential of domestic *Pseudomonas* strains and forms a scientific basis for their effective combined use to improve nitrogen nutrition of non-legumes.

Purpose: To characterize the nitrogen-fixing capacity of *Pseudomonas koreensis* B-3481 and *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802 and to investigate the prospects of their combined application for enhancing plant nitrogen nutrition.

Materials and Methods: The study analysed the strains *Pseudomonas koreensis* B-3481 and *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802 obtained from the National Bioresource Center of the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms of the National Research Center «Kurchatov Institute». The nitrogen-fixing activity of the strains was studied using a Rapid N analyzer, and the ability to produce ammonia was evaluated spectrophotometrically. Laboratory testing was carried out on «Siberian Alliance» spring soft wheat (*Triticum aestivum* L. emend.). The amount of nitrogen and protein in the aboveground part of plants in the sprout phase on a decimal code scale was determined using the Dumas method.

Results: Research has shown that the studied strains fixed nitrogen when grown on a nitrogen-free nutrient medium, and also had the ability to produce ammonia. The present study is the first to report the nitrogen-fixing ability of *Pseudomonas koreensis* B-3481 and *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802. The strains did not inhibit each other's growth, which made it possible to construct consortia based on them. The optimal ratio of 2:1 (*P. koreensis*: *P. plecoglossicida*) intensified nitrogen fixation (289.76 µg/mL) and ammonia production (344.20 µg/mL). Laboratory testing showed a statistically significant increase in germination, the length of the aerial and root parts of *Triticum aestivum* L. emend. when treated with a consortium in comparison with the control option by 17% (2.4 and 1.7 cm, respectively). Also, the aerial part of *Triticum aestivum* L. emend., treated by the consortium, contained 0.51% more nitrogen and 1.15% more protein than the control variant.

Conclusion: It is promising to use a consortium consisting of *Pseudomonas koreensis* B-3481 and *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802 in a ratio of 2 to 1 as a biofertilizer to increase nitrogen nutrition and wheat yield.

KEYWORDS

biological nitrogen fixation; wheat; microbial consortium; *Pseudomonas*; rhizobacteria

ВВЕДЕНИЕ

Азот является одним из ключевых макроэлементов, необходимых для роста и развития растений, поскольку входит в состав аминокислот, белков, нуклеиновых кислот, хлорофилла и множества других первичных и вторичных метаболитов (Fageria & Baligar, 2005; Rafiq et al., 2023). Несмотря на высокую концентрацию молекулярного азота в атмосфере (около 78 %), в свободной форме он недоступен для растений и может быть усвоен только после трансформации в минеральные соединения: нитраты, нитриты или ионы аммония (Temple et al., 1998). Основными источниками азота в агроценозах традиционно являются минеральные удобрения, содержащие соединения аммония и нитратов (Трапезников и др., 1999; Ahmed et al., 2020). Однако применение этих удобрений сопровождается рядом неблагоприятных экологических последствий, включая закисление почв, эмиссию парниковых газов и нарушение микробиоценоза (Khan et al., 2018). Эти эффекты обусловлены микробиологически опосредованными трансформациями азотных соединений в почвенной среде и требуют переосмысления существующих стратегий азотного питания сельскохозяйственных культур.

Актуальность разработки альтернативных, экологически безопасных подходов к обеспечению растений азотом возрастает на фоне необходимости устойчивого интенсифицирования растениеводства. Одним из наиболее перспективных направлений в этом контексте является использование азотфиксирующих микроорганизмов, ассоциированных с ризосферой растений. Эти микроорганизмы способны превращать молекулярный азот атмосферы в доступные для растений формы в процессе биологической фиксации азота, снижая потребность в минеральных удобрениях (Тихонович и соавт., 2016; Singh et al., 2022). Наиболее изучены симбиотические взаимодействия бобовых культур с клубеньковыми бактериями (Kishorekumar et al., 2020), однако возрастающий научный интерес вызывает группа несимбиотических (ассоциативных) азотфиксирующих бактерий, способных колонизировать ризосферу широкого круга растений без формирования специализированных симбиотических структур.

Среди таких микроорганизмов особое внимание уделяется представителям рода *Pseudomonas*, обладающим высоким метаболическим и эколо-

гическим разнообразием. Способность к фиксации атмосферного азота у отдельных штаммов *Pseudomonas* была впервые выявлена в середине XX века (Anderson, 1955), а последующие исследования подтвердили наличие у них *nif*-генов, кодирующих ключевые ферменты азотфиксации — нитрогеназы (Panpatte et al., 2016). Кроме того, установлено положительное влияние некоторых представителей рода, в частности *P. fluorescens*, на образование клубеньков у бобовых культур (Nagpal et al., 2021). Однако текущие данные о diaзотрофных свойствах *Pseudomonas* ограничены, и сведения о способности других видов рода к фиксации азота в настоящее время в научной литературе практически отсутствуют (Shrivastava et al., 2015).

В связи с этим поиск и характеристика новых азотфиксирующих штаммов *Pseudomonas* представляют значительный интерес как с научной точки зрения (для расширения представлений о физиолого-биохимических особенностях рода), так и с прикладной (для разработки биологических средств повышения доступности азота в агроэкосистемах). Особую актуальность представляет изучение потенциала совместного использования нескольких штаммов *Pseudomonas*, обладающих азотфиксирующей активностью, с целью синергетического повышения эффективности азотного питания растений.

Цель исследования — охарактеризовать азотфиксирующую способность штаммов *Pseudomonas koreensis* и *Pseudomonas plecoglossicida* и оценить перспективы их совместного применения в качестве микробных агентов, способствующих улучшению азотного питания сельскохозяйственных культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Штаммы бактерий, полученные из Национального биоресурсного центра Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов НИЦ «Курчатовский институт»:

- (1) *Pseudomonas koreensis* В-3481. Штамм получен путем мутагенеза, является антагонистом почвенных патогенов.
- (2) *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802. Штамм выделен из корней авокадо, способен продуцировать сидерофоры.

Оборудование

Шейкер-инкубатор LSI-3016A (Daihan Labtech, Южная Корея) 2012 г. выпуска, Rapid N cube (Rapid, Германия) 2008 г. выпуска, спектрофотометр UV 1800 (Shimadzu, Япония) 2012 г. выпуска, денситометр Densichek plus («BioMerieux», Франция) 2021 г. выпуска, центрифуга 5430 («Eppendorf», Германия) 2012 г. выпуска.

Методы, инструменты и процедура исследования

Способность к фиксации азота

Для анализа способности штаммов фиксировать азот готовили суспензию бактериального штамма в физиологическом растворе с коэффициентом мутности 0,8–1,0 по МакФарланду с использованием денситометра (Faskhutdinova et al., 2024). Затем 1 мл полученной суспензии добавляли в 10 мл питательной среды следующего состава, г/л: 10,0 глюкозы («Chem-ех», Россия); 5,0 магния серноокислого 7-водного («Chem-ех», Россия); 1,0 калия фосфорнокислого 2-замещенного 3-водного («Chem-ех», Россия); 0,005 натрия молибденовокислого 2-водного («ХимРеактив», Россия); 5,0 натрия хлористого («ЛенРеактив», Россия); 0,01 железа II серноокислого 7-водного («ХимРеактив», Россия); 2,0 кальция углекислого («ХимРеактив», Россия). Полученную смесь культивировали в шейкере-инкубаторе в течение 2 сут. при температуре 28–30 °С и скорости 120 об/мин. Далее отделяли культуральную жидкость от клеток центрифугированием в течение 10 мин при скорости 8000 об/мин. Содержание азота в бесклеточной культуральной жидкости определяли с использованием анализатора азота Rapid N Cube.

Способность к продуцированию аммиака

Для этого готовили суспензию бактериального штамма с коэффициентом мутности 0,8–1,0 по МакФарланду (Faskhutdinova et al., 2024) на 1% пептонной воде. К 10 мл 1% пептонной воды добавляли 1 мл полученной суспензии и культивировали в течение 24 ч при температуре 28±2 °С и скорости вращения 110 об/мин. К 3 мл бесклеточной культуральной жидкости (клетки отделяли при помощи центрифугирования в течение 10 мин при скорости 8000 об/

мин) добавляли 150 мкл реактива Несслера («ЛенРеактив», Россия). Затем измеряли оптическую плотность на спектрофотометре при 450 нм. Оптическую плотность образца определяли по формуле 1:

$$ОП = ОП_э - ОП_к, \quad (1)$$

где ОП — расчетная оптическая плотность образца; ОП_э — экспериментальная оптическая плотность образца; ОП_к — оптическая плотность контрольного варианта.

Количество произведенного аммиака определяли по градуировочному графику стандартного раствора аммония от 50 до 300 мкг/мл.

Оценка биосовместимости бактериальных штаммов

Изучение биосовместимости штаммов методом совместного культивирования. В чашку Петри с агаризованной средой Лурия-Бертани в модификации Миллера ровным слоем с помощью шпателя Дригальского наносили тест-культуру. В лунки диаметром 4 мм вносили культуральную жидкость исследуемого штамма (готовили суспензию бактериального штамма в физиологическом растворе с коэффициентом мутности 0,8–1,0 по МакФарланду с использованием денситометра (Faskhutdinova et al., 2024). Затем 1 мл полученной суспензии добавляли в 10 мл питательной среды Лурия-Бертани в модификации Миллера и культивировали в течение 24 ч при температуре 28 ± 2 °С и скорости вращения 110 об/мин. Далее клетки отделяли при помощи центрифугирования в течение 10 мин при скорости 8000 об/мин). Культивировали при температуре 28 ± 2 °С в течение 24 ч. Культуры считались биосовместимыми, если не образовывалась зона ингибирования.

Конструирование микробных консорциумов и проверка их активностей

Для конструирования микробных консорциумов готовили бактериальные суспензии исследуемых штаммов по методике, описанной в приготвлении культуральной жидкости без отделения клеток от культуральной жидкости. Далее в стерильную жидкую среду Лурия-Бертани в модификации Миллера вносили определенное количество микроорганизмов в зависимости от соотношения (Таблица 1).

Таблица 1

Соотношение исследуемых бактериальных штаммов в консорциумах

Table 1

Ratio of the Studied Bacterial Strains in Consortia

Номер	Соотношение	
	<i>Pseudomonas koreensis</i> B-3481	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> B-13802
Консорциум № 1	1	1
Консорциум № 2	1	2
Консорциум № 3	2	1
Консорциум № 4	1	3
Консорциум № 5	3	1
Консорциум № 6	2	3
Консорциум № 7	3	2

Консорциумы культивировали в шейкере-инкубаторе в течение 24 ч при температуре 28 ± 2 °C и скорости вращения 110 об/мин. Для получения супернатанта отделяли клетки от культуральной жидкости с помощью центрифугирования в течение 10 мин при скорости 8000 об/мин.

Способность консорциумов к фиксации азота

Анализ способности консорциумов фиксировать азот. Для этого готовили суспензии бактериальных штамма в физиологическом растворе с коэффициентом мутности 0,8–1,0 по МакФарланду с использованием денситометра (Faskhutdinova et al., 2024). Затем вносили определенное количество микроорганизмов в зависимости от соотношения (Таблица 1) в 10 мл питательной среды следующего состава, г/л: 10,0 глюкозы («Chem-ех», Россия); 5,0 магния серноокислого 7-водного («Chem-ех», Россия); 1,0 калия фосфорнокислого 2-замещенного 3-водного («Chem-ех», Россия); 0,005 натрия молибденовокислого 2-водного («ХимРеактив», Россия); 5,0 натрия хлористого («ЛенРеактив», Россия); 0,01 железа II серноокислого 7-водного («ХимРеактив», Россия); 2,0 кальция углекислого («ХимРеактив», Россия). Полученную смесь культивировали в шейкере-инкубаторе в течение 2 сут. при температуре 28–30 °C и скорости 120 об/мин. Далее отделяли культуральную жидкость от клеток центрифугированием в течение 10 мин при скорости 8000 об/мин. Содержание азота в бесклеточной культуральной

жидкости определяли с использованием анализатора азота Rapid N Cube (Серазетдинова и др., 2023).

Способность к продуцированию аммиака

Определение способности к производству аммиака осуществляли по методике, описанной в работе Parashar et al. (2023). Для этого готовили суспензии бактериальных штаммов с коэффициентом мутности 0,8–1,0 по МакФарланду (Faskhutdinova et al., 2024) на 1 % пептонной воде. В 10 мл 1 % пептонной воды вносили определенное количество микроорганизмов в зависимости от соотношения (Таблица 1) и культивировали в течение 24 ч при температуре 28 ± 2 °C и скорости вращения 110 об/мин. К 3 мл бесклеточной культуральной жидкости (клетки отделяли при помощи центрифугирования в течение 10 мин при скорости 8000 об/мин) добавляли 150 мкл реактива Несслера («ЛенРеактив», Россия). Затем измеряли оптическую плотность на спектрофотометре при 450 нм. Оптическую плотность образца определяли по формуле 1.

Лабораторная апробация

Лабораторную апробацию перспективного консорциума и отдельных штаммов проводили с использованием яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L. *emend.*) «Сибирский Альянс». Для оценки эффективности штаммов и консорциума семена пшеницы стерилизовали 2,5 % гипохлоритом натрия в течение 3 мин и трижды промывали дистиллированной водой. Далее семена высаживали в растительни в почву (содержание доступных для растений питательных элементов (мг/л), не менее: азота ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$) — 180; фосфора (P_2O_5) — 225; калия (K_2O) — 270; микроэлементов (мг/кг): железо — 0,8; молибден — 0,1; бор — 0,4; цинк — 0,2; марганец — 8; медь — 3. Влажность — не более 65 %, pH — 5,5–6,5) и поливали рабочим раствором штаммов и консорциума в количестве 10 л/т. Рабочий раствор штаммов и консорциума готовили культивированием штаммов/консорциума в жидкой среде Луриа-Бертани в модификации Миллера в течение 24 ч при температуре 28 ± 2 °C и скорости вращения 110 об/мин и разбавлением полученной культуральной жидкости с использованием дистиллированной воды в соотношении 2:8. Семена прорастивали в течение 10 суток до фазы проростка по шкале десятичного кода при температуре

25 °C и влажности 50–60%. В качестве контроля использовались стерильные семена, проращиваемые в течение 10 суток и поливаемые стерильной дистиллированной водой.

Для оценки всхожести семян пшеницы использовали формулу 2:

$$B = (N_{\text{пс}} / N_{\text{ос}}) \times 100, \quad (2)$$

где B — всхожесть семян, %;
 $N_{\text{пс}}$ — количество проросших семян, шт;
 $N_{\text{ос}}$ — общее количество семян, шт.

Длины корней и надземной части растений пшеницы измеряли на миллиметровой бумаге с точностью 0,5 мм Faskhutdinova et al. (2024). Количество азота и белка в надземной части растений в фазе проростка по шкале десятичного кода определяли по методу Дюма в соответствии с ГОСТ Р 54390–2011/ISO/TS 16634–2:2009 с использованием анализатора Rapid N Cube.

Статистическая обработка результатов

Все исследования проводили в пятикратной повторности. Полученные значения выражали как среднее значение пяти измерений со стандартным отклонением. Анализ статистических данных осуществляли при помощи программного продукта Microsoft Office Excel 2007 (12.0.6612.1000) SP3 MSO (12.0.6607.1000) (Microsoft corporation, США). Статистический анализ полученных данных проводили с помощью одномоментного парного критерия Стьюдента, по каждой паре интересов. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки эффективности штаммов рода *Pseudomonas* в качестве биоудобрений, способствующих азотному питанию растений, необходимо провести комплексный анализ их diazотрофной активности. Это включает в себя количественное определение фиксации атмосферного азота и продукции аммиака. Учитывая потенциальные антагонистические взаимодействия между микроорганизмами при совместном культивировании, необходимо исследование биосовместимо-

сти штаммов, а также оценка влияния различных комбинаций штаммов в составе консорциума на их азотфиксирующую активность и аммонификацию. При составлении оптимального консорциума необходимо провести лабораторную апробацию на пшеницы в условиях *in vitro* для подтверждения эффективности применения консорциума на основе штаммов рода *Pseudomonas*.

Способность бактериальных штаммов к фиксации азота и продуцированию аммиака

Результаты исследования способности штаммов рода *Pseudomonas* фиксировать азот и производить аммиак представлены на Рисунке 1.

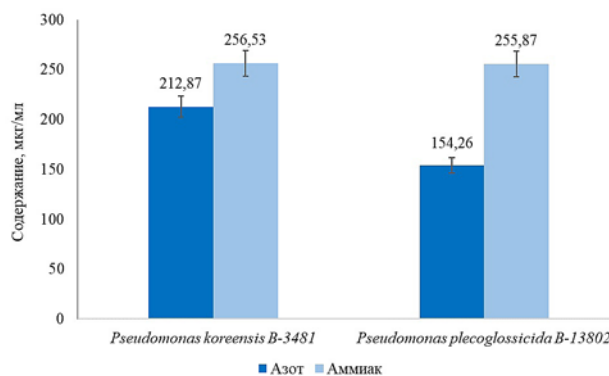
Проведенное исследование выявило способность штаммов *Pseudomonas koreensis* B-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802 фиксировать атмосферный азот и продуцировать аммиак. Полученные результаты представляют значительный интерес для исследователей, поскольку ранее не выявлено доказательств азотфиксирующей активности этих штаммов в научной литературе. Таким образом, полученные результаты расширяют знания о биохимических свойствах *Pseudomonas koreensis* B-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* B-13802, подтверждая разнообразие азотфиксирующей активности бактерий рода *Pseudomonas*.

Рисунок 1

Способность бактериальных штаммов к фиксации азота и продуцированию аммиака

Figure 1

The Ability of Bacterial Strains to Fix Nitrogen and Produce Ammonia.



Изучение биосовместимости *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802

На следующем этапе исследования проведена оценка биосовместимости штаммов *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802. Результаты анализа показали, что метаболиты *Pseudomonas koreensis* не ингибируют рост *Pseudomonas plecoglossicida* на плотной питательной среде. Метаболиты *Pseudomonas plecoglossicida* также не проявляют антагонических свойств в отношении *Pseudomonas koreensis* (Рисунок 2). Об этом говорит отсутствие зоны ингибирования роста тест-культуры вокруг лунки, содержащей метаболиты исследованного штамма. Полученные данные свидетельствуют о том, что штаммы перспективно использовать в составе консорциума. Это открывает перспективы для создания многокомпонентных микробиологических препаратов на основе этих штаммов, что может повысить эффективность их применения.

Конструирование бактериальных консорциумов и исследование их биологической активности

На следующем этапе исследования были разработаны консорциумы, включающие штаммы *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 в различных соотношениях (Таблица 1).

Для определения оптимального соотношения штаммов в консорциуме, была проведена оценка азотфиксирующей активности каждого варианта (Таблица 2).

Количество азота в культуральной жидкости варьировалось в диапазоне от 129,55 до 289,76 мкг/мл; аммиака — от 198,64 до 344,20 мкг/мл. Наименьшей активностью обладал консорциум № 4. У некоторых других консорциумов наблюдалась сниженная способность фиксировать азота, так у консорциумов № 1 и 2 меньше азота по сравнению со средними значениями по отдельно взятым штаммам на 7,42 и 17,46 мкг/мл соответственно. Также у консорциума № 2 снижена активность по продуцированию аммиака на 24,01 мкг/мл.

Рисунок 2
Биосовместимость исследуемых бактериальных штаммов

Figure 2
Biocompatibility of the Studied Bacterial Strains



Примечание. 1 — метаболиты *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 в отношении *Pseudomonas koreensis* В-3481; 2 — метаболиты *Pseudomonas koreensis* В-3481 в отношении *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802

Note: 1 — metabolites of *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 in relation to *Pseudomonas koreensis* В-3481; 2 — metabolites of *Pseudomonas koreensis* В-3481 in relation to *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802

Таблица 2

Исследование способности консорциумов фиксировать азот и продуцировать аммиак

Table 2

Investigation of the Ability of Consortia to Fix Nitrogen and Produce Ammonia

Консорциум	Показатели			
	Азота, мкг/мл		Аммиака, мкг/мл	
	Значение	Среднее по штаммам	Значение	Среднее по штаммам
Консорциум № 1	176,15 ± 4,89	183,57	259,38 ± 6,53	256,20
Консорциум № 2	156,34 ± 4,56	173,80	232,08 ± 5,28	256,09
Консорциум № 3	289,76 ± 5,20	193,33	344,20 ± 7,06	256,31
Консорциум № 4	129,55 ± 2,34	168,91	198,64 ± 4,23	256,04
Консорциум № 5	209,53 ± 5,09	198,22	278,86 ± 5,64	256,37
Консорциум № 6	188,53 ± 3,87	177,70	264,33 ± 5,07	256,13
Консорциум № 7	251,07 ± 5,61	189,43	302,20 ± 6,31	256,27

Наибольшей активностью обладал консорциум № 3, так содержание азота составило 289,76 мкг/мл, содержание аммиака — 344,20 мкг/мл. Таким образом, для дальнейшего анализа выбран консорциум № 3: *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 в соотношении 2:1.

Лабораторная апробация

Семена яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L. *emend.*) сорта «Сибирский Альянс» были представлены Кемеровским Научно-исследовательским институтом сельского хозяйства — филиалом Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Варианты обработки представлены в Таблице 3.

Таблица 3

Варианты обработки пшеницы отдельными штаммами и консорциумом

Table 3

Wheat Treatment Options with Individual Strains and Consortium

Варианты обработки	Описание
Контроль	Без обработки
Вариант 1	Обработка <i>Pseudomonas koreensis</i> В-3481
Вариант 2	Обработка <i>Pseudomonas plecoglossicida</i> В-13802
Вариант 3	Обработка консорциумом № 3

В Таблице 4 представлены результаты всхожести семян, длины побегов и корней яровой мягкой пшеницы.

Таблица 4

Оценка всхожести семян, длины побегов и корней яровой мягкой пшеницы

Table 4

The Evaluation of Seed Germination, Shoot Length and Roots of Spring Soft Wheat

Вариант обработки	Показатели		
	Всхожесть, %	Длина ростка, см	Длина корня, см
Контроль	73±1	13,2±0,4	8,4±0,2
Вариант 1	81±2	14,9±0,3	9,4±0,3
Вариант 2	76±3	14,1±0,3	8,9±0,3
Вариант 3	90±4	15,6±0,5	10,1±0,3

Исследование показало, что обработка семян штаммами *Pseudomonas koreensis* В-3481, *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802, а также консорциумом № 3, содержащим оба штамма, привела к улучшению показателей роста пшеницы. Наблюдалось увеличение всхожести семян, а также длины ростка и корня по сравнению с контрольной группой.

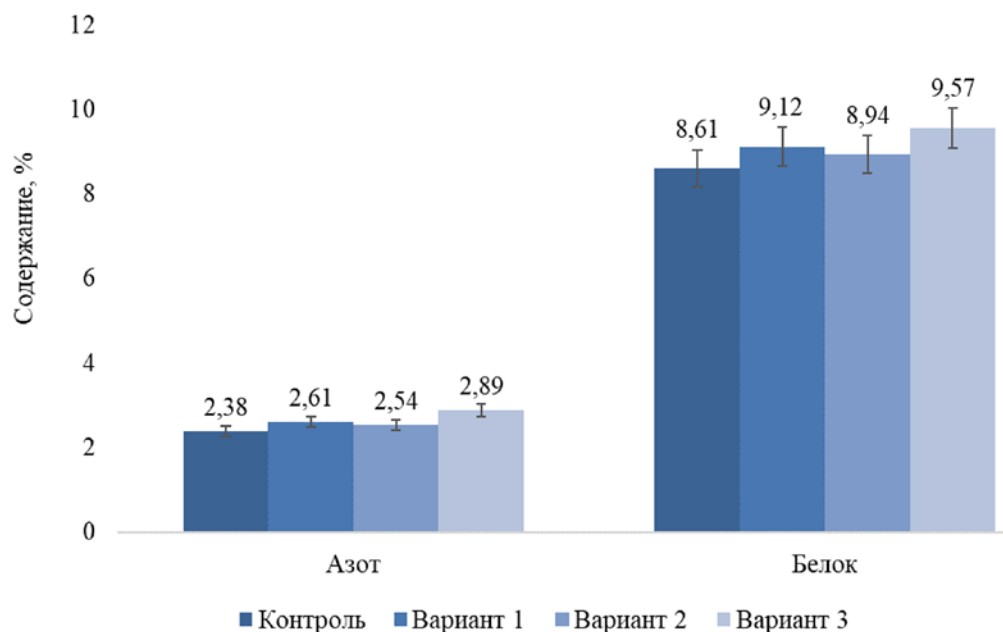
Статистически значимые ростостимулирующие свойства были выявлены при обработке штаммом *Pseudomonas koreensis* В-3481, который увеличил

Рисунок 4

Содержание азота и белка в надземной части в фазе проростка (ДК 10–19) по шкале десятичного кода с планкой погрешности процент

Figure 4

Nitrogen and Protein Content in the Aboveground Part in the Sprout Phase (DK 10–19) According to a Decimal Code Scale with an Error Bar of a Percent



всхожесть на 8% и длину ростка на 1,7 см по сравнению с контролем. Также статистически значимые результаты были получены при обработке консорциумом № 3, который увеличил всхожесть на 17%, длину ростка на 2,4 см и длину корня на 1,7 см по сравнению с контролем.

Так как данные штаммы и консорциумы способны фиксировать азот и продуцировать аммиак, то предположительно при обработки растений данными штаммами/консорциумом количество азота и белка в них должно увеличивается (Завалин & Соколов, 2018). Результаты анализа содержания азота и белка в надземной части представлены на Рисунке 3.

Содержание азота в надземной части пшеницы находилось в диапазоне от 2,38 до 2,89%, содержание белка — от 8,61 до 9,57%. Результаты исследования свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на содержание азота и белка в пшенице оказал консорциум (содержание азота увеличилось на 0,51%, белка — на 0,96% в сравнении с контрольным вариантом).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель настоящего исследования заключалась в характеристике азотфиксирующей способности штаммов *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802, а также в оценке их потенциала для совместного применения с целью улучшения азотного питания растений. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что оба штамма обладают способностью к биологической фиксации атмосферного азота, а также продуцируют аммиак в количествах, подтверждающих их функциональную активность как несимбиотических diaзотрофов. Это расширяет представления о физиолого-биохимическом потенциале рода *Pseudomonas* как перспективного источника микроорганизмов для биологизации земледелия.

Несмотря на то, что азотфиксирующая активность бактерий рода *Pseudomonas* уже находила отражение в научной литературе (Завалин и соавт., 2019; Коршунова и соавт., 2021; Panpatte et al., 2016; Nagpal et al., 2021), продукция аммиака, зафиксиро-

роvanная в нашем исследовании, превышает показатели, представленные в ряде ранее опубликованных работ. Это, по-видимому, обусловлено как видоспецифическими особенностями использованных штаммов, так и положительным эффектом их совместного культивирования. Совместное применение *P. koreensis* В-3481 и *P. plecoglossicida* В-13802 в оптимальном соотношении 2:1 позволило достичь наибольших значений продукции азота (289,76 мкг/мл), что на 49,88 % превышает среднее значение для индивидуальных культур. Продукция аммиака составила 344,20 мкг/мл, что на 78,04 % выше среднего по отдельным штаммам, указывая на выраженный синергетический эффект в консорциуме.

Проведённые в лабораторных условиях биотесты продемонстрировали, что оба штамма, как в монокультуре, так и в консорциуме, оказывали стимулирующее воздействие на рост пшеницы, что согласуется с наблюдениями других исследователей. В частности, Yarzabal et al. (2018) зафиксировали положительное влияние штаммов *Pseudomonas*, выделенных из антарктических почв, на ростовые показатели *Triticum aestivum*, включая увеличение длины корней и побегов. Аналогично, Safari et al. (2018) сообщили об улучшении всхожести, массы и солеустойчивости проростков пшеницы при обработке *Pseudomonas fluorescens*.

Тем не менее, влияние бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений не является однозначным. В ряде исследований описаны ингибирующие эффекты, связанные, вероятно, с избыточной продукцией фитогормонов. Так, Худайгулов и соавт. (2011) выявили снижение всхожести при высоких концентрациях *Ps. chlororaphis* ИБ-51, что авторы связывают с возможным переизбытком индолил-3-уксусной кислоты. Сходные данные приводят Миннебаев и соавт. (2019), отмечая, что высокая концентрация фитогормонов может оказывать токсическое действие на растения. В нашем исследовании оптимизация соотношения штаммов в консорциуме, вероятно, позволила достичь сбалансированного уровня продукции физиологически активных веществ, обеспечивая стимулирующий, а не ингибирующий эффект. Дополнительно, возможен механизм пролонгированного действия фитогормонов, обусловленный их комплексированием с экзополисахаридами, как показано в работе Веселова и соавт. (1998).

Следует также учитывать видоспецифическую чувствительность растений к бактериальному воздействию. Так, согласно данным Миннебаева и соавт. (2019), эффективность различных штаммов *Pseudomonas* варьировала в зависимости от культуры: высокие эффекты наблюдались у гороха, нута и люпина, в то время как у люцерны и донника они были выражены слабо или отсутствовали. Предполагается, что подобная избирательность может быть связана с наличием в оболочке семян вторичных метаболитов, таких как алкалоиды, к которым *Pseudomonas* менее устойчивы. В нашем исследовании, сфокусированном на пшенице, ингибирующего эффекта зафиксировано не было, что может свидетельствовать о лучшей совместимости штаммов с данной культурой.

Ростостимулирующее действие микроорганизмов обусловлено комплексом механизмов, включая синтез фитогормонов, сидерофоров, растворение фосфатов, выработку антагонистических соединений и, в ряде случаев, фиксацию атмосферного азота (Серазетдинова и соавт., 2023). Поэтому нельзя исключать, что стимулирующее влияние, наблюдаемое в данном исследовании, обусловлено действием нескольких факторов одновременно. Однако зафиксированное повышение содержания общего азота и белка в надземной части растений служит косвенным подтверждением улучшения азотного питания в присутствии исследуемых штаммов. Эти данные согласуются с результатами Fox et al. (2016), показавших, что *P. protegens* Pf-5 X940 повышает содержание азота в зерне пшеницы, а также с результатами Pham et al. (2017), продемонстрировавших, что *P. stutzeri* A15 превосходит по эффективности минеральное удобрение при выращивании риса.

В совокупности представленные результаты позволяют сделать вывод о высоком биотехнологическом потенциале *P. koreensis* и *P. plecoglossicida* как самостоятельных, так и синергетически действующих агентов, способных эффективно повышать биологическую доступность азота и стимулировать рост растений в агроэкосистемах.

Ограничения исследования

Ограничением настоящего исследования является то, что эксперименты проводились *in vitro* и *in planta* в лабораторных условиях на ограниченном коли-

честве образцов. Результаты, полученные в контролируемой среде, могут не полностью отражать реальные полевые условия, где действуют другие факторы, влияющие на рост растений и фиксацию азота (например, конкуренция с другими микроорганизмами, колебания температуры и влажности, наличие других питательных веществ). В связи с этим для понимания роли исследуемых микроорганизмов необходимо дополнительное проведение полевого эксперимента. Также исследование проводили на одном сорте яровой мягкой пшеницы («Сибирский Альянс»). Взаимодействие описанных штаммов с другими сортами пшеницы или другими зерновыми культурами может приводить к другому эффекту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установление азотфиксирующей активности *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 расширяет представления о биохимическом потенциале представителей *Pseudomonas*, а также обуславливают возможность их применения в сельскохозяйственной практике. Наблюдаемый синергический эффект совместного культивирования этих штаммов, проявляющийся в усилении фиксации атмосферного азота, является основой для разработки инновационных биопрепаратов на основе консорциума *P. koreensis* В-3481 и *P. plecoglossicida* В-13802. Данный подход особенно актуален, поскольку в естественных условиях растения взаимодействуют с комплексными микробными сообществами, а не с изолированными штаммами.

Лабораторные исследования продемонстрировали высокие ростостимулирующие свойства консорциума и его положительное влияние на накопление азота и белка в надземной массе пшеницы. Использование консорциума на основе *Pseudomonas koreensis* В-3481 и *Pseudomonas plecoglossicida* В-13802 может стать важным шагом на пути к созданию устойчивого и экологически безопасного сельского хозяйства. Дальнейшее исследование консорциума будет направлено на оптимизацию его культивирования с целью повышения его эффективности и устойчивости в окружающей среде. Также планируется проведение полевых испытаний для оценки практической применимости консорциума в реальных условиях сельского хозяй-

ства. Кроме того, перспективным направлением является оценка возможности применения данного консорциума для других сельскохозяйственных культур.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Юлия Ренатовна Серазетдинова: проведение исследования; написание черновика рукописи.

Наталья Николаевна Богачёва: проведение исследования.

Константин Валерьевич Карчин: визуализация.

Ольга Александровна Исачкова: разработка методологии.

Ольга Александровна Неверова: разработка методологии, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Людмила Константиновна Асякина: получение финансирования; разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuliya R. Serazetdinova: investigation; writing — original draft preparation.

Natalia N. Bogacheva: investigation.

Konstantin V. Karchin: visualization.

Olga A. Isachkova: methodology.

Olga A. Neverova: methodology, writing — review & editing.

Lyudmila K. Asyakina: funding acquisition; conceptualization; project administration.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Болдышева, Е. П., Чудинов, В. А., Попова, В. И., & Бекмагамбетов, А. И. (2020). Применение минеральных удобрений под яровую пшеницу при ресурсосберегающей технологии предельвания на обыкновенном черноземе. *Вестник Омского государственного аграрного университета*, 2(38), 41–51.
- Boldysheva, E. P., Chudinov, V. A., Popova, V. I., & Bekmagambetov, A. I. (2020). Application of mineral fertilizers in resource-saving cultivation technologies of spring wheat on ordinary chernozem. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2(38), 41–51. (In Russ.)
- Веселов, С. Ю., Иванова, Т. Н., Симонян, М. В., & Мелентьев, А. И. (1998). Исследование цитокининов, продуцируемых ризосферными микроорганизмами. *Прикладная биохимия и микробиология*, 34(2), 175–179.
- Veselov, S. Yu., Ivanova, T. N., Simonyan, M. V., & Melentyev, A. I. (1998). Study of cytokinins produced by rhizosphere microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 34(2), 175–179. (In Russ.)
- Завалин, А. А., & Соколов О. А. (2018) Азот и качество зерна пшеницы. *Плодородие*, 1(100), 14–17.
- Zavalin, A. A., & Sokolov, O. A. (2018) Nitrogen and wheat grain quality. *Fertility*, 1(100), 14–17. (In Russ.)
- Завалин, А. А., Алферов, А. А., & Чернова, Л. С. (2019). Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур. *Агрохимия*, (8), 83–96.
- Zavalin, A. A., Alferov, A. A., & Chernova, L. S. (2019). Associative nitrogen fixation and the practice of application of biological products in agricultural crops. *Agrochemistry*, (8), 83–96. (In Russ.)
- Завалин, А. А., Благовещенская, Г. Г., Шмырева, Н. Я., Чернова, Л. С., Соколов, О. А., Алферов, А. А., & Самойлов, Л. Н. (2015). Современное состояние проблемы азота в мировом земледелии. *Агрохимия*, (5), 83–95.
- Zavalin, A. A., Blagoveshchenskaya, G. G., Shmyreva, N. Ya., Chernova, L. S., Sokolov, O. A., Alferov, A. A., & Samoilo, L. N. (2015). Current state of the problems of nitrogen in world agriculture. *Agrochemistry*, (5), 83–95. (In Russ.)
- Коршунова, Т. Ю., Бакаева, М. Д., Кузина, Е. В., Рафикова, Г. Ф., Четвериков, С. П., Четверикова, Д. В., & Логинов, О. Н. (2021). Роль бактерий рода *Pseudomonas* в устойчивом развитии агросистем и защите окружающей среды (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология*, 57(3), 211–227.
- Korshunova, T. Yu., Bakaeva, M. D., Kuzina, E. V., Rafikova, G. F., Chetverikov, S. P., Chetverikova, D. V., & Loginov, O. N. (2021). The role of *Pseudomonas* bacteria in sustainable development of agrosystems and protection of the environment (Review). *Applied biochemistry and microbiology*, 57(3), 211–227. (In Russ.)
- Кудеяров, В. Н., & Семенов В. М. (2014). Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации. *Агрохимия*, (10), 3–17.
- Kudeyarov, V. N., & Semenov V. M. (2014). Agrochemical problems and the current state of agricultural chemicalization in the russian federation. *Agrochemistry*, (10), 3–17. (In Russ.)
- Миннебаев, Л. Ф., Кузина, Е. В., Рафикова, Г. Ф., Чанышев, И. О., & Логинов, О. Н. (2019). Продуктивность бобово-ризобияльного комплекса под влиянием ростстимулирующих штаммов микроорганизмов. *Сельскохозяйственная биология*, 54(3), 481–493.
- Minnebaev, L. F., Kuzina, E. V., Rafikova, G. F., Chanyshv, I. O., & Loginov, O. N. (2019). Productivity of the legume-rhizobial complex under the influence of growth-stimulating strains of microorganisms. *Agricultural Biology*, 54(3), 481–493. (In Russ.)
- Прянишников, Д. Н. (1927). Собрание статей и научных работ: монография (том 1). Москва: Работник просвещения.
- Pryanishnikov, D. N. (1927). Collection of articles and scientific works: monograph (volume 1). Moscow: Education worker. (In Russ.)
- Романова, И. Н., Князева, С. М., Глушаков, С. Н., Терентьев, С. Е., & Перепичай, М. И. (2016). Урожайность зерновых культур и уровень плодородия почвы в зависимости от внесения

- минеральных удобрений, типа почв в системе севооборота. *Зерновое хозяйство России*, (2), 57–61.
- Romanova, I. N., Knyazeva, S. M., Glushakov, S. N., Terentiev, S. E., & Perepichay, M. I. (2016). Productivity of grain crops and soil fertility depending on fertilizers, type of soil in the system of crop rotation. *Grain Economy of Russia*, (2), 57–61. (In Russ.)
- Серазетдинова, Ю. Р., Фотина, Н. В., Асякина, Л. К., Милентьева, И. С., Просеков, А. Ю. (2023). Ризобактерии *Triticum* spp. для снижения биотического стресса, вызванного фитопатогенными грибами. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 98–113. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.515>
- Serazetdinova, Y. R., Fotina, N. V., Asyakina, L. K., Milentyeva, I. S., & Prosekov, A. Y. (2023). Rhizobacteria for reducing biotic stress in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) caused by phytopathogenic fungi. *Storage and Processing of Farm Products*, (4), 98–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.4.515>
- Соколов, М. С., Глинушкин, А. П., Спиридонов, Ю. Я., Торопова, Е. Ю., & Филипчук, О. Д. (2019). Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО). *Агрохимия*, (5), 3–20.
- Sokolov, M. S., Glinushkin, A. P., Spiridonov, Yu. Ya., Toropova, E. Yu., & Filipchuk, O. D. (2019). Technological features of soil-protecting resource-saving agriculture (in development of the FAO concept). *Agrochemistry*, (5), 3–20. (In Russ.)
- Тихонович, И. А., & Завалин А. А. (2016). Перспективы использования азотфиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации в РФ. *Плодородие*, 5(92), 28–32.
- Tikhonovich, I. A., Zavalin A. A. (2016). Prospects for the use of nitrogen-fixing and phytostimulating microorganisms to increase the efficiency of the agro-industrial complex and improve the agro-ecological situation in the Russian Federation. *Fertility*, 5(92), 28–32. (In Russ.)
- Трапезников, В. К., Иванов, И. И., & Тальвинская, Н. Г. (1999). Локальное питание растений. Уфа: Гилем.
- Trapeznikov, V. K., Ivanov, I. I., & Talvinskaya, N. G. (1999). Local nutrition of plants. Ufa: Gilem. (In Russ.)
- Худайгулов, Г. Г., Логинов, О. Н., & Мелентьев, А. И. (2011). Экзополисахарид альгинатного типа *Paenibacillus ehimensis* 739. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 5, 214–217.
- Khudaigulov, G. G., Loginov, O. N., & Melentyev, A. I. (2011). Alginate of *Paenibacillus ehimensis* 739. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 5, 214–217.
- Ahmed, M., Rauf, M., Akhtar, M., Mukhtar, Z., & Saeed, N. A. (2020). Hazards of nitrogen fertilizers and ways to reduce nitrate accumulation in crop plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 17661–17670. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08236-y>
- Asyakina, L. K., Vorob'eva, E. E., Proskuryakova, L. A., & Zharko, M. Yu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 162–171. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
- Chandra, D., Srivastava, R., Glick, B., & Sharma, A. (2018). Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. *Pedosphere*, 28, 227–240. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60013-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60013-X)
- Crawford, N. M., & Glass, A. D. M. (1998). Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends in Plants Science*, 3(10), 389–395. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01311-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01311-9)
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97–185. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- Faskhutdinova, E. R., Fotina, N. V., Neverova, O. A., Golubtsova, Y. V., Mudgal, G., Asyakina, L. K., & Aksenova, L. M. (2024). Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. *Foods and Raw Materials*, 12(2), 348–360. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613>
- Fox, A. R., Soto, G., Valverde, C., Russo, D., Lagares, A. Jr., Zorreguieta, Á., Alleva, K., Pascuan, C., Frare, R., Mercado-Blanco, J., Dixon, R., & Ayub, N. D. (2016). Major cereal crops benefit

- from biological nitrogen fixation when inoculated with the nitrogen-fixing bacterium *Pseudomonas protegens* Pf-5 X940. *Environmental Microbiology*, 18(10), 3522–3534. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13376>.
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., Alamri, S. A. (2020). Fertilizers and Their contaminants in soils, surface and groundwater. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 5, 225–240. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09888-8>
- Kishorekumar, R., Bulle, M., Wany, A., & Gupta K. J. (2019). An overview of important enzymes involved in nitrogen assimilation of plants. *Nitrogen Metabolism in Plants*, 2057, 1–13. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9790-9_1
- Krapp, A. (2015). Plant nitrogen assimilation and its regulation: a complex puzzle with missing pieces. *Current Opinion in Plant Biology*, 25, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.05.010>
- Nagpal, S., Sharma, P., Sirari, A., Kumawat, K. C., Wati, L., Gupta, S. C., & Mandahal, K. S. (2021). Chickpea (*Cicer arietinum* L.) as model legume for decoding the co-existence of *Pseudomonas fluorescens* and *Mesorhizobium* sp. as bio-fertilizer under diverse agro-climatic zones. *Microbiological Research*, 247, 126720. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126720>
- O'Brien, J. A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., & Gutiérrez, R. A. (2016). Nitrate transport, sensing, and responses in plants. *Molecular Plant*, 9(2), 837–856. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.05.004>
- Panpatte, D.G., Jhala, Y.K., Shelat, H.N., & Vyas, R.V. (2016). *Pseudomonas fluorescens*: A promising biocontrol agent and PGPR for sustainable agriculture. In D. Singh, H. Singh, & R.Prabha (Eds.), *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_15
- Parashar, M., Dhar, S. K., Kaur, J., Chauhan, A., Tamang, J., Singh, G. B., Asyakina, L., Perveen, K., Khan, F., Bukhari, N.A., Mudgal, G., & Gururani, M.A. (2023). Two novel plant-growth-promoting *Lelliottia amnigena* isolates from *Euphorbia prostrata* aiton enhance the overall productivity of wheat and tomato. *Plants*, 12, 3081. <https://doi.org/10.3390/plants12173081>
- Pham, V. T., Rediers, H., Ghequire, M. G., Nguyen, H. H., De Mot, R., Vanderleyden, J., & Spaepen, S. (2017). The plant growth-promoting effect of the nitrogen-fixing endophyte *Pseudomonas stutzeri* A15. *Archives of Microbiology*, 199(3), 513–517. <https://doi.org/10.1007/s00203-016-1332-3>
- Rafiq, M., Saqib, M., Jawad, H., Javed, T., Hussain, S., Arif, M., Ali, B., Bazmi, M. S. A., Abbas, G., Aziz, M., Al-Sadoon, M. K., Gulnaz, A., Lamlo, S. F., Sabir, M.A., & Akhtar, J. (2020). Improving quantitative and qualitative characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) through nitrogen application under semiarid conditions. *Phyton-international Journal of Experimental Botany*, 92(4), 1001–1017. <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.025781>
- Safari, D., Jamali, F., Nooryazdan, H., & Bayat, F. (2018) Evaluation of ACC deaminase producing “*Pseudomonas fluorescens*” strains for their effects on seed germination and early growth of wheat under salt stress. *Australian Journal of Crop Science*, 12(3), 413–421. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.03.pne801>
- Shrivastava, S., Egamberdieva, D., & Varma, A. (2015). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and medicinal plants: the state of the art. In D. Egamberdieva, S. Shrivastava, & A. Varma (Eds.), *Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and medicinal plants*. *Soil Biology*, 42. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13401-7_1
- Singh, P., Singh, R. K., Li, H. B., Guo, D. J., Sharma, A., Verma, K. K., Solanki, M. K., Upadhyay, S. K., Lakshmanan, P., Yang, L. T., & Li, Y. R. (2020). Nitrogen fixation and phytohormone stimulation of sugarcane plant through plant growth promoting diazotrophic *Pseudomonas*. *Biotechnology and Genetic Engineering Review*, 40(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/02648725.2023.2177814>
- Singh, R. K., Singh, P., Sharma, A., Guo, D. J., Upadhyay, S. K., Song, Q. Q., Verma, K. K., Li, D. P., Malviya, M. K., Song, X. P., Yang, L. T., & Li, Y. R. (2022). Unraveling nitrogen fixing potential of endophytic diazotrophs of different *Saccharum* species for sustainable sugarcane growth. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(11), 6242. <https://doi.org/10.3390/ijms23116242>
- Temple, S. J., Vance, C. P., & Gantt, J. S. (1998). Glutamate synthase and nitrogen assimilation. *Trends in Plants Science*, 3(2), 51–56. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01159-X](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01159-X)
- Yarzabal, L. A., Monserrate, L., Buella, L., & Chica, E. (2018). Antarctic *Pseudomonas* spp. promote wheat germination and growth at low temperatures. *Polar Biology*, 41, 2343–2354. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2374-6>

Исследование сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока на пилотной установке непрерывного действия

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар Российская Федерация

Х.А. Мунассар, И.А. Шорсткий, А.Г. Шерстюков

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Е.Х.А. Мунассар

E-mail: emadmounasar@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мунассар, Е.Х., Шорсткий, И.А., & Шерстюков, А.Г. (2025). Исследование сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока на пилотной установке непрерывного действия. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 130-140. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.620>

ПОСТУПИЛА: 22.10.2024

ДОРАБОТАНА: 01.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00205, <https://rscf.ru/project/25-29-00205/>



АННОТАЦИЯ

Введение: Современные технологии сушки зернового сырья ориентированы на повышение энергоэффективности процессов при одновременном обеспечении сохранности качественных характеристик продукции. Энергетическая эффективность сушки напрямую влияет на уровень технологической и экономической конкурентоспособности предприятий зерноперерабатывающей отрасли. В условиях роста объемов перерабатываемого сырья и, как следствие, увеличения энергетических затрат, актуализируется необходимость внедрения альтернативных методов сушки. В то же время остаётся недостаточно изученной область применения электрогидродинамического (ЭГД) потока в процессах обезвоживания зерновых материалов, что указывает на существующий научно-технологический пробел и обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Цель: Изучение процесса сушки зернового материала в ЭГД потоке на пилотной установке непрерывного действия с определением эффективности сушки, потребления энергии и возможности масштабирования установки.

Материалы и методы: В качестве объекта сушки использовали фуражное зерно пшеницы. В качестве технологии сушки с ЭГД-потоком использовали пилотную сушильную установку производительностью 50 кг/час. Установка работает по циклическому принципу, воздействуя на фуражное зерно пшеницы попеременно коронным и искровым разрядом, многократно пропуская зерновой материал через электродные блоки до достижения заданного уровня влажности. Напряженность электрического поля в зоне обработки достигала 8 кВ/см. Анализ эффективности сушки проводили путем оценки кинетики сушки, общего энергопотребления и эксергетического показателя сушки. Все эксперименты были проведены в трехкратной повторности, а результаты статистически обработаны методами ANOVA анализа.

Результаты: Показано, что наложение электрогидродинамического потока на зерновой материал вызывает комбинацию эффектов «травления» поверхности зерна с возникновением мелкоячеистой структуры и способствует объемному нагреву за счет Джоулева тепла. При сушке зерна с использованием электрогидродинамического потока снижение влажности зерна за один проход в установке составило 0,28%. Удельные затраты предлагаемой установки составляют 1,85 кВт/кг влаги, что на 30% ниже по сравнению с традиционной сушкой с использованием теплового агента при аналогичных температурных условиях.

Выводы: Установка для сушки зернового материала с наложением электрогидродинамического потока может быть использована в технических линиях малой производительности с целью подсушки или полноценной сушки зернового материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых сушильных установок и модернизации существующих технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

зерновой материал; электрогидродинамический поток; коронный разряда; искровой разряд; технологическое оборудование

Electrohydrodynamic Grains Drying on Pilot Equipment with Continuous Flow

Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

Emad Munassar, Ivan Shorstkii, Andrey Sherstyukov

CORRESPONDENCE:

Emad Munassar

E-mail: emadmounasar@gmail.com

FOR CITATIONS:

Munassar, E.H., Shorstkii, I.A., & Sherstyukov, A.G. (2025). Electrohydrodynamic grains drying on pilot equipment with continuous flow. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 130-140. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.620>

RECEIVED: 22.10.2024

REVISED: 01.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

The research was funded by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project no. 25-29-00205



ABSTRACT

Introduction: Modern grain drying technologies aim to improve energy efficiency while preserving the quality characteristics of the final product. The energy performance of drying processes directly influences the technological and economic competitiveness of grain processing enterprises. In the context of increasing volumes of processed raw materials and the associated rise in energy consumption, the need for alternative drying methods is becoming increasingly relevant. At the same time, the application of electrohydrodynamic (EHD) flow in grain drying processes remains insufficiently explored, indicating a scientific and technological gap that necessitates further research in this area.

Purpose: To study the drying process of grain material in the EHD flow on pilot equipment with continuous flow and to determine drying efficiency, energy consumption and the possibility of scaling the equipment.

Materials and Methods: Feed grain of wheat was used as the drying object. A pilot drying unit with a capacity of 50 kg/hour was used as an EHD-flow drying technology. The equipment operates on a cyclic principle, acting on the feed grain of wheat alternately with a corona and spark discharge, repeatedly passing the grain material through the electrode blocks until a preset moisture level is reached. The electric field strength in the treatment area reached 8 kV/cm. The drying efficiency was analyzed by evaluating the drying kinetics, total energy consumption, and exergetic drying index. All experiments were repeated three times, and the results were statistically processed using ANOVA analysis methods.

Results: It is shown that the superposition of electrohydrodynamic flow on grain material causes a combination of the effects of "etching" the grain surface with the appearance of a fine-mesh structure and promotes volumetric heating due to Joule heat. When drying grain using electrohydrodynamic flow, the decrease in grain moisture in one pass in the equipment was 0.28%. The unit cost of the proposed equipment is 1.85 kW/kg of moisture, which is 30% lower than traditional drying using a thermal agent under similar temperature conditions.

Conclusions: The equipment for drying grain material with the application of electrohydrodynamic flow can be used in low-productivity technical lines for the purpose of drying or full-fledged drying of grain material. The results obtained can be used in the development of new drying plants and the modernization of existing technologies in agriculture and food industry.

KEYWORDS

grain material; electrohydrodynamic flow; corona discharge; spark discharge; technological equipment

ВВЕДЕНИЕ

Современные агропромышленные и пищевые технологии функционируют в условиях растущих требований к энергоэффективности, экологической безопасности и сохранению качественных характеристик перерабатываемой сельскохозяйственной продукции. В рамках традиционного термомеханического подхода возможности повышения эффективности процессов сушки считаются практически исчерпанными, что обуславливает необходимость разработки альтернативных технологических решений, основанных на применении физических эффектов.

В данном контексте особое внимание привлекают электрофизические методы обработки, обладающие рядом технологических и энергетических преимуществ (Baskakov, 2023; Li, 2014; Scholtz, 2019). Среди них можно выделить такие технологии, как воздействие импульсным электрическим полем высокого напряжения (Мунассар, 2024), озонирование (Шорсткий, 2023), микроволновая (СВЧ) сушка (Ali, 2025), а также технология сушки с применением электрогидродинамического (ЭГД) потока (Paul, 2021).

Наблюдается возрастающий интерес к применению ЭГД-потока, что обусловлено его конкурентными преимуществами: возможность создания направленных газовых потоков без использования турбин и вентиляторов, низкое энергопотребление, а также способность воздействовать непосредственно на влагосодержащие компоненты материала. Потенциал ЭГД-сушки как альтернативы конвективным методам обработки термолабильных продуктов подтверждается в ряде экспериментально-промышленных исследований (Baldanov, 2020; Los, 2019).

В отличие от других электрофизических технологий (например, импульсного электрического поля или омического нагрева), ЭГД-сушка обеспечивает равномерное и бесконтактное удаление влаги с дополнительным эффектом обеззараживания поверхности зерна (Шорсткий, 2022). Конструктивно установка ЭГД-сушки включает высоковольтный источник питания и электродную систему, геометрия которой влияет на эффективность переноса влаги (Charpe, 2020; Malekjan, 2018). Механизм действия ЭГД-потока может включать как физико-химическое воздействие за счёт заряженных частиц,

так и воздействие ультрафиолетового излучения, сопровождающего коронный разряд (Dubinov, 2000).

Необходимость оптимизации параметров ЭГД-воздействия обусловлена тем, что слабый ток не обеспечивает достаточной ионизации потока, в то время как превышение порога может вызывать термическое разрушение биологических объектов (Baskakov, 2023; Munassar, 2024a; Baldanov, 2020; Anukiruthika, 2021). Исследования в данной области преимущественно сосредоточены на оценке кинетики сушки, энергоэффективности и качества получаемого продукта (de Groot, 2018; Randeniya, 2015), а также на выборе оптимальной геометрии электродов (Defraeye, 2018; Singh, 2012).

Вместе с тем, результаты существующих исследований демонстрируют низкую масштабируемость систем с плоскостными или игольчатыми электродами до промышленного уровня (Ciprian, 2022; Singh, 2012). Понятие масштабируемости в данной работе трактуется как способность системы к изменению производительности посредством модификации конструкции при минимальных ресурсных и временных затратах (Du, 2022; Stolárik, 2015).

При увеличении объема обрабатываемого сырья эффективность сплошных пластинчатых электродов снижается из-за неравномерного распределения ЭГД-потока (Charles, 2021; Šimek, 2021). В таких условиях ионизированный поток преимущественно осаждается на электродной поверхности, не обеспечивая эффективного влаговывода из объёма материала. Согласно результатам численного моделирования, использование сетчатого электрода, выполненного из комбинации диэлектрических и проводящих материалов, позволяет значительно повысить равномерность и интенсивность сушки (Iranshahi, 2022; Defraeye, 2018). Однако на сегодняшний день подтверждение эффективности таких конструкций в отношении зернового сырья в режиме попеременного коронного и искрового разрядов отсутствует.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном изучении процесса сушки зернового материала в ЭГД-потоке с чередующимся действием коронного и искрового разрядов на пилотной установке. Особое внимание уделено оценке кинетических характеристик процесса, энергоэффективности и масштабируемости системы.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации сушильных установок для нужд агропромышленного и пищевого комплексов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы и подготовка образцов

В качестве объекта исследований использовалось фуражное зерно пшеницы. Влажность зернового материала перед началом эксперимента довели до $21,36 \pm 0,25\%$ в герметичной емкости путем добавления дистиллированной воды, просчитанного объёма. Изначальный показатель влажности соответствует собранному зерну пшеницы с полей Краснодарского края, Россия. Оценку показателя влажности для каждого этапа проводили с помо-

щью анализатора влажности ЭВЛАС-2М (Россия). Для проведения одного цикла обработки использовали пшеницу массой 1,5 кг.

Пилотная сушильная установка с добавлением ЭГД потока

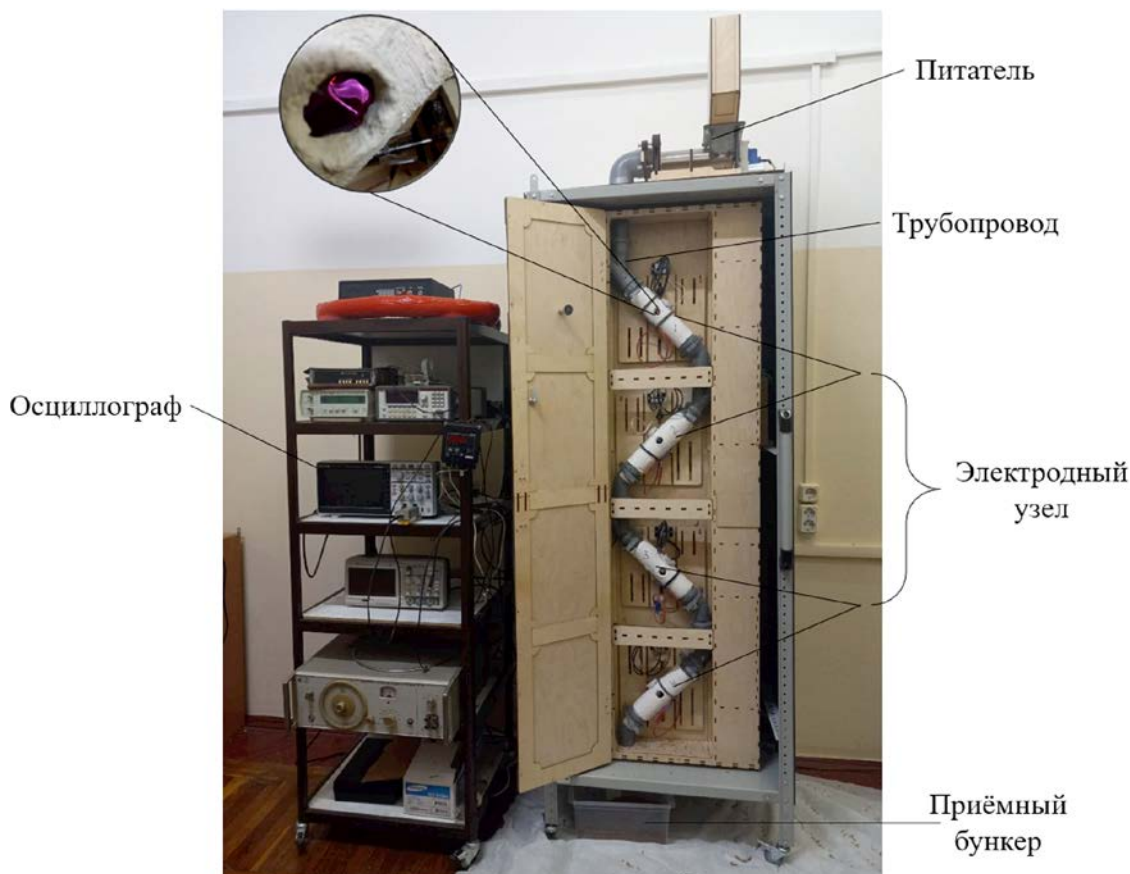
Пилотная сушильная установка показана на Рисунке 1. Её рабочим органом выступает трубопровод радиусом 25 миллиметров, который выполнен из диэлектрического материала. В верхней части корпуса установки закреплён шнековый дозатор, подсоединенный к началу трубопровода. Сам рабочий орган состоит из четырёх секций, каждая из которых снабжена узлами обработки низкотемпературной плазмы. Трубопровод выполнен под некоторым углом к горизонту, который позволяет беспрепятственно перемещаться обраба-

Рисунок 1

Пилотная зерносушильная установка с применением ЭГД потока и электродный узел при разряде

Figure 1

Pilot Grain Drying Plant with Application of EHD Flow and Electrode Assembly During Discharge



тываемому материалу самотёком. В нижней части трубопровод подсоединён к узлу вывода обработанного материала, выполненного в виде бункера. Узел обработки низкотемпературной плазмой представляет из себя два электрода, подключенных к генератору высокого напряжения и заземлению. Источником питания служит управляемый блок SH-0105 от компании Науэл (Россия) с максимальной мощностью 100 Вт. Анод данной пилотной установки имеет выходное напряжение до 20 кВ, благодаря генератору высокого напряжения. Катод выполнен в виде петли из металлической нити накала, для образования термоэлектронной эмиссии. Она повышает энергию электронов, которая становится больше полной работы выхода.

Установка функционирует по принципу циклического пропускания материала зернового происхождения через электродные узлы до реализации необходимой влажности. Поток зернового материала в трубопровод поступает равномерно сверху вниз, благодаря шнековому дозатору. После каждого прогона пшеницы через пилотную установку измеряется температура зернового материала прибором ИК-пирометр RGK pl-8, его масса на электронных весах, а также влажность. В верхней части установки установлен анемометр для снятия показаний скорости электроактивированного сушильного агента, а для повышения его скорости прохождения пилотная установка снабжена вытяжной системой. В целях безопасности корпус установки выполнен из диэлектрического материала.

Электродинамические характеристики тока и напряжения подаваемого импульса контролировались с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 через делитель $\times 1000$ (Tektronix).

Условия проведения испытаний представлены в Таблице 1.

Постановка эксперимента была осуществлена согласно запатентованной технологии (Sharma, 2023) и протоколу испытаний (Таблица 1). В качестве вариации рассмотрено: сушка с наложением ЭГД потока, и сушка тепловым агентом (воздух при температуре 65 °С и скоростью потока 1,7 м/с). Количество циклов пропускания — 50.

Перед экспериментом образцы семян пшеницы доводили до комнатной температуры. Эксперименты

Таблица 1

Показатели исходных данных эксперимента

Table 1

Experimental Setup Parameters

Показатели	Испытания	
Вид зерна	фуражное зерно пшеницы	
Режим сушки	ЭГД поток	Сушильный агент
Температура, °С:		
Наружного воздуха	21,0 ± 0,5	21,0 ± 0,5
Внутри камеры	70	65
Относительная влажность воздуха в помещении, %	60 ± 3%	
Влажность материала до обработки, %	21,56	

проводились при атмосферных условиях (температура воздуха 21 ± 0,5 °С с относительной влажностью 60 ± 3%).

Анализ энергетических затрат

Энергетические затраты рассчитаны отдельно для общих энергетических затрат и затрат на реализацию электрогидродинамического потока. К общим энергетическим затратам относятся в том числе потери в высоковольтном источнике питания и вспомогательных инструментах. Величина потерь зависит от масштабов оборудования и в значительной степени варьируется при масштабировании. Поэтому в данной работе используется величина удельных энергетических затрат отнесенную к единице испаренной влаги:

$$W = P \cdot t_{\text{обр}} / m_{\text{исп}}, \quad (1)$$

где P — энергия ЭГД потока, которая определяется как $P = UI$, где I — ток разряда, А; U — напряжение разряда, В. Величина t_{crit} определена как время достижения влагосодержания зерна 7%.

Литературное значение для стандартной сушильной установки составляет $W_{\text{уд}} = 0,64$ кВт·ч/кг H_2O , представляющий собой скрытую теплоту испарения воды при 100 °С (Chaple, 2020).

Эксергетический показатель сушки (η_E) определяется как отношение энергии, используемой для ис-

парения влаги (E_{ev}), к общей энергии, подаваемой в сушилку (E_{in}) (Chaple,2020):

$$\eta_E = \frac{E_{ev}}{E_{in}} = \frac{(m_{eva})(C_p\Delta T + L_{eva})}{P(t_2 - t_1)}, \quad (2)$$

где m_{eva} — масса испарившейся влаги, кг; C_p — удельная теплоёмкость воды при постоянном давлении (≈ 4200 Дж/кг·К при 20 °С), L_{eva} — скрытая теплота испарения (≈ 2450 кДж/кг при 20 °С).

Статистический анализ

Все эксперименты проводились с трехкратным повторением. Для экспертизы действительности различий между исследуемыми параметрами применялся дисперсионный анализ по методике ANOVA при уровне значимости $p < 0,05$. В программной среде Excel проводили статистический анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Энергетические показатели установки

Путем циклического пропускания через электродные узлы зерно доводилось до достижения кондиционной влажности. В соответствии с полученными осциллограммами тока и напряжения (Рисунок 2) определен приведенный расход тепла и эксергетический показатель сушки. В целом, значения $W_{уд}$ зависят от характеристик плазменного разряда.

Результаты экспериментальных исследований сушки с наложением ЭГД потока в соответствии с протоколом испытаний представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Показатели испытаний для поставленного эксперимента

Table 2

Test Parameters for the Experiment

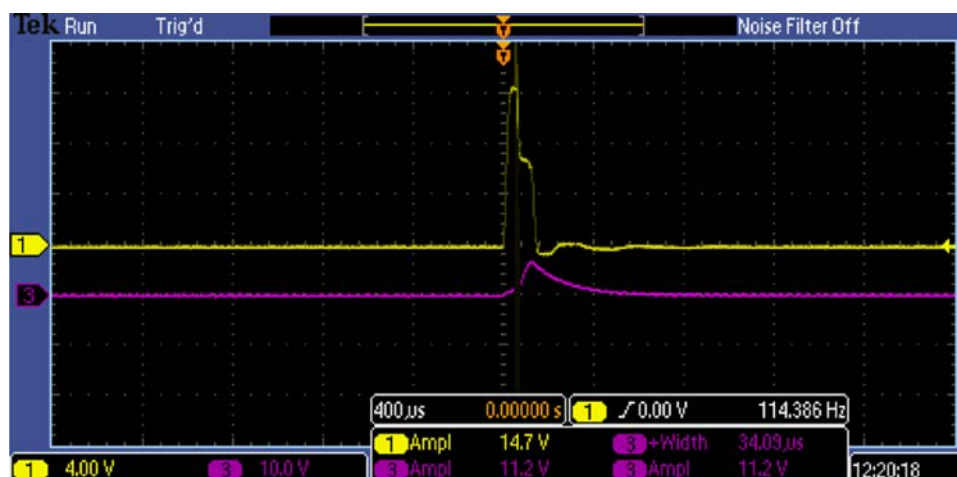
Показатели	испытания	
	Электрогидродинамический поток (ЭГД)	Сушильный агент
Производительность, кг/ч	50	50
Влажность материала, % до обработки среднее /стандартное отклонение, \pm %; после обработки среднее /стандартное отклонение, \pm %.	21,56 \pm 0,3 7,39 \pm 0,4	21,56 \pm 0,3 11,72 \pm 0,4
Температура материала до/после обработки, °С	21/35	21/30
Снижение влажности зерна за один цикл, %	0,28	0,2
Количество испаренной влаги, кг/ч	1,42	1,19
Приведенный расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг ($W_{уд}$)	1,85	2,57
Эксергетический показатель сушки, η_E	7,53	12,07

Рисунок 2

Осциллограмма тока (линия 3) и напряжения (линия 1) разряда ЭГД потока

Figure 2

Oscillogram of the Current (curve 3) and Voltage (curve 1) Waveforms of EHD Flow Discharge



ЭГД поток формируется благодаря электроактивированному сушильному агенту, который включает в себя смесь озона и воздуха, а также ионы. Данный электроактивированный сушильный агент пропускается через слой зерна, осуществляя процесс сушки. Также на семена одновременно действует электрическое поле. В данном эксперименте был применён режим дугового разряда с объемной плотностью около 10^{-2} Кл/м³.

Эффективность сушки с применением электрогидродинамического потока

На Рисунке 3 представлена кривая сушки и температуры нагрева зерна, согласно поставленного эксперимента. Стоит отметить, что наличие ЭГД потока способствует более длительному периоду постоянной скорости сушки, и как следствие более быстрому процессу сушки до достижения требуемой влажности. Наличие ЭГД потока при равных условиях эксперимента способствует более высокому значению температуры зерна, что говорит о наличии эффекта Джоулева тепла при прохождении электродных узлов.

В ходе экспериментов было выяснено, что при добавлении ЭГД потока к сушке зернового матери-

ала его влажность получилось снизить на 0,28% за один проход (до 6%). Начальное содержание влаги составляло 21,56%, после одного цикла сушки влажность снизилась до 21,28%. Для получения требуемого значения влажности зерна в 7% было произведено 50 циклов сушки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведённых экспериментов демонстрируют высокую эффективность применения электрогидродинамического (ЭГД) потока в процессах сушки зернового материала. Установлено, что при однократном прохождении материала через зону обработки снижение влажности составило в среднем 0,28 %, что подтверждает наличие активного массопереноса под воздействием попеременного коронного и искрового разрядов. Данное воздействие обуславливает формирование мелкочаеистой структуры на поверхности зерна, что, по-видимому, связано с эффектом плазменного микротравления, а также способствует внутреннему прогреву материала за счёт локализованного джоулева тепла.

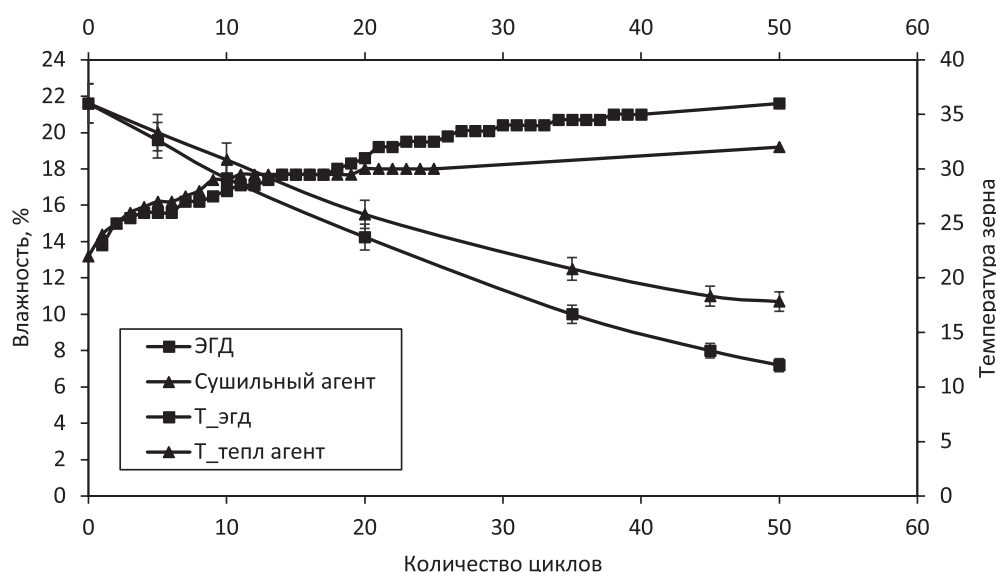
Суммарные удельные затраты энергии при использовании экспериментальной установки составили

Рисунок 3

Кривая сушки и температуры нагрева зернового материала в пилотной установке

Figure 3

The Curve of Drying and Heating Temperature of Grain Material in a Pilot Equipment



1,85 кВт·ч/кг испарённой влаги, что на 30 % ниже аналогичных показателей, характерных для традиционных методов сушки с применением теплового агента в сходных температурных условиях (Charle, 2020; Jiang, 2022; Paziuk, 2021). Это указывает на высокий уровень энергетической эффективности исследуемой технологии, что особенно важно в контексте задач импортозамещения и повышения технологической автономности агропромышленного сектора.

Сравнение с опубликованными данными показывает, что эффективность сушки с применением ЭГД-потока, реализованного в виде стабильного и равномерного воздействия, сопоставима, а в отдельных случаях превосходит результаты, полученные в ряде других исследований (Anukiruthika, 2021). Подобное преимущество может быть обусловлено конструктивными особенностями установки, включающей циклическое попеременное воздействие коронного и искрового разрядов, позволяющее объединить достоинства ионного массопереноса и объемного теплового воздействия.

Отдельного внимания заслуживает показатель приведённого теплового расхода, значение которого в рамках данного исследования оказалось ниже, чем в случае промышленных зерносушильных агрегатов (Павлов, 2018). Такое расхождение частично может объясняться эффектом масштабирования: в условиях лабораторно-промышленной установки обеспечивается более эффективное распределение ЭГД-потока и более точный контроль технологических параметров. При этом рассчитанный эксергетический показатель оказался сопоставим с аналогичными данными в работах Charle (2020) и Paziuk (2021), что подтверждает термодинамическую состоятельность предложенной технологии.

Ограничения исследования

Несмотря на положительные результаты, настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, испытания проводились в условиях пилотной установки ограниченной производительности, что может не в полной мере отражать характеристики технологии при её промышленном масштабировании. Во-вторых, в работе рассматривался только один тип зернового материала — фуражная пшеница, что ограничивает универсальность

полученных выводов. Кроме того, в исследовании не проводилась комплексная оценка микробиологических показателей и влияния обработки на последующее хранение продукта. Также не изучено влияние различных режимов чередования коронного и искрового разрядов на равномерность сушки и сохранность нутриентов. Эти аспекты требуют дальнейшего экспериментального изучения и включения в будущие циклы исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании представлены результаты экспериментального анализа процесса сушки зернового материала с использованием электрогидродинамического (ЭГД) потока, реализованного посредством попеременного воздействия коронного и искрового разрядов. Работа выполнена на пилотной установке непрерывного действия с целью определения кинетических характеристик сушки и оценки энергоэффективности технологии.

Проведенный сравнительный анализ с традиционным методом сушки, основанным на применении теплового агента при сопоставимых температурных и производственных условиях, продемонстрировал снижение удельного расхода тепла на единицу удалённой влаги на 30 % при использовании ЭГД-обработки. Достижение данного эффекта обусловлено синергетическим действием джоулева тепла и направленного ионного потока (ионного ветра), что обеспечило среднее снижение влажности зерна на 0,28 % за один проход через установку. Эти показатели сопоставимы с результатами, демонстрируемыми промышленными зерносушильными установками, функционирующими в аналогичном режиме.

Полученные данные подтверждают технологическую состоятельность и высокий потенциал использования ЭГД-сушки для энергосберегающей и щадящей обработки зерновых материалов. Сформированные на данной основе выводы актуализируют необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку каскадных модульных комплексов установок ЭГД-сушки, обеспечивающих масштабируемость и адаптацию технологии к промышленным условиям.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Емад Хуссеин Али Мунассар: проведение исследования; валидация результатов; написание черновика рукописи.

Иван Александрович Шорсткий: концептуализация; получение финансирования; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Андрей Геннадьевич Шерстюков: формальный анализ; визуализация.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Emad H.A. Munassar: investigation; validation; writing — original draft preparation.

Ivan A. Shorstkii: conceptualization; funding acquisition; writing — review & editing.

Andrey G. Sherstyukov: formal analysis; visualization.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Баскаков, И. В., Оробинский, В. И., Гиевский, А. М., Чернышов, А. В., & Чернова, О. В. (2023). Влияние процесса озонирования на качественные показатели зерна озимой пшеницы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 177–189. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.396>
- Baskakov, I.V., Orobinsky, V.I., Gievsky, A.M., Chernyshov, A.V., & Chernova, O.V. (2023). The Influence of the ozonation process on the quality indicators of winter wheat grain. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 177–189. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.396>
- Мунассар, Е. Х. А., & Шорсткий, И. А. (2024а). Сушка зернового материала с предварительной обработкой слаботочным плазменным каналом искрового разряда. *Техника и технология пищевых производств*, 54(1), 116–123. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>
- Mounasar, E.H.A., & Shorstkii, I.A. (2024a). Drying grain pretreated by low-voltage spark-discharge plasma channel. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(1), 116–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-1-2493>
- Мунассар, Е. Х. А., & Шорсткий, И. А. (2024б). Зерносушильная установка на базе электрогидродинамического потока. В *Передовые исследования Кубани: Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда* (с. 84–86). Краснодар: Кубанский научный фонд.
- Mounasar, E. Kh. A., & Shorstkii, I. A. (2024b). Grain drying unit based on electrohydrodynamic flow. In *Advanced research of Kuban: Proceedings of the Annual Reporting Conference of Grant Recipients of the Kuban Science Foundation* (pp. 84–86). Krasnodar: Kuban Science Foundation. (In Russ.).
- Павлов, С. А. (2018) Исследования сушки зерна в автоматизированном зерносушильном агрегате. *Сельскохозяйственные машины и технологии*, 12(4), 29–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34>
- Pavlov, S.A. (2018). Study of grain drying in the automated grain drying unit. *Agricultural Machinery and Technologies*, 12(4), 29–34. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-29-34>
- Шорсткий И. А., & Мунассар Е. Х. (2023). Влияние низкотемпературной атмосферной плазмы слаботочных высоковольтных разрядов на структуру поверхности и водопоглощающую способность зернового материала. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 85(2), 23–31. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-2-23-31>
- Shorstkii, I.A., & Mounassar, E.H. (2023). Effect of low current cold atmospheric plasma on grains surface structure and water absorption capacity. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 85(2), 23–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2023-2-23-31>
- Ali M. E. H., Sherstyukov A., & Shorstkii I. (2025). Application of cold filamentary microplasma pretreatment for wheat seeds drying. *Drying Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2472386>

- Anukiruthika, T., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Electrohydrodynamic drying of foods: Principle, applications, and prospects. *Journal of Food Engineering*, 295, 110449. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110449>
- Ayeni, K. I., Atanda, O. O., Krska, R., & Ezekiel, C. N. (2021). Present status and future perspectives of grain drying and storage practices as a means to reduce mycotoxin exposure in Nigeria. *Food Control*, 126, 108074. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108074>
- Baldanov, B. B., Ranzhurov, T. V., Sordonova, M. N., & Budazhapov, L. V. (2020). Changes in the properties and surface structure of grain seeds under the influence of a glow discharge at atmospheric pressure. *Plasma Physics Reports*, 46, 110–114. <https://doi.org/10.1134/S1063780X2001002X>
- Chaple, S., Sarangapani, C., Jones, J., Carey, E., Causeret, L., Genson, A., Duffy, B., & Bourke, P. (2020). Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and wheat flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102529>
- Charles, A. P. R., Jin, T. Z., Mu, R., & Wu, Y. (2021). Electrohydrodynamic processing of natural polymers for active food packaging: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 6027–6056. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12827>
- Ciprian Foronda, K. D., Gafaro Garcés, D. C., Restrepo Rendón, L., Mendoza Alvites, Y. Y., Ricardo Sagra, J. P., Orozco Mendoza, G. L., & Zarthia Sossa, J. W. (2022). Electrohydrodynamic drying in agribusiness: Literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 761297. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.761297>
- de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. *Scientific Reports*, 8(1), 14372. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9>
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018). Electrohydrodynamic drying of food: New insights from conjugate modeling. *Journal of Cleaner Production*, 198, 269–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.250>
- Defraeye, T., & Martynenko, A. (2018). Future perspectives for electrohydrodynamic drying of biomaterials. *Drying Technology*, 36(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1326130>
- Du, Y., Yang, F., Yu, H., Xie, Y., & Yao, W. (2022). Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4402–4421. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13027>
- Dubinov, A. E., Lazarenko, E. R., & Selemir, V. D. (2000). Effect of glow discharge air plasma on grain crops seed. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 180–183. <https://doi.org/10.1109/27.842898>
- Iranshahi, K., Onwude, D. I., Rubinetti, D., Martynenko, A., & Defraeye, T. (2022). Scalable electrohydrodynamic drying configuration for dehydrating biological materials at industrial scale. *Engineering Archive*, 30(2), 1–14. <https://doi.org/10.31224/2328>
- Jiang, H., Lin, Q., Shi, W., Yu, X., & Wang, S. (2022). Food preservation by cold plasma from dielectric barrier discharges in agri-food industries. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1015980. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1015980>
- Li, L., Jiang, J., Li, J., Shen, M., He, X., Shao, H., & Dong, Y. (2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep05859>
- Los, A., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2019). Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*, 16(4), 1–12. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); Recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>

- Ohta, T. (2016). Chapter 8 – Plasma in agriculture. In N. N. Misra, O. Schlüter, & P. J. Cullen (Eds.), *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 205–221). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00008-1>
- Paul, A., & Martynenko, A. (2021). Electrohydrodynamic drying: Effects on food quality. *Drying Technology*, 39(11), 1745–1761. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1906694>
- Paziuk, V., Vyshnevskiy, V., Tokarchuk, O., & Kupchuk, I. (2021). Substantiation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 14(63), 137–146. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2021.14.63.2.13>
- Randeniya, L. K., & de Groot, G. J. J. B. (2015). Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Processes and Polymers*, 12(7), 608–623. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500042>
- Scholtz, V., Šerá, B., Khun, J., Šerý, M., & Julák, J. (2019). Effects of nonthermal plasma on wheat grains and products. *Journal of Food Quality*, 7917825. <https://doi.org/10.1155/2019/7917825>
- Šerá, B., Scholtz, V., Jirešová, J., Khun, J., Julák, J., & Šerý, M. (2021). Effects of non-thermal plasma treatment on seed germination and early growth of leguminous plants – A review. *Plants*, 10(8), 1616. <https://doi.org/10.3390/plants10081616>
- Sharma, M., Kumar, A., & Guleria, C. (2023). Plasma agriculture: Pioneering sustainability through a revolutionary agricultural approach. *Indian Farming*, 73(10), 17–20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.02273>
- Šimek, M., & Homola, T. (2021). Plasma-assisted agriculture: history, presence, and prospects – A review. *The European Physical Journal D*, 75, 1–31. <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00206-4>
- Singh, A., Orsat, V., & Raghavan, V. (2012). A comprehensive review on electrohydrodynamic drying and high-voltage electric field in the context of food and bioprocessing. *Drying Technology*, 30(16), 1812–1820. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
- Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A., & Černák, M. (2015). Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4), 659–676. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>

Пробиотическая кормовая добавка с микробным бета-каротином: разработка и свойства

Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

В. В. Ядерец, Н. В. Карпова, Е. В. Глаголева, В. В. Джавахия

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Вера Владимировна Ядерец
E-mail: verayaderetz@yandex.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ядерец, В.В., Карпова, Н.В., Глаголева, Е.В., & Джавахия, В.В. (2025). Пробиотическая кормовая добавка с микробным бета-каротином: разработка и свойства. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 141-160. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.621>

ПОСТУПИЛА: 16.12.2024

ДОРАБОТАНА: 10.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Комбинированные кормовые добавки, сочетающие пробиотические микроорганизмы и β -каротин, обладают потенциалом для повышения эффективности питания и укрепления здоровья сельскохозяйственных животных. Однако такие средства отсутствуют среди зарегистрированных препаратов, а микробные источники β -каротина используются крайне ограниченно. Это обуславливает необходимость поиска новых биотехнологических решений в области кормопроизводства.

Цель: Разработка каротинсодержащей пробиотической кормовой добавки (КД) и оценка её безопасности и эффективности при включении в рационы бройлерных цыплят и свиней на откорме.

Материалы и методы: Экспериментальный образец КД включал спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* ВКМ В-3826D и *Bacillus licheniformis* ВКМ В-3825D (по 5×10^7 КОЕ/г каждого штамма) и инактивированную биомассу *Mycolicibacterium neoaurum* ВКМ Ас-3067D (не менее 250 мкг β -каротина/г). Токсикологическая оценка проводилась в соответствии с ГОСТ 32296-2013, класс токсичности определён по ГОСТ 12.1.007-76. Биологическую активность изучали на бройлерах и поросятах стандартными методами.

Результаты: Разработанная пробиотическая добавка отнесена к 4 классу опасности (малотоксичная). При добавлении КД в рацион бройлеров (1,0 кг/г) среднесуточный прирост массы увеличился на 4,3%, а содержание витамина А в печени – в 1,4 раза. У поросят прирост живой массы составил 6,7% по сравнению с контролем.

Выводы: Установлены безопасность и биологическая эффективность новой пробиотической кормовой добавки с микробным β -каротином. Каротинсодержащая пробиотическая добавка может быть рекомендована к использованию в специализированных и фермерских хозяйствах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пробиотическая кормовая добавка; β -каротин микробного происхождения; *Bacillus subtilis*; *Mycolicibacterium neoaurum*; токсикологическая оценка кормовой добавки; продуктивность животных

Probiotic Feed Additive with Microbial Beta-Carotene: Development and Properties

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

Vera V. Yaderets, Natalia V. Karpova, Elena V. Glagoleva,
Vakhtang V. Dzhavakhiya

CORRESPONDENCE:

Vera V. Yaderets

E-mail: verayaderetz@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Yaderets, V.V., Karpova, N.V., Glagoleva, E.V., & Dzhavakhiya, V.V. (2025). Probiotic feed additive with microbial beta-carotene: Development and properties. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 141-160. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.630>

RECEIVED: 16.12.2024

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Combined feed additives that incorporate probiotic microorganisms and β -carotene have the potential to enhance the nutritional efficiency and health status of farm animals. However, such formulations are not currently represented among registered feed products, and microbial sources of β -carotene are used only to a limited extent. This highlights the need for novel biotechnological solutions in feed production.

Purpose: To develop a carotene-containing probiotic feed additive (FA) and to evaluate its safety and effectiveness when included in the diets of broiler chickens and fattening pigs.

Materials and Methods: The experimental FA sample contained spore-forming bacteria *Bacillus subtilis* BKM B-3826D and *Bacillus licheniformis* BKM B-3825D (5×10^7 CFU/g of each strain), along with inactivated biomass of *Mycolicibacterium neoaurum* BKM Ac-3067D (containing at least 250 μg of β -carotene per gram). Toxicological evaluation was performed in accordance with GOST 32296-2013, and toxicity class was determined according to GOST 12.1.007-76. Biological activity was assessed using standard methods in broiler chickens and piglets.

Results: The developed probiotic feed additive was classified as hazard class 4 (low toxicity). When included in broiler diets at 1.0 kg/ton, it resulted in a 4.3% increase in average daily weight gain and a 1.4-fold increase in liver vitamin A content. In piglets, live weight gain increased by 6.7% compared to the control group.

Conclusion: The safety and biological effectiveness of the new carotene-containing probiotic feed additive with microbial β -carotene were confirmed. This additive may be recommended for use in specialized and small-scale farming operations.

KEYWORDS

probiotic feed additive; microbial β -carotene; *Bacillus subtilis*; *Mycolicibacterium neoaurum*; toxicological evaluation of the feed additive; animal productivity

ВВЕДЕНИЕ

Запрет на применение антибиотиков в качестве стимуляторов роста для сельскохозяйственных животных и птицы, введенный в 2006 г в Европейском союзе, стал важным шагом в решении проблемы развития устойчивости болезнетворных микроорганизмов (Jha et al., 2020). В 2016 г Генеральная Ассамблея ООН признала использование антибиотических препаратов в сельском хозяйстве одной из основных причин возникновения резистентности к антибиотикам у людей (Буяров, с соавт., 2020; Telhig et al., 2020; Маилян, 2021; Pandey et al., 2024). Однако, согласно ряду исследований, отказ от лекарственных препаратов данной группы привел к возникновению таких последствий, как снижение продуктивности и рост заболеваний желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), занимающих второе место по распространенности после вирусных (Jha et al., 2019; Jha et al., 2020). В связи с чем, в последнее время активно развиваются и внедряются в практику животноводства и птицеводства новые подходы к лечению и профилактики заболеваний ЖКТ, основанные на использовании пробиотиков (Grant et al., 2018).

Совместная рабочая группа Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (ФАО) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) определила пробиотики как «живые микроорганизмы, которые при употреблении в адекватных количествах приносят пользу для здоровья хозяина». В литературных данных можно также встретить термин «микробные кормовые добавки прямого внесения (Direct-fed microbials (DFM))» (Jha et al., 2020). Зачастую, пробиотики и DFM считаются синонимичными, или взаимозаменяемыми, и используются для обозначения полезных микроорганизмов, применяемых в кормлении сельскохозяйственных животных и птиц (Gadde et al., 2017; Lewton et al., 2022). Тем не менее, ряд исследователей разграничивают оба термина, определяя DFM как кормовые добавки, содержащие полезные микроорганизмы, дополняющие применение антибиотиков и используемые для восстановления функции кишечника благодаря стабилизации микрофлоры и повышения продуктивности животных и птицы, путем улучшения процессов переваривания и усвоения кормов (Jha et al., 2020; Ban et al. 2021; Ramirez-Garzon et al., 2024). DFM-продукты приобрели популярность благода-

ря антагонистической активности входящих в их состав микроорганизмов, основанной на секреции противомикробных соединений, конкурентной адгезии к слизистой оболочке и эпителию. Доказана роль кормовых пробиотических добавок в укреплении эпителиального барьера кишечника и модуляции иммунной системы (Grant et al., 2018; Ban et al. 2021; Khalid et al., 2021).

Микрофлора кишечника животных и птицы представляет собой сложную поликомпонентную экосистему (Azad et al, 2018). В связи с чем, в последние годы разрабатываются кормовые добавки на основе консорциума взаимодополняющих друг друга полезных бактерий с разным механизмом биологической активности, что обеспечивает более широкие возможности применения (Pluske et al. 2018). При выборе пробиотических микроорганизмов необходимо учитывать ряд функциональных, безопасных и технологических характеристик. Пробиотические бактерии должны удовлетворять следующим основным аспектам: являться непатогенными и нетоксичными, обладать антагонистической активностью по отношению к патогенным и условно-патогенным микроорганизмам, сохранять жизнеспособность как в ЖКТ, так и при хранении в чистом виде или в составе кормов в производственных условиях (Ma et al., 2018).

Благодаря способности образовывать эндоспоры, сохраняющие жизнеспособность в таких экстремальных условиях, как высокие и низкие температуры, радиация, не оптимальные значения pH и давление, наличие токсичных химических веществ, бактерии рода *Bacillus* являются перспективными микроорганизмами для разработки на их основе кормовых пробиотических добавок (Ruiz Sella et al., 2021). Согласно ряду данных литературы, пробиотики на основе бактерий р. *Bacillus* могут быть использованы для защиты от кишечных и дыхательных патогенов, устранения дисбактериоза при антибиотикотерапии и усиления переваривания и продвижения пищи (Bernardeau et al., 2017; Alagawany et al., 2018).

Другим фактором, оказывающим негативное влияние на обмен веществ и иммунный статус организма, является недостаток витаминов, а также их пониженное усвоение (мальабсорбция). Из литературных источников известно, что функции витамина А не ограничиваются его влиянием на развитие

зрительной системы животных (Иванова, 2019). Установлена его роль в поддержании нормального роста и дифференцировки клеток, развитии как врожденного, так и адаптивного иммунитета (Shastak et al., 2019). Показана положительная роль витамина А при адаптации организма к стрессовым условиям (Meléndez-Martínez et al, 2019).

Обзор зарегистрированных на российском рынке кормовых витаминных и пробиотических добавок показал доминирование иностранных производителей, особенно в отношении витаминных и провитаминных препаратов. Проведенный анализ данных литературы показал, что микробиологический синтез β-каротина является оправданным промышленным способом получения данного биологически активного соединения. В качестве перспективного продуцента β-каротина может быть рассмотрены непатогенные бактерии рода *Mycolicibacterium*, для которых установлена способность синтезировать β-каротин, а также ряд других пигментов. Была показана высокая эффективность кормовой добавки на основе биомассы *M. phlei*, включенной в кормление сельскохозяйственных животных и птицы¹. Кроме того, бактериальная биомасса может быть рассмотрена в качестве источника протеина, полноценного по аминокислотному составу.

Цель текущего исследования состояла в получении опытного образца пробиотической кормовой добавки (КД) и изучении ее безопасности и эффективности при включении в рацион целевых групп — цыплят-бройлеров и растущих откармливаемых свиней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

Опытный образец КД был получен в научно-исследовательской лаборатории биотехнологии промышленных микроорганизмов научно-производственного центра «Индустриальные биотехнологии» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)». КД содержит

спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* ВКМ В-3826D, *Bacillus licheniformis* ВКМ В-3825D, инактивированную биомассу *Mycolicibacterium neoaurum* ВКМ Ас-3067D. В 1 г кормовой добавки содержится не менее 5×10^7 КОЕ/г (колониеобразующих единиц/г) спорообразующих бактерий рода *Bacillus* (каждого штамма), не менее 250 мкг/г каротиноидов и не менее $21.5 \pm 1.6\%$ сырого протеина.

Оборудование

Для получения опытного образца КД использовали оборудование научно-исследовательской лаборатории биотехнологии промышленных микроорганизмов. Культивирование штаммов вели в биореакторах объемом 10 и 100 л. В устройства измерения параметров культуральной жидкости в процессе ферментации входили: термодатчик для измерения температуры, связанный с контроллером управления («Бук-3», Россия); pH датчик (InPro 3300/225/PT1000. Mettler Toledo, Швейцария) для измерения показателя pH, связанный через управляющий контроллер с перистальтическим насосом, подающим титрующий раствор; датчик измерения растворённого кислорода (InPro 6800/12/220. Mettler Toledo, Швейцария), связанный через управляющий контроллер с механическим перемешивающим устройством. Ферментеры оборудованы фильтрами тонкой очистки сжатого воздуха с диаметром пор 0.2 мкм.

Полученную после центрифугирования биомассу сушили на лиофильной сушилке (Martin Christ ALPHA 2-4LD plus, Германия). Для определения содержания β-каротина использовали спектрофотометр Thermo Spectronic (USA).

Штаммы

Пробиотические штаммы *B. subtilis* ВКМ В-3826D и *B. licheniformis* ВКМ В-3825D способны ингибировать рост патогенных бактерий *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*. *B. subtilis* ВКМ В-3826D обладает высокой амилолитической и целлюлолитической активностью. Для *B. licheniformis* ВКМ

¹ Дараселия, Г.Я. & Араселия, Г.Я. (1972). Получение мутантов *Mycobacterium phlei* активных по синтезу каротиноидов [дисс. кандидата биологических наук]. Всесоюзная ордена Ленина и ордена трудового красного знамени академия сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина.

В-3825D была определена высокая амилолитическая активность, целлюлозолитическая активность не выявлена. Оба штамма устойчивы к воздействию органических кислот, высоких температур и действию бацитрацина, вирджиномицина, доксициклина, колистина, тилозина, тетрациклина в терапевтических дозах. Определена их чувствительность к фуразолидону, амоксициллину, линкомицину (Yaderets et al., 2023).

Штамм *M. neoaurum* ВКМ Ас-3067D был получен путем УФ-мутагенеза и селекции из лабораторного штамма *M. neoaurum* ВКПМ Ас-1634. Инактивированную биомасса *M. neoaurum* использовали как источник β-каротина и полноценного по аминокислотному составу источника протеина (Yaderets et al., 2023).

Материалы

Сухое обезжиренное молоко (СОМ), гидролизат казеина (HiMedia Laboratories (Mumbai, India)), мочевины (NeoFroxx GmbH, (Einhausen, Germany)), лимонная кислота (ООО Компонент-реактив (г. Москва, Россия)), неорганические соли, глюкоза и органические растворители (гексан, ацетон) (Acros Organics (Geel, Belgium)), агар (Difco, (Detroit, Michigan, USA)), дрожжевой экстракт (Angel Yeast Co., Ltd., China) обезжиренная соевая мука (ООО Соянта, г. Иркутск, Россия), меласса (ООО Русагро, пос. Знаменка, Тамбовский район, Россия), кукурузный экстракт (ООО Амилко, г. Миллерово, Россия), мясопептонный агар (МПА) и среда Гаузе (ФБУН ГНУПМБ, г. Оболенск, Россия), среда БТН-агар (ООО «Биотехновация», г. Электрогорск, Россия.)

Получение КД

Состав сред и условия культивирования пробиотических штаммов

Сухую биомассу пробиотических штаммов получали путем их отдельного культивирования в ферментационной установке объемом 100 л с рабочим объемом не более 70 л. Выращивание посевного материала осуществляли в одну генерацию в колбах емкостью 1 л, используя жидкую вегетативную среду следующего состава (г/л): аминокислоты — 60.0 мл/л; гидролизат казеина — 5.0 г/л; соевый пептон — 1.0 г/л; дрожжевой экстракт — 1.0 г/л.

После засева колбы помещали на качалочную установку «Innova 44» при 220 об/мин (эксцентриситет 5 см) и 37 °С на 2 суток.

Приготовление и стерилизацию питательной среды для культивирования пробиотических штаммов в биореакторе осуществляли непосредственно в аппарате, используя среду следующего состава (г/л): меласса — 25.0; кукурузный экстракт — 12.5; дрожжевой экстракт — 1.0; MgSO₄—0.25; MnSO₄—0.03; CoCl₂—0.046; CaCl₂—1.0; лапрол — 1.0. pH — 6.8–7.0.

Засев ферментера с простерилизованной питательной средой, охлажденной до температуры (37 ± 1)°С производили посевным материалом, объем которого составлял 1 л. Посевной материал подавали в аппарат по посевной линии. Выращивание *B. subtilis* и *B. licheniformis* в ферментере вели в условиях, представленных в Таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры культивирования штамма *B. subtilis* и *B. licheniformis* в 100 л биореакторе

Table 1

Main Parameters of *B. subtilis* and *B. licheniformis* Strain Cultivation in a 100 L Bioreactor

Наименование параметра	Значение показателей
Температура	37 ± 0.1 °С
Аэрация	35–70 л/мин
pH	6.8–7.0
Перемешивание	450–600 об/мин
pO ₂	Концентрация растворенного кислорода поддерживается на уровне 50% от насыщения до окончания процесса
Продолжительность культивирования	24 ч
Контроль процесса	Каждые 4–6 ч отбирают пробу для контроля чистоты культуры, количества биомассы по сырому весу, содержанию редуцирующих сахаров.

Поддержание pH питательной среды в процессе культивирования на уровне 7.0–7.2 осуществляли автоматически путем внесения 20- % раствора

NaOH. При сильном вспенивании в аппарат подавали пеногаситель (3%-ая эмульсия Лапрола). Процесс считается законченным, если концентрация клеток в споровой форме составляет 93–95%. Основные параметры культуральной жидкости на момент окончания процесса ферментации представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Основные требования к культуральной жидкости *B. subtilis* и *B. licheniformis*

Table 2

Basic Requirements for the Culture Medium of *B. subtilis* и *B. licheniformis*

Наименование параметра	Значение показателей
Содержание в культуральной жидкости свободных от общего количества спор	Не менее 80 %
Оптическая плотность КЖ	20 ± 2 ОП (600 нм)
Посторонняя микрофлора	Не допускается
Значение pH	8.5 ± 0.2
Содержание редуцирующих веществ	(0.1 ± 0.05) %
Содержание жизнеспособных спор	(1.3 ± 0.2) × 10 ¹⁰ КОЕ/мл
Объем культуральной жидкости	10 ± 1 л.

После окончания процесса культуральную жидкость в биореакторе охлаждали путем подачи воды в рубашку аппарата до температуры 10–12°C и передавали на этап центрифугирования и лиофильную сушку. Получаемая сухая биомасса пробиотических штаммов имеет светло-бежевый цвет с характерным для микробиологических продуктов запахом, содержание влаги — не более 8.0%, количество жизнеспособных спор — не ниже (5 ± 1.0) × 10¹¹ КОЕ/мл. Полученную сухую биомассу пробиотических штаммов использовали для приготовления КД.

Состав сред и условия культивирования *M. neoaurum*

Сухую биомассу *M. neoaurum* получали путем последовательного культивирования в биореакторах объемом 10 и 100 л. Выращивание посевного материала осуществляли в 1 генерацию в колбах емкостью 1 л, используя жидкую вегетативную среду следующего состава (г/л): глицерин — 20.0, СОМ — 10.0, лимонная кислота — 2.2, мочевины — 1.0,

NH₄Cl — 1.0, KH₂PO₄—0.5, MgSO₄ 7H₂O — 0.5, FeSO₄ 7H₂O — 0.05, CaCO₃—1.5 (pH среды до стерилизации 6.8–7.2). Колбы с культурой помещали на качалочную установку «Innova 44» при 220 об/мин и температуре 35°C. Выращивание вели в течение 2 суток. Полученные колбы с посевным материалом в стерильных условиях объединяли в одну колбу объемом 2.0 л, снабженную нижним сливом. Объем посевного составлял 1.0 л. Перед засевом ферментационной установки, посевной материал микроскопировали (микроскоп Carl Zeiss Primo Star (Германия)) для контроля качества инокулята. В биореактор объемом 10 л посевной материал передавали по стерильной посевной линии.

Приготовление и стерилизацию питательной среды для культивирования в биореакторах осуществляли непосредственно в аппарате, используя среду следующего состава (г/л): глицерин — 25.5, сухое молоко — 12.8, лимонная кислота — 2.2, мочевины — 1.0, NH₄Cl — 1.0, KH₂PO₄—0.5, MgSO₄ 7H₂O — 0.5, FeSO₄ × 7H₂O — 0.05, CaCO₃—1.5 (pH среды до стерилизации 6.8–7.2).

Режим в биореакторе объемом 10 л перед посевом представлен в Таблице 3. Регулировку уровня рО₂ осуществляли путем изменения объема подачи воздуха на объем культуральной жидкости в ручном режиме с изменением количества оборотов перемешивающего устройства в автоматическом режиме. Продолжительность процесса культивирования *M. neoaurum* составляет 72 ч.

Таблица 3

Режим в ферментере объемом 10 л.

Table 3

Parameters in a 10-L Fermenter.

Наименование параметра	Значение показателя
Объем среды	7.0 л
Температура	(35 ± 1) °C
Аэрация	3.5–7.0 л/л/мин
Скорость перемешивания среды	250 об/мин
Значение рО ₂	50 % от насыщения
pH среды	6.8–7.2

После окончания ферментации, 3-суточную биомассу микалицебактерий по посевной линии пе-

редавали в биореактор объемом 100 л, рабочий объем — 70 л. Режим культивирования представлен в Таблице 4.

Таблица 4

Основные параметры культивирования штамма *M. neoaurum* в 100 л ферментере

Table 4

Main Parameters of *M. neoaurum* Strain Cultivation in a 100 L Bioreactor

Наименование параметра	Значение показателей
Температура	35°C
Аэрация	35–70 л/мин
pH	pH поддерживали на уровне 6.8–7.2, используя стерильный раствор HCl
Перемешивание	400–450 об/мин
pO ₂	Концентрация растворенного кислорода поддерживается на уровне 50 % от насыщения до окончания процесса.
Продолжительность культивирования	До 72–80 часов
Внесение подпитки	Глюкоза (2.5 г/л) через 24 ч и 48 ч роста

В случае нежелательного пенообразования изменяли скорость перемешивания среды или применяли пеногаситель. Выращенную на 3 сутки биомассу микроцебактерии инактивировали при температуре 80–85°C в течение 40 мин. Затем, биомассу сливали в приемник, центрифугировали на высокоскоростной центрифуге и сушили на лиофильной сушилке.

Определение острой и хронической токсичности

Изучение острой и хронической токсичности было проведено в ООО «Международный научно-исследовательский центр охраны здоровья человека, жи-

вотных и окружающей среды (ООО МНИЦ «ОЗОС»). Токсикологические свойства кормовой добавки в условиях острого эксперимента при её однократном внутрижелудочном введении лабораторным аутбредным мышам изучали в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 32296–2013.² Класс токсичности кормовой добавки в соответствии с СГС (согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции) был изучен на основе ГОСТ 12.1.007–76.³ В эксперименте по изучению острой пероральной токсичности были использованы белые аутбредные мыши самки массой 18.2–21.3 г в количестве 5 голов. Изучение острой пероральной токсичности на мышах проводили, используя начальную дозу 5000.0 мг/кг.² Для испытания данной дозы была сформирована опытная группа животных, состоящая из 5 мышей.

Для изучения хронической пероральной токсичности были использованы белые аутбредные мыши самки массой 18.2–21.9 г в количестве 60 голов. Дозы КД, вводимые опытным животным, составляли 1000.0 мг/кг (1/5 от LD₅₀) и 500.0 мг/кг (1/10 от LD₅₀). Животным контрольной группы внутрижелудочно вводили дистиллированную воду в объеме 0.1 мл/10 г массы животного. Продолжительность эксперимента составила 90 дней. В течение указанного времени проводили наблюдение за общим состоянием и поведением животных, возможной гибелью, а также проявлением симптомов интоксикации. Контроль массы тела животных опытных и контрольной групп проводили на 1-е, 10-е, 20-е, 30-е, 40-е, 50-е, 60-е, 70-е, 80-е и 90-е сутки.

На следующие сутки после последнего введения кормовой добавки (91 сутки опыта) половину животных из каждой группы ($n = 10$) подвергали эвтаназии и отбирали пробы крови (в пробирки с антикоагулянтом и без) для определения морфологических и биохимических показателей. Через 10 суток после последнего внутрижелудочного введения кормовой добавки (100 сутки опыта) подвергали эвтаназии вторую половину животных ($n = 10$) и отбирали пробы крови для оценки степени обратимости возможных токсических процессов после

² ГОСТ 32296–2013. Методы испытаний по воздействию химической продукции на организм человека. Основные требования к проведению испытаний по оценке острой токсичности при внутрижелудочном поступлении методом фиксированной дозы

³ ГОСТ 12.1.007–76 — Межгосударственный стандарт ГОСТ 12.1.007–76 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» (утв. постановлением Госстандарта СССР от 10 марта 1976 г. N 579)

многократного применения кормовой добавки. От каждой партии животных, состоящих из 10 особей, 5 мышей использовали для получения крови для общего клинического анализа, 5 мышей — для биохимического анализа.

После эвтаназии и отбора проб крови была проведена аутопсия экспериментальных животных. Макроскопическому исследованию подвергнуты: кожа с подкожной жировой клетчаткой, печень, легкие, почки, сердце, селезенка, желудок, толстый и тонкий отделы кишечника.

Функциональное состояние ЦНС оценивали визуально по наблюдению за двигательной активностью и реакцией на внешние раздражители.

В рамках оценки местнораздражающего действия кормовой добавки была проведена макроскопическая оценка органов желудочно-кишечного тракта мышей (желудок, тонкий и толстый отделы кишечника) при аутопсии через 1 и 10 суток после последнего введения кормовой добавки.

Этические аспекты

Все болезненные манипуляции с животными были проведены в соответствии с Директивой 2010/63/EU Европейского парламента и совета Европейского Союза от 22 сентября 2010 года по охране животных. Условия содержания животных и работы с ними соответствовали ГОСТ 33044–2014.⁴

Изучение эффективности КД, включенной в рацион цыплят-бройлеров

Исследования биологической активности кормовой добавки выполняли в отделе кормления ФНЦ «ВНИТИП» и в СГЦ «Загорское ЭПХ» в 2023 году. Научно-производственный опыт проводили на бройлерах кросса «Смена 9» с суточного до 35-дневного возраста. Цыплят содержали в клеточных батареях, по 30 голов в каждой группе. Кормление бройлеров осуществляли в две фазы (6–21 день — первый период и с 22 дня до конца выращивания — второй период). Химический состав кормов, помета, мышц,

содержание витаминов А и Е был определен в биохимической лаборатории ФНЦ «ВНИТИП» (Ядерец с соавт., 2024). Количество пробиотика составило 1.0 кг/т корма. К анализируемым показателям относились: сохранность поголовья (%); изменение живой масса цыплят; оценка расхода корма; убойный выход мяса, %; масса внутренних органов, г; содержание общего азота в кормах, помете, мышцах; содержание сырого жира в кормах, помете, мышцах; содержание сырой клетчатки в кормах, помете; содержание витаминов А, Е, В₂ в печени; переваримость сухого вещества корма, протеина, клетчатки, жира, использование азота, кальция, фосфора; химический состав ножных и грудных мышц.

Изучение эффективности КД, используемой в кормлении растущих откармливаемых поросят

Изучение возможности использования КД в кормлении растущих откармливаемых свиней проведено в Физиологические исследования проведены в виварии и лаборатории иммунобиологии и микробиологии ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. Академика Л.К. Эрнста». В работу были включены 12 голов помесных боровков (F-1:(дюрок × ландрас)) в период откорма с начальной живой массой 20–25 кг, приобретенных в ООО «ЭКО ФЕРМА «Климовская» Калужская обл., Боровский район, дер. Климовское. По принципу пар аналогов было сформировано 2 группы животных — опытная и контрольная — по 6 голов в каждой. Продолжительность исследования составила 30 суток. Количество вносимого пробиотика — 1.0 кг/т корма. К анализируемым параметрам относились: продуктивность растущих свиней; переваримость питательных веществ кормов рациона, баланс азота у растущих свиней; гематологические и биохимические показатели крови; показатели неспецифической резистентности; изменение микрофлоры кишечника растущих свиней.

⁴ ГОСТ 33044–2014 Принципы надлежащей лабораторной практики (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии №1700-ст от 20 ноября 2014 г)

Процедура исследования

Представленная работа состояла из четырех этапов. На первом был получен опытный образец КД, состоящий из двух пробиотических штаммов *B. subtilis* и *B. licheniformis* и инактивированной биомассы *M. neoaurum* ВКМ Ас–3067D. На втором этапе, согласно общепринятым методам, проведено токсикологическое исследование готовой формы опытного образца КД при внутрижелудочном введении. На третьем и четвертом этапах проведено изучение биологической эффективности КД в опытах на бройлерах кросса «Смена 9» с суточного до 35-дневного возраста и поместных боровках (F1: (дюрок×ландрас)) в период откорма соответственно.

Анализ данных

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica10. Уровень достоверности отличий между контролем и обработками ($p < 0.05$) определяли, используя t-тест для независимых переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получение опытного образца КД

Для получения опытного образца КД было проведено раздельное глубинное культивирование штаммов в ферментационной установке объемом 100 л с последующим концентрированием культуральных жидкостей, высушиванием полученных биомасс и их смешиванием. Основные характеристики полученной КД представлены в Таблице 5.

Оценка токсичности КД в эксперименте на мышах

Оценка острой токсичности КД

Согласно требованиям, выбранная экспериментальная доза 5000.0 мг/кг сначала была введена 1 животному (предварительное исследование). Так как признаки интоксикации у экспериментальной мыши отсутствовали в течение 4 часов после травмы, указанное количество было введено еще 4 животным (основное исследование). В результа-

Таблица 5

Основные характеристики готовой формы КД

Table 5

Main Characteristics of the Feed Additive

Наименование показателя	Характеристика и норма
Внешний вид, цвет, запах	Однородный мелкодисперсный порошок от бежевого до светло-оранжевого цвета
Запах	Запах специфический, свойственный микробиологическим продуктам, без постороннего, плесневелого и гнилостного
Массовая доля влаги, не более %	8.0
Количество жизнеспособных клеток <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , не менее	5×10^7 каждого штамма
Концентрация каротиноидов, не менее мг/кг	200.0
Содержание сырого протеина, %	18–25
Подлинность	При микрокопировании должен содержать штаммы <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i>
Микробиологическая чистота, наличие: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , Посторонних микроорганизмов, в т.ч. грибов, тыс.	Не допускается Не допускается Не допускается 300.0

те установлено, что внутрижелудочное введение КД в дозе 5000.0 мг/кг животным опытной группы не вызвало их гибели.

Общее состояние животных опытной группы было удовлетворительным. Признаков интоксикации у мышей не наблюдалось. Целостность и эластичность кожного и шерстного покрова были сохранены, окраска видимых слизистых оболочек соответствовала норме. Частота и глубина дыхательных

движений не изменены. Координация движений не нарушена, реакция на тактильные, болевые, звуковые и световые раздражители адекватна. Изменений в поведении не отмечено. На 14 сутки эксперимента мыши были подвергнуты эвтаназии и аутопсии, в результате которой патологоанатомические изменения выявлены не были.

В соответствии с полученными данными, было сделано заключение, согласно которому LD₅₀ исследуемой КД при внутрижелудочном введении превышает 5000.0 мг/кг, что, согласно ГОСТ 32296–2013, не позволяет классифицировать ее по СГС (Согласованная на глобальном уровне система классификации и маркировки химических веществ). В соответствии с ГОСТ 12.1.007–76 КД при внутрижелудочном введении была отнесена к 4 классу опасности (вещества малоопасные).

Оценка хронической токсичности КД

При изучении хронической токсичности в течение 90 дней введение КД в дозах 1000.0 мг/кг и 500.0 мг/кг не вызвало гибели опытных животных. Изменения в поведении не выявлены, аппетит и жажда не изменены, судороги не наблюдались; координация движений не нарушена; реакция на тактильные, болевые, звуковые и световые раздражители была адекватной; окраска видимых слизистых оболочек соответствовала норме; частота и глубина дыхательных движений не изменены; каловые массы темно-коричневого цвета, плотной консистенции, характерной овально-продолговатой формы со специфическим запахом.

Результаты взвешивания животных в течение хронического эксперимента представлены в Таблице 6.

Согласно полученным данным, было выявлено достоверное уменьшение массы тела животных опытных групп по сравнению с контролем.

Относительная масса органов является одним из показателей токсического действия кормовой добавки при её длительном применении. Результаты расчетов массовых коэффициентов органов после 90 суток внутрижелудочного введения кормовой добавки приведены в Таблице 7.

Среди изученных органов и тканей значимых различий между опытными группами и контрольными

Таблица 6

Динамика массы тела мышей в хроническом эксперименте, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 20$

Table 6

Dynamics of Body Weight of Mice in a Chronic Experiment, $X \pm \sigma$; $n = 20$

Сутки эксперимента	Контрольная группа	1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
1	20.3 ± 1.1	20.3 ± 1.0	20.3 ± 1.3
10	24.4 ± 2.4	24 ± 2.9	23.6 ± 1.7
20	27.7 ± 3.0	25.7 ± 3.1	24.9 ± 2.2*
30	29.7 ± 3.3	25.7 ± 2.5*	26.6 ± 4.0*
40	31.5 ± 3.1	27.1 ± 2.4*	27.6 ± 3.3*
50	31.7 ± 3.6	27.2 ± 4.3*	27.3 ± 2.3*
60	32.8 ± 3.8	28.4 ± 4.8*	28.6 ± 2.5*
70	34.4 ± 4.2	29.7 ± 4.3*	30.1 ± 2.6*
80	34.9 ± 4.9	30.3 ± 4.9*	31.2 ± 2.9*
90	35.7 ± 4.9	31.1 ± 5.0*	32.2 ± 2.8*

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

Таблица 7

Массовые коэффициенты органов мышей после 90 дней введения кормовой добавки, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 10$

Table 7

Relative Organ Weights in Mice Following 90-day supplementation, $X \pm \sigma$; $n = 10$

Органы	Контрольная группа	Доза кормовой добавки, мг/кг	
		1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
Печень	5.88 ± 0.11	5.85 ± 0.08	5.9 ± 0.09
Почки	1.34 ± 0.05	1.34 ± 0.04	1.37 ± 0.04
Селезенка	0.65 ± 0.09	0.67 ± 0.07	0.65 ± 0.08
Легкие	1.08 ± 0.03	1.09 ± 0.04	1.07 ± 0.02
Сердце	0.48 ± 0.01	0.48 ± 0.01	0.48 ± 0.01

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

ми аналогами не установлены, поэтому данные некропсии мышей представлены как средние для всех групп. Видимые слизистые оболочки у исследуемых животных были бледно-розовые, блестящие, гладкие. Деформации или отека конечностей не выявлено. Развитие наружных половых органов соответствовало физиологической норме. Результаты общего клинического анализа крови, проведенного на 91 и 100 сутки опыта, обобщены в Таблицах 8 и 9. Согласно полученным данным, после 90 дневного курса внутрижелудочных введений кормовой добавки у мышей опытных групп значимые отличия в морфологии крови по сравнению с контрольными аналогами выявлены не были.

Таблица 8

Морфологические показатели крови мышей после 90 суток введения кормовой добавки, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 5$

Table 8

Morphological Parameters of Mice Blood after 90 Days of Feed Additive Administration, $X \pm \sigma$; $n = 5$

Показатель	Контрольная группа	Дозы кормовой добавки, мг/кг	
		1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
Гематокрит, %	41.58 ± 4.95	42.1 ± 1.42	37.84 ± 11.3
Гемоглобин, г/л	135 ± 19.53	141 ± 6.4	134.6 ± 31.13
Эритроциты, $\times 10^{12}/л$	8.11 ± 1.09	8.36 ± 0.68	7.65 ± 2.29
Лейкоциты, $\times 10^9/л$	5.26 ± 4.59	13.38 ± 6.14	11.42 ± 7.62
Тромбоциты, $\times 10^9/л$	1267.6 ± 600.41	995 ± 496.55	777 ± 364.48
Лейкоцитарная формула			
Гранулоциты, %	39.22 ± 16.41	19.48 ± 20.79	17.06 ± 19.61
Моноциты, %	5.3 ± 5.78	12.26 ± 4.73	10.86 ± 6.29
Лимфоциты, %	55.48 ± 13.74	68.26 ± 17.67	72.08 ± 16.94

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

При статистической обработке результатов морфологических исследований крови животных через 10 суток после последнего введения кормовой добавки, у мышей опытных групп достоверные от-

личия результатов общего клинического анализа крови по сравнению с контрольными аналогами выявлены не были (Таблица 9).

Таблица 9

Морфологические показатели крови мышей через 10 дней после последнего введения кормовой добавки, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 5$

Table 9

Morphological Parameters of Mice Blood after 10 Days since the Last Administration of the Feed Additive, $X \pm \sigma$; $n = 5$

Показатель	Контрольная группа	Дозы кормовой добавки, мг/кг	
		1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
Гематокрит, %	43.22 ± 3.06	42.18 ± 1.2	42.38 ± 4.79
Гемоглобин, г/л	146.4 ± 10.33	145 ± 8.89	150.8 ± 15.14
Эритроциты, $\times 10^{12}/л$	7.77 ± 0.54	7.9 ± 0.32	7.59 ± 1.22
Лейкоциты, $\times 10^9/л$	9.36 ± 1.89	13.64 ± 4.67	13.82 ± 7.7
Тромбоциты, $\times 10^9/л$	766.6 ± 266.6	820.6 ± 340.46	1057.6 ± 323.22
Лейкоцитарная формула			
Гранулоциты, %	10.76 ± 2.32	16.86 ± 7.31	12.68 ± 3.35
Моноциты, %	12.24 ± 1.55	13.92 ± 3.67	11.78 ± 2.4
Лимфоциты, %	77 ± 3.86	69.22 ± 9.94	75.54 ± 3.14

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

При анализе полученных результатов было установлено, что исследуемые дозы кормовой добавки при ежедневном внутрижелудочном введении в течение 90 суток не вызвали статистически значимых отличий в показателях общего клинического анализа крови мышей.

Результаты биохимического анализа крови, проведенного на 91 и 100 сутки опыта, обобщены в таблицах 10 и 11. При статистической обработке результатов биохимических исследований сыворотки крови мышей на 1 сутки после 90 дневного внутрижелудочного введения кормовой добавки были выявлены ряд достоверных отличий между мышами из 1 и 2 опытных групп и контрольными особями

(Таблица 10). Указанные отклонения были связаны с более интенсивно протекающими обменными процессами на фоне применения КД.

Таблица 10

Биохимические показатели сыворотки крови мышей после 90 суток введения кормовой добавки, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 5$

Table 10

Biochemical Parameters of Blood Serum of Mice after 90 Days of Feed Additive Administration, $X \pm \sigma$; $n = 5$

Показатель	Контрольная группа	Дозы кормовой добавки, мг/кг	
		1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
Билирубин общий, мкмоль/л	5.16 ± 2.47	5.42 ± 1.79	5.04 ± 1.58
Билирубин прямой, мкмоль/л	1.46 ± 0.65	1.76 ± 0.75	1.56 ± 0.52
АСТ, Ед/л	264.8 ± 71.54	403.4 ± 144.72	455.8 ± 163.92
АЛТ, Ед/л	139 ± 37.74	186.8 ± 89.66	335 ± 204.73*
Мочевина, ммоль/л	4.72 ± 0.13	4.8 ± 0.47	5.56 ± 0.88*
Креатинин, мкмоль/л	46.2 ± 3.27	48.2 ± 2.17	55.4 ± 11.91
Общий белок, г/л	82.2 ± 11.69	81.6 ± 8.5	84.4 ± 9.24
ЩФ, Ед/л	41.4 ± 36.09	57 ± 23.12	70.4 ± 10.85
Глюкоза, ммоль/л	6.92 ± 0.5	8.54 ± 2.43	8.92 ± 0.81*

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

При проведении биохимического исследования крови через 10 суток после последнего введения кормовой добавки достоверные отличия мышей опытных групп от контрольных аналогов не были выявлены (Таблица 11).

На основании проведенных исследований было сделано заключение о безопасности разработанной КД. В соответствии с ГОСТ 12.1.007–76 КД при внутрижелудочном введении относится к 4 классу опасности (вещества малоопасные).

Таблица 11

Биохимические показатели сыворотки крови мышей через 10 дней после последнего введения кормовой добавки, $X_{cp} \pm \sigma$; $n = 5$

Table 11

Biochemical Parameters of Blood Serum of Mice after 10 Days since the Last Administration of the Feed Additive, $X \pm \sigma$; $n = 5$

Показатель	Контрольная группа	Дозы кормовой добавки, мг/кг	
		1 опытная группа (1000 мг/кг)	2 опытная группа (500 мг/кг)
Билирубин общий, мкмоль/л	5.26 ± 1.84	5.8 ± 1.46	6.42 ± 0.82
Билирубин прямой, мкмоль/л	1.56 ± 0.55	1.54 ± 0.43	1.94 ± 0.35
АСТ, Ед/л	657.6 ± 401.44	491.4 ± 160.97	404.2 ± 103.5
АЛТ, Ед/л	609 ± 497.76	226 ± 111.94	177.6 ± 123.1
Мочевина, ммоль/л	7.36 ± 0.76	7.06 ± 1.04	6.62 ± 1.09
Креатинин, мкмоль/л	51 ± 3.67	47.4 ± 6.88	49.8 ± 5.63
Общий белок, г/л	81.6 ± 7.44	77.4 ± 2.88	84.2 ± 8.38
ЩФ, Ед/л	59.4 ± 26.76	70.8 ± 13.44	56 ± 38.81
Глюкоза, ммоль/л	10.4 ± 1.97	7.92 ± 1.8	9.86 ± 1.18

Примечание. * $p \leq 0.05$

Note. * $p \leq 0.05$

Изучение эффективности КД, включенной в рацион цыплят-бройлеров

Результаты научно-производственного опыта по изучению эффективности КД представлены в Таблице 12.

Благодаря использованию КД, бройлеры отреагировали улучшением переваримости и использования питательных веществ корма. Что отразилось в увеличении живой массы бройлеров по сравнению с контрольной группой. Вследствие того, что препарат включали в комбикорма с первого дня выращивания птицы, в 7-дневном возрасте было отмечено увеличение ее живой массы в опытной группе — на 1.3%. В дальнейшем данная тенденция

Таблица 12

Показатели эффективности КД, включенной в рацион цыплят-бройлеров

Table 12

Efficiency Indicators of Feed Additive Included in the Diet of Broiler Chickens

Показатель	Группа	
	1 контрольная	2 опытная
Сохранность поголовья, %	100.0	100.0
Живая масса (г) в возрастах:		
суточном	41.8 ± 0.15	41.7 ± 0.16
7-дневном	207.60 ± 2.18	210.30 ± 2.60
% к контролю	100.0	101.3
21-дневном	986.3 ± 14.04	1009.2 ± 20.8
% к контролю	100.0	102.3
35-дневном (в среднем)	2074.9	2165.1
% к контролю	100.0	104.3
в т.ч. курочки	1931.0 ± 31.2	2018.6 ± 27.2*
% к контролю	100.0	104.5
петушки	2218.7 ± 32.4	2311.6 ± 31.3*
% к контролю	100.0	104.2
Среднесуточный прирост живой массы, г	58.1	60.7
Потребление корма на 1 голову за период выращивания, кг	3.437	3.393
% к контролю	100.0	98.7
Затраты корма на 1 кг прироста живой массы, кг	1.691	1.598
% к контролю	100.0	94.5

Примечание. * $p \leq 0.05$

Адаптировано из Ядерец с соавт. (2024).

Note. * $p \leq 0.05$

Adapted from Yaderetz et al. (2024a).

сохранилась. Так, в 21-дневном возрасте различия по данному показателю в пользу опытной группы составили 2.3%. К концу периода выращивания разница по средней живой массе бройлеров опытной группы достигла 4.3%, причем и по курочкам, и по петушкам разность была статистически достоверна. У 35-дневных курочек опытной группы она

превысила таковую на 4.5% ($p \leq 0.05$), у петушков — на 4.2% ($p \leq 0.05$). В результате среднесуточный прирост живой массы в опытной группе птицы оказался на 2.6 г выше. Отмечено сокращение затраты корма на 1 кг прироста живой массы в опытной группе на 5.5%, чем в контрольной группе.

Исследования мясных качеств бройлеров показали, что в опытной группе был выше убойный выход мяса на 0.6% и выход наиболее ценной части тушки — грудных мышц — на 0.6%. При анализе количества витаминов А, Е и В₂ в печени бройлеров отмечена тенденция к их более интенсивному накоплению в опытной группе, получавшей добавку пробиотика (Таблица 13).

Таблица 13

Содержание витаминов в печени бройлеров, мкг/г (Ядерец с соавт., 2024).

Table 13

Vitamin Content in Broiler Chickens Liver, mcg/g

Показатель	Группа	
	1 контрольная	2 опытная
Витамин А	177.23	255.36
Витамин Е	18.52	20.07
В ₂	10.10	10.96

Согласно данным, представленным в Таблице 13, наиболее значительные различия наблюдались по количеству витамина А в печени цыплят опытной группы — в 1.4 раза (на 78.13 мкг/г) по сравнению с контролем. Таким образом, может быть сделано заключение об эффективности КД при её включении в рацион цыплят-бройлеров.

Изучение эффективности КД, включенной в рацион поместных боровков в период откорма

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение изучаемой КД способствует интенсификации роста животных опытных групп (Таблица 14). Поросята, получавшие в составе комбикорма КД, поедали корм на уровне поросят контрольной группы, отклонений в количестве потребленного комбикорма зафиксировано не было. По результатам взвешивания в конце опыта наблюдалась тенденция к увеличению живой массы поросят опытных групп: среднесуточный прирост у животных в опытной группы за весь период был

выше на 6.7% ($p < 0.05$), по сравнению с аналогами из контрольной группы. На момент окончания исследования валовой прирост поросят опытной группы был больше на 17.4% ($p < 0.05$) соответственно по сравнению с показателями в контрольной группе.

Таблица 14

Динамика роста опытных поросят ($M \pm m, n = 6$)

Table 14

Growth Dynamics of Experimental Piglets ($M \pm m, n = 6$)

Показатель	Группа	
	контрольная	опытная
Дней опыта	Период – 30 суток	
Живая масса в начале опыта, кг	25.4 ± 0.7	25.1 ± 0.9
Живая масса в конце периода, кг	43.7 ± 1.24	46.6 ± 1.11*
Абсолютный прирост живой массы, кг	18.30 ± 2.0	21.5 ± 1.01*
Среднесуточный прирост, г	610 ± 60	717 ± 34*
Живая масса в % к контролю	100.0	106.7

Примечание. * $p \leq 0.05$

Адаптировано из Ядерец с соавт. (2024).

Note. * $p \leq 0.05$

Adapted from Yaderetz et al. (2024a).

Проведенные исследования показали, что включение в рацион подопытных боровков КД способствовало лучшему использованию и отложению азота, и, как следствие, более высоким приростам живой массы, а также использованию кальция и фосфора. Изучаемые показатели крови в целом находились в пределах референсных значений. Однако, наблюдалась тенденция к повышению содержания общего белка и в опытной группе относительно контроля. Отмечалось повышение содержания белковых фракций в сыворотке крови животных опытной группы относительно контрольных животных. Что может быть связано с более интенсивными обменными процессами у животных опытных групп (Ядерец с соавт, 2024).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среди факторов, обеспечивающих рост и развитие сельскохозяйственных животных и птицы, лидирующая роль принадлежит качеству кормов, состав которых должен обеспечивать необходимым количеством энергии и являться источником микро- и макронутриентов. Следствием введения ограничений на использование кормовых антибиотиков стало активное внедрение в системы кормления пробиотических препаратов, эффективность которых определяется такими факторами, как составом, направленностью селекции штаммов и технологией производства. Положительный эффект применения пробиотиков, включенных в рацион животных и птиц, отражается в поддержании у них нормального физиологического статуса и повышения продуктивности.

Анализ научных работ за последние десятилетия показывает, что к настоящему времени разработано достаточное количество пробиотических кормовых добавок, направленных на нормализацию процессов ЖКТ, улучшение перевариваемости кормов и общих экономических показателей. Значительные продвижения достигнуты в области изучения спектра пробиотической активности *B. subtilis* и *B. licheniformis*, что сделало указанные бактерии наиболее привлекательными при разработке препаратов ветеринарного назначения. Тем не менее, исследования по поиску и селекции высокоактивных штаммов с целью разработки пробиотических КД, чья активность сопоставима с действием антибиотических препаратов, продолжается. Особенно актуальны разработки добавок на основе консорциума полезных бактерий взаимодополняющих друг друга и исключающих их антагонизм, возможностью размножаться в кислой и щелочной среде, с продуцированием антибиотических и биологически активных веществ и обладать антибиотикорезистентностью. Последнее свойство особенно ценно, поскольку в сочетании с антибиотиками при комплексной терапии целого ряда заболеваний может позволить разработать принципиально новые схемы лечения. В связи с чем, в последние годы предлагаются поликомпонентные пробиотические препараты, включающие индигенные микроорганизмы с разным механизмом биологической активности и обогащенными белковой и витаминной составляющей, что обеспечивает более широкие возможности применения.

Разработанная в процессе реализации государственного задания КД содержит сухую биомассу пробиотических штаммов *B. subtilis* ВКМ В-3826D и *B. licheniformis* ВКМ В-3825D и инактивированную биомассу *M. neoaurum* ВКМ Ас-3067D в качестве источника β -каротина (Таблица 5). Благодаря способности входящих в состав КД пробиотических штаммов синтезировать ферменты, соединения с антибиотической активностью и другие биологически активные соединения, происходит активизация обменных процессов, следствием которых является улучшение перевариваемости корма, повышение сохранности поголовья и рост продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы.

Согласно реестру зарегистрированных в России кормовых добавок, в составе витаминных препаратов в качестве источника β -каротина, в большинстве случаев, используют или растительные экстракты, или субстанцию, полученную химическим или биотехнологическим способом. Анализ показал, что только в добавке «Панаферд-АХ» (ACS Dobfar S.p.A., Италия), рекомендованной для кормления лососёвых рыб, источником β -каротина являются инактивированные клетки бактерий *Paracoccus carotinifaciens*. Добавки на основе комбинации пробиотических штаммов и β -каротина в вышеуказанном списке отсутствуют.

Наиболее трудоемким этапом в разработке КД является изучение безопасности и биологической активности в опытах *in vivo*. Данный этап необходим для выявления или подтверждения отсутствия побочных эффектов и является обязательным при регистрации продукта в Россельхознадзоре. Безопасность КД изучалась путем изучения острой и хронической токсичности на белых аутбредных мышцах. В результате проведенного исследования установлено, что введении КД в дозе 5000.0 мг/кг не привело к гибели животных, не выявлено каких-либо признаков интоксикации или нарушений со стороны строения и функционирования внутренних органов.

При дальнейшем изучении безопасности КД в хроническом эксперименте также не было выявлено выраженного токсического действия на организм опытных мышей. Не были выявлены изменения функционирования пищеварительной и мочевыделительной системы. К концу эксперимента (см. таблица 6), зафиксировано достоверное уменьшение

массы тела животных опытных групп по сравнению с контролем. Однако, статистически достоверных отличий в значении величины относительной массы органов (Таблица 7), что является одним из показателей токсического действия кормовой добавки при ее длительном применении, не установлено. Достоверных различий между морфологическими показателями образцов крови опытных групп (Таблица 9) относительно контрольных животных не зарегистрированы. Биохимическая оценка сыворотки крови показала, что различия между группами по содержанию билирубина, мочевины, общего белка, АСТ, креатинина, общего белка и щелочной фосфатазы) не являются значимыми. Общая тенденция увеличения уровня АСТ и АЛТ, а также концентрации глюкозы в организме опытных животных при сравнении с контролем может свидетельствовать о значительной интенсификации обменных процессов вследствие приема КД в дозировке, значительно превышающей рекомендованную. Проведенные патоморфологические исследования подтвердили отсутствие токсического воздействия на органы и ткани подопытных мышей, видимых изменений макроскопической структуры не наблюдалось, состояние органов как подопытных, так и контрольных крыс соответствовали нормам.

Основываясь на данных, полученных в процессе исследования острой и хронической токсичности, можно утверждать, что среднетелетальная доза LD_{50} кормовой добавки превышает 5000.0 мг/кг. В связи с чем, по степени воздействия на организм полученная КД относится к малоопасным веществам (IV класс опасности по ГОСТ⁵).

Эффективности выращивания цыплят-бройлеров можно оценивать по двум основным параметрам: среднесуточный прирост живой массы и затраты корма на 1 кг ее прироста. Изучение эффективности КД, включенной в рацион цыплят-бройлеров кросса «Смена 9» было проведено в условиях СГЦ «Загорское ЭПХ». Согласно результатам научно-производственного опыта (таблица 12), к концу 35-дневного периода выращивания разница по средней живой массе бройлеров опытной группы достигла 4.3%, причем и по курочкам, и по петушкам разность была статистически достоверна. Отмечено снижение затрат потребления корма на 5.5%. Полученные значения результатов исследований совпадают с имеющимися данными литературы, аналогичны-

ми по используемым компонентам (Злепкин с соавт.; Овчарова с соавт.). Так, например, Злепкиным В.А. с соавторами было исследовано влияние совместного применения бета-каротинсодержащего препарата с пробиотиками на основе *B. subtilis* и *B. licheniformis* (препараты “Субтилис Ж”, “Бацелл-М”, “Целлобактерин-Т”) на переваримость и использование питательных веществ рационов цыплят-бройлеров кроссе “Росс-308”. В результате установлено улучшение поедаемости кормов, отмечено увеличение коэффициента переваримости сухого вещества в рационе цыплят, улучшение усвояемости азота, кальция, фосфора. Отмечено сокращение расхода корма до 3.85%. (Злепкин с соавт., 2020). Однако, при сравнении итогов опытов следует принять во внимание возможные различия по продуктивности между используемыми в исследованиях кроссами цыплят.

Изучение возможности применения КД в кормлении растущих откармливаемых свиней было проведено в условиях вивария ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. Академика Л.К. Эрнста». Согласно данным литературы, о степени удовлетворения потребности животных в энергии, питательных, минеральных и биологически активных веществах, количественной и качественной оценке кормовых рационов у подопытных поросят судят по динамике живой массы и величине ее прироста. На начало опыта, средняя живая масса опытных и контрольных животных была практически одинаковой — 25.1 и 25.4 кг соответственно (Таблица 14). К концу опыта (через 30 суток) средняя живая масса поросят, получавших пробиотическую кормовую добавку составила 46.6 ± 1.11 , что на 2.9 кг выше контроля (см. Таблицу 14). Анализ величины среднесуточного прироста живой массы подопытных животных оказался на 17.4% выше по сравнению с контролем. Анализ полученных данных демонстрирует, что включение в рационы растущего откармливаемого молодняка свиней КД способствует лучшему использованию питательных веществ корма, и, как следствие, более высоким приростам живой массы (Ядерец с соавт., 2024). Полученные в представленном исследовании результаты совпадают с имеющимися данными литературы (Морозова с соавт., 2021; Токарев с соавт., 2017). Так, например, Токаревым И.Н. с соавт. при введении в рацион пробиотика на основе двух штаммов *B. subtilis* 12В и *B. subtilis* 11В, вводимого в дозе 0.5, 1.0 и 1.5

кг/т корма, отмечено увеличение среднесуточных приростов на 1.2–12.6% при сравнении с контрольными группами. Животные опытных групп в конце эксперимента с высокой степенью достоверности ($p < 0,001$) превосходили по живой массе сверстников контрольной группы на 3,1–7,6%, что отразилось на интенсивности роста молодняка в период дорастивания, которая была выше контроля на 21,9–54,8 г или 4,5–11,3%. (Токарев с соавт., 2017)

Очевидное улучшение прироста живой массы тела и эффективности конверсии корма в группах, получавших КД может быть связано с несколькими причинами. Согласно данным литературы, улучшение показателей продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы в результате введения КД на основе пробиотических штаммов связано с изменением метаболических процессов, выраженных в биосинтезе пищеварительных ферментов, противомикробных веществ и витаминов. Установлено, что пробиотические штаммы являются продуцентами ферментов, способствующих как перевариванию растительного корма, так и усвоению образующихся питательных веществ (Al-Seraih et al., 2022) Кроме того, известно, что пробиотические бактерии р. *Bacillus* оказывают положительное влияние на состояние ворсинок кишечника, следствием чего является увеличение площади всасывания питательных веществ и увеличение массы животных и птиц (Awad et al., 2009). Дополнительное содержание в КД β-каротина способствовало в 1.4 раза увеличению содержания витамина в печени бройлеров, что является ценным экономическим показателем и говорит о достаточном усвоении данного вещества из корма (Таблица 14).

Таким образом, отсутствие отклонений со стороны обмена веществ и состояния внутренних органов белых аутбредных мышей, включенных в исследование, подтвердили безопасность КД, состоящей из консорциума пробиотических штаммов — *B. subtilis* и *B. licheniformis* и β-каротина микробного происхождения. Результаты, полученные в процессе комплексного изучения эффективности КД на цыплятах-бройлерах и поросятах на откорме позволяют сделать вывод об эффективности КД и целесообразности ее включения в рационы сельскохозяйственных животных и птицы. Следует отметить важность проведения подобных исследований пробиотических препаратов в рамках формирования более глубоких знаний о взаимосвязи,

которая существует между пробиотическими микроорганизмами, структурой микробных сообществ и общего состояния здоровья сельскохозяйственных животных и птицы. Продемонстрирована перспективность внедрения микробной биомассы как источника провитаминов в рационы кормления.

Ограничения исследования

При изучении эффективности и безопасности кормовых добавок важно учитывать ряд факторов, которые могут повлиять на результаты и интерпретацию данных. Одним из ограничений является размер выборки животных, поскольку исследования на небольших группах могут привести к недостаточной статистической мощности проведенного эксперимента и невозможности сделать обобщающие выводы. В представленной работе число животных во всех экспериментах соответствовало общепринятым методикам, что позволило сформулировать заключение о биологической эффективности. Тем не менее, следовало бы повторить исследования для получения более точных данных и подтверждения полученных первоначальных выводов.

Важно также учитывать возможное влияние кормового рациона на результаты эксперимента. Поскольку введение КД осуществлялось на фоне приема полноценных кормов, представляется перспективным изучение эффективности добавки в условиях ограниченного поступления питательных веществ, в первую очередь витамина А. Не следует также исключать влияние на полученные результаты внешних факторов, связанных с содержанием животных и птиц, контроль которых в реальных условиях чрезвычайно затруднен.

Для более точной оценки эффективности разработанной КД необходимо провести ее апробацию в условиях реальных хозяйств. Это позволит оценить влияние таких факторов, как условия содержания, рацион и видовые особенности животных и птиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение острой и хронической токсичности на лабораторных животных продемонстрировали безопасность разработанной КД, содержащей спо-

рообразующие бактерии *B. subtilis* ВКМ В-3826D, *B. licheniformis* ВКМ В-3825D и инактивированную биомассу *M. neoaurum* ВКМ Ас-3067D.

Результаты производственных опытов, полученные при изучении биологической эффективности КД на цыплятах-бройлерах и поросятах на откорме, позволяют сделать вывод о ее эффективности при введении в рацион животных и птицы. Увеличение средней живой массы бройлеров опытной группы составляло 4.3%, отмечено снижение затрат потребления корма на 5.5%. Среднесуточный прирост живой массы поросят на откорме был на 17.4% выше по сравнению с контролем. К концу опыта средняя живая масса поросят, получавших пробиотическую кормовую добавку составила 46.6 ± 1.11 , что на 2.9 кг выше контроля. В связи с чем, могут быть сформулированы рекомендации специализированным и фермерским хозяйствам по включению разработанной КД в системы кормления сельскохозяйственных животных и птицы. Полученные результаты также свидетельствуют о перспективности производства КД и ее востребованности среди производителей безопасной агропродукции. В дальнейшем научные исследования будут направлены на изучение эффективности КД и определение ее влияния на обменные процессы, иммунный статус, продуктивные показатели молодняка крупного рогатого скота в разные возрастные периоды. Также планируется изучить варианты скармливания КД в других дозировках.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Вера Владимировна Ядерец: формулирование идеи исследования; осуществление научно-исследовательского процесса; проверка воспроизводимости результатов экспериментов; визуализация; создание и редактирование рукописи.

Наталья Викторовна Карпова: проведение исследований; создание черновика рукописи; методология; применение статистических методов для анализа данных.

Елена Викторовна Глаголева: контроль; научное руководство; курирование данных; проведение исследования.

Вахтанг Витальевич Джавахия: административное управление планированием и проведением исследований, контроль; научное руководство; получение финансовой поддержки исследовательского проекта.

Natalia V. Karpova: investigation; writing — original draft preparation; methodology; formal analysis

Elena V. Glagoleva: supervision; data curation; investigation

Vakhtang V. Dzhavakhiya: project administration; supervision; funding acquisition

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vera V. Yaderets: conceptualization; investigation; validation; writing-review & editing

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Буяров, В. С., Червонова, И. В., Меднова, В. В., & Ильичева, И. Н. (2020). Эффективность применения фитобиотиков в птицеводстве (обзор). *Вестник аграрной науки*, 3(84), 44–59. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.3.44>
- Buyarov, V.S., Chervonova, I.V., Mednova, V.V., & Ilyicheva, I.N. (2020). Efficiency of application of phytobiotics in poultry farming (Review). *Bulletin of Agrarian science*, 3(84), 44–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2020.3.44>
- Злепкин В. А., Злепкин Д. А., Рудаков А. В., & Злепкина Н. А. (2020). Влияние бета-каротинсодержащего препарата совместно с пробиотиками на переваримость и использование питательных веществ рационов цыплятами-бройлерами. *Птицеводство*, (7–8), 34–38. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2020-69-7-8-34-38>
- Zlepkin V. A., Zlepkin D. A., Rudakov A.V., & Zlepkina N. A. (2020). The effects of the combined supplementation of diets for broilers with a beta-carotene preparation and different probiotics on the digestibility and assimilation of dietary nutrients. *Ptitsevodstvo*, (7–8), 34–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2020-69-7-8-34-38>
- Иванова, Н. В., & Раджабов, Р. Г. (2019). Ресурсосберегающие технологии в свиноводстве. *Вестник Донского государственного аграрного университета*, (3–1), 5–9
- Ivanova, N.V., & Radjabov, R.G. (2019). Resource-saving technologies in pig production. *Bulletin of Don State Agrarian University*, (3–1), 5–9. (In Russ.)
- Маилян, Э. С. (2021). Проблема использования антибиотиков в животноводстве и пути контроля микробной антибиотикорезистентности. *БИО*, 12(255), 4–16.
- Mailyan, E. S. (2021). The problem of the use of antibiotics in animal husbandry and ways to control microbial antibiotic resistance. *BIO*, 12(255), 4–16. (In Russ.)
- Морозова, Е. С., & Мурленков Н. В. (2021). Эффективность влияния биопрепаратов на основе бактерий рода *Bacillus* в технологии выращивания поросят-отъемышей. *Биология в сельском хозяйстве*, 1(30), 21–24.
- Morozova, E. S., & Tulenkov N. V. (2021). The effectiveness of biologics based on bacteria of the genus *Bacillus* in the technology of rearing weaned piglets. *Biology in agriculture*, 1(30), 21–24. (In Russia).
- Овчарова, А. Н. & Петраков Е. С. (2018). Физиологические показатели и продуктивность цыплят-бройлеров при использовании пробиотического препарата на основе бацилл. *Проблемы биологии продуктивных животных*, 1, 94–101. <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.1.94-101>
- Ovcharova, A. N. & Petrakov E. S. (2018). Physiological parameters and productivity of broiler chickens when using a probiotic preparation based on bacilli. *Problems of Biology of Productive Animals*, 1, 94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2018.1.94-101>

- Токарев, И. Н., & А. В. Блинецов. (2017) Влияние пробиотической добавки Ветоспорин на интенсивность роста, конверсию корма и гематологические показатели поросят-отъёмышей. *Российский электронный научный журнал*, 1(23), 23–31.
- Tokarev, I. N., & Kuznetsov, A.V. (2017) The effect of the probiotic supplement Vetosporin on the growth rate, feed conversion, and hematological parameters of weaned piglets. *Russian Electronic Scientific Journal*, 1(23), 23–31. (In Russia).
- Ядерец, В.В., Карпова, Н.В., Глаголева, Е.В., Джавахия, В.В., Карташов, М.И., Ленкова, Т.Н., & Егорова, Т.А. (2024а). Влияние каротинсодержащей пробиотической добавки на продуктивные показатели бройлеров. *Птицеводство*, 6, 19–24. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2024-73-6-19-24>
- Yaderetz, V.V., Karpova, N.V., Glagoleva, E.V., Dzhavakhiya, V.V., Kartashov, M.I., Lenkova, T.N., & Egorova, T.A. (2024а). The effect of a carotene containing probiotic feed additive on the productive performance in broilers. *Ptitsevodstvo*, 73(6), 19–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2024-73-6-19-24>
- Ядерец, В.В., Карпова, Н.В., Джавахия, В.В., Глаголева, Е.В., & Остренко, К.С. (2024б). Белково-каротиновая пробиотическая добавка в рационе свиней на откорме. *Свиноводство*, 7, 45–48. <https://doi.org/10/37925/0039-713X-2024-7-45-48>
- Yaderetz, V.V., Karpova, N.V., Dzhavakhiya, V.V., Glagoleva, E.V., & Ostrenko, K.S. (2024б). Investigation of the effectiveness of a carotene-containing probiotic supplement in feeding growing fattened pigs. *Pigbreeding*, 7, 45–48 (In Russ.) <https://doi.org/10/37925/0039-713X-2024-7-45-48>
- Ядерец, В.В., Карпова, Н.В., Глаголева, Е.В., Джавахия, В.В., & Остренко, К.С. (2024с). Влияние кормовой белково-каротиновой пробиотической добавки на гемато-биохимические показатели и кишечный биоценоз поросят на откорме. *Ветеринария*, 12, 44–48. <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2024.27.12.44-48>
- Yaderetz, V.V., Karpova, N.V., Glagoleva, E.V., Dzhavakhiya, V.V., & Ostrenko, K.S. (2024с). The influence of feed protein-carotene probiotic additive on hemato-biochemical parameters and intestinal biocenosis of fattening piglet. *Veterinary Medicine*, 12, 44–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2024.27.12.44-48>
- Alagawany, M., Abd El-Hack, M.E., Farag, M.R., Sachan, S., Karthik, K., & Dhama, K. (2018). The use of probiotics as eco-friendly alternatives for antibiotics in poultry nutrition. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 10611–8. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1687-x>
- Al-Seraih, A.A., Alsereah, B.A., Alwaely, W.A., Al-Hejaj, M.Y. (2022). Effect of *Bacillus subtilis* as a Probiotic on the productive and physiological performance of broilers. *Archives of Razi Institute*, 77(5), 1647–1653. <https://doi.org/10.22092/ARI.2022.357803.2100>
- Awad, W.A., Ghareeb., K., Abdel-Raheem, S., Bohm, J. (2009). Effects of dietary inclusion of probiotic and synbiotic on growth performance, organ weights, and intestinal histomorphology of broiler chickens. *Poultry Science*, 88(1), 49–56. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00244>
- Azad, M.A.K., Sarker, M., Li, T., & Yin, J. (2018). Probiotic species in the modulation of gut mmicrobiota: An overview. *BioMed Research International*, 8, 9478630. <https://doi.org/10.1155/2018/9478630>
- Ban, Y., & Guan, L.L. (2021). Implication and challenges of direct-fed microbial supplementation to improve ruminant production and health. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1), 109. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00630-x>
- Bernardeau, M., Lehtinen, M.J. Forssten, S.D., & Nurminen, P. (2017). Importance of the gastrointestinal life cycle of *Bacillus* for probiotic functionality. *Journal of Food Science and Technology*, 54(8), 2570–2584. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2688-3>
- Grant, A., Gay, C.G., & Lillehoj, H.S. (2018). *Bacillus spp.* as direct-fed microbial antibiotic alternatives to enhance growth, immunity, and gut health in poultry. *Avian Pathology*, 47(4), 339–351. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1464117>
- Jha, R., Foughse, J.M., Tiwari, U.P., Li, L., & Willing, B.P. (2019). Dietary fiber and intestinal health of monogastric animals. *Frontiers in Veterinary Science*, 6, 48. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00048>

- Jha, R., Das R, Oak, S., & Mishra, P. (2020). Probiotics (Direct-Fed Microbials) in poultry nutrition and their effects on nutrient utilization, growth and laying performance, and gut health: A systematic review. *Animals*, 10(10), 1863. <https://doi.org/10.3390/ani10101863>
- Gadde, U.D., Oh, S., Lee, Y., Davis, E., Zimmerman, N., Rehberger, T., & Lillehoj, H.S. (2017). Dietary *Bacillus subtilis*- based direct-fed microbials alleviate LPS-induced intestinal immunological stress and improve intestinal barrier gene expression in commercial broiler chickens. *Research in Veterinary Science*, 114, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.05.004>
- Grant, A., Gay, C.G., & Lillehoj, H.S. (2018) *Bacillus spp.* as direct-fed microbial antibiotic alternatives to enhance growth, immunity, and gut health in poultry. *Avian Pathology*, 47(4), 339–351. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1464117>
- Khalid, F., Khalid, A., Fu, Y., Hu, Q., Zheng, Y., Khan, S., & Wang, Z. (2021) Potential of *Bacillus velezensis* as a probiotic in animal feed: a review. *J Microbiol.*, 59(7), 627–633. <https://doi.org/10.1007/s12275-021-1161-1>
- Lewton, J.R., Woodward, A.D., Moser, R.L., Thelen, K.M., Moeser, A.J., Trottier, N.L., Tempelman, R.J., & Rozeboom, D.W. (2022). Effects of a multi-strain *Bacillus subtilis*-based direct-fed microbial on immunity markers and intestinal morphology in diets fed to weanling pigs. *Translational Animal Science*, 6(3), txac083. <https://doi.org/10.1093/tas/txac083>
- Ma, T., Suzuki, Y., & Guan, L.L. (2018). Dissect the mode of action of probiotics in affecting host-microbial interactions and immunity in food producing animals. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 205, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2018.10.004>
- Meléndez-Martínez, A. J. (2019) An Overview of carotenoids, apocarotenoids, and vitamin A in agro-food, nutrition, health, and disease. *Molecular Nutrition & Food Research*, 63, e1801045. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201801045>
- Pandey, S., Doo, H., Keum, G.B., Kim, E.S., Kwak, J., Ryu, S., Choi, Y., Kang, J., Kim, S., Lee, N.R., Oh, K.K., Lee, J.H., & Kim, H.B. (2024). Antibiotic resistance in livestock, environment and humans: One Health perspective. *Journal of Animal Science and Technology*, 66(2), 266–278. <https://doi.org/10.5187/jast.2023.e129>
- Pluske, J. R., Turpin, D.L., & Kim J.C. (2018). Gastrointestinal tract (gut) health in the young pig. *Animal Nutrition*, 4(2), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2017.12.004>
- Ramirez-Garzon, O., Barber, D., Meneses, L., & Soust, M. (2024) Effect of gestational direct-fed microbials supplementation on the metabolic profile in periparturient dairy cows. *Animals*, 14(20), 2928. <https://doi.org/10.3390/ani14202928>
- Ruiz Sella, S.R.B.R., Bueno, T., de Oliveira, A.A.B., Karp, S.G., & Soccol, C.R. (2021). *Bacillus subtilis natto* as a potential probiotic in animal nutrition. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41, 355–369. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1858019>
- Sarsour, A.H., Koltas, D.A., Kim, E.J., Persia, & M.E. (2022). Effects of a direct fed microbial (DFM) on broiler chickens exposed to acute and chronic cyclic heat stress in two consecutive experiments. *Poultry Science Journal.*, 101(4), 101705. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101705>
- Shastak, Y., & Pelletier, W. (2023). Review: Vitamin A supply in swine production: Current science and practical considerations. *Applied Animal Science*, 39(5), 289–305. <https://doi.org/10.15232/aas.2023-02409>
- Telhig, S., Ben Said, L., Zirah, S., Fliss, I., & Rebuffat, S. (2020). Bacteriocins to thwart bacterial resistance in gram negative bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 11, 586433. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.586433>
- Yaderets, V., Karpovam, N., Glagoleva, E., Shibaeva, A., & Dzhavakhiya, V. (2023). *Bacillus subtilis* RBT-7/32 and *Bacillus licheniformis* RBT-11/17 as new promising strains for use in probiotic feed additives. *Microorganisms*, 11(11), 2729. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112729>
- Yaderets, V., Karpova, N., Glagoleva, E., Shibaeva, A., & Dzhavakhiya, V. (2023). Enhanced β -Carotene production in *Mycolicibacterium neoaurum* Ac-501/22 by combining mutagenesis, strain selection, and subsequent fermentation optimization. *Fermentation*, 9(12), 1007. <https://doi.org/10.3390/fermentation9121007>

Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели

¹ Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация

² Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация

³ Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация

Д. Д. Вилкова¹, М. А. Белова^{1,2}, М. Н. Кутузов¹, О. В. Новиченко^{3,1}, К. В. Штер¹, И. А. Никитин^{2,1}

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Дарья Дмитриевна Вилкова

E-mail: dariavilkova333@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вилкова, Д. Д., Белова, М. А., Кутузов, М. Н., Новиченко, О. В., Штер, К. В., Никитин, И. А. (2025). Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 161-171. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.627>

ПОСТУПИЛА: 11.01.2025

ДОРАБОТАНА: 10.03.2025

ПРИНЯТА: 10.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Материалы подготовлены в рамках выполнения 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: Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) является одним из наиболее востребованных для потребителей видов пресноводной рыбы во всем мире. Филе радужной форели представляет большую пищевую и биологическую ценность. Однако свежая рыба является скоропортящимся продуктом с ограниченным сроком хранения. Обеспечение высокого качества и безопасности свежей рыбы является актуальной задачей для переработчиков и поставщиков. Среди методов неразрушающего контроля качества метод рамановской спектроскопии имеет потенциал использования для обеспечения качества и мониторинга безопасности пищевых продуктов. Несмотря на свою эффективность рамановская спектроскопия остается в значительной степени недостаточно исследованной для оценки свежести и сроков хранения рыбной продукции. Данная работа восполняет недостающие знания в этой области.

Цель: Изучить возможность применения метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели, а также определить ключевые спектральные характеристики, которые позволяют отслеживать изменения качества продукта в процессе хранения.

Материалы и методы: В качестве объекта исследования использовалось филе охлажденной радужной форели, которое хранилось при температуре $+2 \pm 2$ °C. Определение срока хранения, свежести и качества проводилось с использованием рамановского спектрометра серии Nanoscope NS100 с длиной волны возбуждения 785 нм и рабочим диапазоном $100-3200$ см⁻¹. Измерения проводились в течение 16 дней холодильного хранения.

Результаты: Результаты рамановского спектрального анализа показали различия в спектрах комбинационного рассеяния света в течении срока хранения, которые главным образом отражали степень окисления липидов. Наименьшая интенсивность наблюдалась для образцов свежей рыбы с 0 до 3 дня хранения, что позволяет дифференцировать эти образцы от других. В процессе анализа была выявлена флуоресценция образцов, которая создавала дополнительные шумы у спектров. Трехмерная математическая модель показала наибольший процент от общей дисперсии для охлажденной радужной форели (92%).

Выводы: Полученные результаты демонстрируют потенциал использования рамановской спектроскопии как основу для разработки методики экспресс-оценки и неразрушающего контроля качества и срока хранения рыбы. Данный метод будет иметь практическую значимость для органов контроля безопасности пищевой продукции и для потребителей. Для успешного применения метода необходима минимизация фонов флуоресценции, в том числе с использованием хемометрических методов, что позволит повысить точность прогностических моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

филе радужной форели; рамановская спектроскопия; свежесть рыбы; контроль качества пищевых продуктов; хранение в охлажденном виде; неразрушающий мониторинг; интерференция флуоресценции; хемометрические методы

The Potential of Raman Spectroscopy as a Rapid Method for Monitoring Shelf Life and Freshness of Refrigerated Rainbow Trout Fillet

¹ Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

³ Astrakhan State University name of V.N. Tatishchev, Astrakhan, Russian Federation

Daria D. Vilko¹, Maria A. Belova^{1,2}, Mikhail N. Kutuzov¹, Olga V. Novichenko^{3,1}, Konstantin V. Shter¹, Igor A. Nikitin^{2,1}

CORRESPONDENCE:

Daria D. Vilko

E-mail: dariavilkova333@gmail.com

FOR CITATIONS:

Vilkova, D.D., Belova, M.A., Kutuzov, M.N., Novichenko, O.V., Shter, K.V., & Nikitin, I.A. (2025). The potential of raman spectroscopy as a rapid method for monitoring shelf life and freshness of refrigerated rainbow trout fillet. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 161-171. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.627>

RECEIVED: 11.01.2025

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FOUNDING

The materials were prepared as part of the project "Development of Rapid Analytical Methods Based on Big Data from Spectral Analysis for Determining the Shelf Life and Safety of Fish Raw Materials," <https://rscf.ru/project/23-76-10038/>, funded by the Russian Science Foundation (grant No. 23-76-10038).



ABSTRACT

Background: Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) is among the most commercially important freshwater fish species worldwide. Rainbow trout fillets are recognized for their high nutritional value and beneficial biological properties. However, fresh fish is a highly perishable food with a limited shelf life. Ensuring consistent quality and safety of fresh fish products remains a critical challenge for processors and suppliers. Among non-destructive quality evaluation techniques, Raman spectroscopy emerges as a promising approach for quality and safety monitoring in the food industry. Despite its proven effectiveness, Raman spectroscopy remains significantly understudied for assessing freshness and shelf-life in fish products. This research gap was addressed by providing novel insights into the application of Raman spectroscopy for fish freshness monitoring.

Purpose: To investigate the potential of Raman spectroscopy for assessing the shelf life and freshness of refrigerated rainbow trout fillets, and to determine key spectral characteristics that enable monitoring of product quality changes during storage.

Materials and Methods: The study object was refrigerated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets stored at $+2 \pm 2$ °C. The shelf-life assessment, freshness evaluation and quality monitoring were performed using a Nanoscope NS100 series Raman spectrometer with 785 nm excitation wavelength and 100–3200 cm^{-1} spectral range. Measurements were conducted during 16 days of refrigerated storage.

Results: The Raman spectral analysis demonstrated distinct variations in the spectra of rainbow trout samples and corresponding to different storage durations, revealing lipid oxidation levels. The lowest intensity was observed in fresh samples stored for 0–3 days, enabling clear differentiation from other groups. Sample fluorescence was detected during the analysis, introducing additional noise to the spectra. The 3D mathematical model demonstrated the highest percentage of total variance (92 %) for chilled rainbow trout.

Conclusion: The obtained results demonstrate the potential of Raman spectroscopy as a rapid-assessment and non-destructive monitoring techniques for fish quality and shelf-life evaluation. This method holds practical significance for food safety regulatory authorities and consumers. Successful implementation of the technique requires minimization of fluorescence background interference, including the application of chemometric approaches, which would improve the accuracy of predictive models.

KEYWORDS

rainbow trout fillets; Raman spectroscopy; fish freshness; food quality control; refrigerated storage; non-destructive monitoring; fluorescence interference; chemometric tools

ВВЕДЕНИЕ

Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) стала одним из самых востребованных для потребителей видом пресноводной рыбы во всем мире. Филе радужной форели представляет особую пищевую и биологическую ценность, поскольку имеет в составе высококачественный белок, незаменимые аминокислоты, ненасыщенные жирные кислоты, витамины и минеральные вещества (Xu et al., 2022).

Свежая рыба относится к скоропортящимся продуктам с ограниченным сроком хранения. В связи с этим, обеспечение высокого качества и безопасности свежей рыбы остается актуальной задачей для переработчиков и поставщиков, поскольку эти показатели являются приоритетными для потребителей при выборе продукции. Во время хранения рыбы в течение постмортального периода происходят необратимые микробиологические и биохимические изменения, которые могут негативно влиять на её вкусовые качества и пищевую ценность. В рыбе содержится больше эндогенных ферментов и психротрофных микроорганизмов, чем в других продуктах животного происхождения. Кроме того, особенности строения мышечной ткани рыбы облегчают проникновение бактерий внутрь через рыхлую интерстициальную ткань (Wu et al., 2018). Всё это приводит к быстрому ухудшению качества свежей рыбы и сокращению сроков её хранения.

Снижение качества рыбы в свою очередь не только значительно уменьшает её экономическую и пищевую ценность, но и может серьёзно повлиять на здоровье людей (Yao et al., 2023). Даже при условии охлаждения продукции, которое способствует замедлению процессов порчи, поддержание свежести и безопасности рыбы остается непростой задачей. Это связано с воздействием на продукт внешних факторов, таких как колебания температуры, уровень влажности и доступ кислорода. Сроки хранения рыбы также зависят от географического происхождения, способа и сезона вылова, особенности разделки рыбы (потрошение рыбы и др.), обработки, способа упаковки (Kashani et al., 2023). Отслеживание всех этих параметров рыбы является важным аспектом для пищевой безопасности и защиты прав потребителей.

Для оценки свежести и сроков хранения рыбы традиционно используют сенсорные (Chytiri et

al., 2004), физико-химические (Poli et al., 2006), биохимические (Ocaño-Higuera et al., 2011) и микробиологические методы (Hernández et al., 2009). Однако в практике контроля качества существуют определённые проблемы, связанные с недостаточной точностью и оперативностью некоторых традиционных методов, которые требуют сложной подготовки образцов или деструктивны (Cheng et al., 2013; Hassoun et al., 2019; Hassoun & Karoui, 2017; Vilkova et al., 2021). Таким образом, возникает необходимость в более быстром, чувствительном и точном аналитическом инструменте, который мог бы дополнить или заменить традиционные методы.

Недавние достижения в области прикладной рамановской спектроскопии продемонстрировали потенциал данного метода в обеспечении качества и мониторинге безопасности пищевых продуктов (Sun et al., 2022). Этот метод, основанный на рассеянии света, позволяет получать уникальную информацию о качественном и количественном составе различных веществ. Благодаря высокой точности и чувствительности рамановской спектроскопии становится возможным отслеживать даже незначительные изменения в химическом составе рыбы, которые могут свидетельствовать о начале процессов порчи (Cheng et al., 2013). Важным преимуществом метода является его нечувствительность к влиянию воды, что позволяет с более высокой точностью анализировать продукты с высоким содержанием влаги (Sui et al., 2020).

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света ранее были выявлены несколько биомаркеров, которые могут служить показателями качества рыбы и других продуктов животного происхождения. К ним относятся содержание липидов, каротиноидов, определение степени окисления липидов и структуры белков (Velioğlu et al., 2015). Кроме того, метод рамановской спектроскопии применяется для идентификации и аутентификации различных видов рыб (Landry et al., 2020). Несмотря на имеющиеся зарубежные научные исследования, возможности рамановской спектроскопии для оценки качества и определения срока хранения рыбного сырья, в нашей стране остаются неизученными.

Целью данной статьи была оценка потенциала метода рамановской спектроскопии как эффективного и неразрушающего инструмента для быстрого

определения свежести и срока хранения охлажденного филе радужной форели. Для достижения цели была поставлена задача определить ключевые спектральные характеристики, которые позволят отслеживать изменения качества продукта в процессе хранения. Измерения проводились на охлажденном филе радужной форели и фиксировались в течение 16 дней хранения. Полученные спектры позволяют определить химические изменения, происходящие на молекулярном уровне в рыбе. Эти данные расширяют возможности применения спектроскопических методов для контроля качества пищевой продукции и способствует развитию безопасных и эффективных технологий мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве объекта исследования была выбрана радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*), выращенная в садковом хозяйстве на озере Ковжское, расположенном в Вытегорском районе Вологодской области. Для исследования было отобрано 16 особей двухлетнего возраста: 4 самца и 12 самок. После вылова в течение 4,5 часов рыбу доставили в лабораторию, засыпав предварительно льдом для сохранения свежести. Перед проведением эксперимента рыбу потрошили и промыли проточной водой. В течение 16 дней (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) форель хранилась в специальных ящиках со льдом при температуре $+2 \pm 2$ °C. Каждый день для анализа случайным образом отбирали одну потрошеную рыбу, которую затем обезглавливали и разделывали на филе.

Методы и инструменты

Перед началом исследования был проведен визуальный осмотр рыбы для выявления признаков порчи, заболеваний и повреждений. Затем проводили измерения массы и длины рыбы, а также была проведена оценка состояния её кожи, плавников и внешнего вида слизи. Все измерения проводились при температуре $+22 \pm 2$ °C и относительной влажности воздуха 50 ± 10 %.

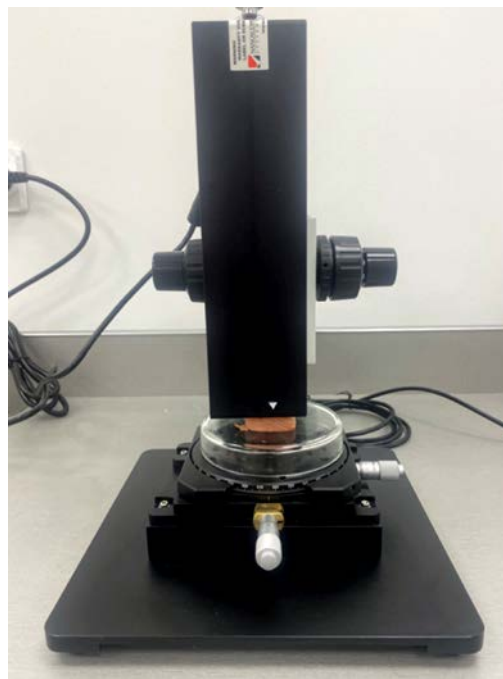
Для проведения спектральных измерений использовали рамановский спектрометр серии NS100

Рисунок 1

Рамановский спектрометр серии NS100 с образцом

Figure 1

Raman Spectrometer (NS100 Series) with a Sample



(NANOSCOPE Systems, Inc, Корея) с длиной волны возбуждения 785 нм с рабочим диапазоном $100\text{--}3200$ cm^{-1} и настольный держатель для модуля NS-Raman (модель NS Frame-D) (см. Рисунок 1).

Регистрация спектра образцов выполнялась в течение 5 секунд при усреднении по пяти измерениям. Каждый образец измеряли в трехкратной повторности. Используемая мощность лазера составляла 50–55 % от максимальной мощности (80 мВт), чтобы избежать повреждения образца. Предварительно перед каждым измерением проводили темновое сканирование без лазерного возбуждения, которое регистрировалось и использовалось в качестве фона.

Статистическая обработка данных

Спектры комбинационного рассеяния получали с помощью программного обеспечения NSRamanID. Полученные данные объединялись в общую таблицу Microsoft Office Excel 2019 для формирования датасета. Последующую работу с полученными данными проводили в программе The Unscramble X (V.10.4, Camo Software AS, Осло, Норвегия). Пе-

ред проведением анализа методом частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR) в диапазоне спектров $100\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ к исходным данным применялась предобработка — фильтр Савицкого-Голея. Полученный сигнал спектров корректировался путем применения сглаживающего фильтра — скользящей средней (Moving Average). Затем массив данных обрабатывался методом стандартной нормальной переменной (SNV).

Для выявления наиболее информативной области спектра к исходным данным применялся метод частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR). Математическое моделирование рамановских спектральных данных радужной форели было выполнено с помощью метода главных компонент (PCA) и факторного дискриминантного анализа (FDA).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка морфо-патологических показателей радужной форели

При вылове рыба проявляла все признаки здоровой особи: в воде занимала нормальное положение, активная, с нормальным движением жаберных крышек.

О безопасности в ветеринарно-санитарном отношении свежей рыбы можно утверждать на основании органолептических показателей и результатов ее вскрытия. Морфологические и патологические исследования рыбы проводились сразу после поступления в лабораторию. Результат визуального осмотра радужной форели показал, что анализируемые особи не имели видимых повреждений, признаков заболеваний и наружных паразитов. Жабры рыбы были красного цвета, прозрачные глаза без повреждений, запах, свойственный живой рыбе. У всех особей наблюдалась хорошо выраженная окоченелость мышц. Чешуя блестящая, плотно прилегает к телу, а слизь прозрачная, без примесей крови и постороннего запаха. Кожа упругая, без посторонних пятен, имела естественную окраску, плотно прилегала к тушке. Плавники цельные и естественной окраски. Глаза всех особей выпуклые, а роговая оболочка прозрачная. Брюшко рыбы не вздутое, анальное отверстие плотно закрыто, без истечения слизи.

Внутренние органы радужной форели хорошо выражены, естественной окраски и структуры, без наличия опухолей, кишечник не вздут, без гнилостного запаха.

Исследуемая форель имела длину в среднем $43,6\text{ см}$ при варьировании показателя от $41,0$ до $46,0\text{ см}$ (Рисунок 2). Средняя масса исследуемых экземпляров составила $950,6\text{ г}$ (от $837,5$ до $1086,0\text{ г}$; $n = 16$).

Рисунок 2
Внешний вид рыбы

Figure 2
Fish Morphology



Рамановские спектры

Были получены спектры 16 дней хранения радужной форели в спектральном диапазоне $100\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ (см. Рисунок 3). Высокий фон в необработанном рамановском спектре был обусловлен флуоресцентной интерференцией от биологической матрицы в рыбе. После шумоподавления и обработки спектров для снижения базовой линии наблюдались различные характерные пики: около $520, 629, 855, 1070, 1306, 1444, 1659, 2926\text{ см}^{-1}$ (Таблица 1). Данные пики можно отнести к молекулярному растяжению белков, жирных кислот и нуклеиновых кислот в мышцах рыбы.

Наиболее значимые области спектра, расположенные в диапазоне от 1000 см^{-1} до 1700 см^{-1} , а именно в диапазонах волновых чисел от $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, $1250\text{--}1350\text{ см}^{-1}$, $1400\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ и $1630\text{--}1700\text{ см}^{-1}$.

Таблица 1

Характеристика пиков рамановских спектров радужной форели

Table 1

The Assignment of Raman peaks of Rainbow Trout

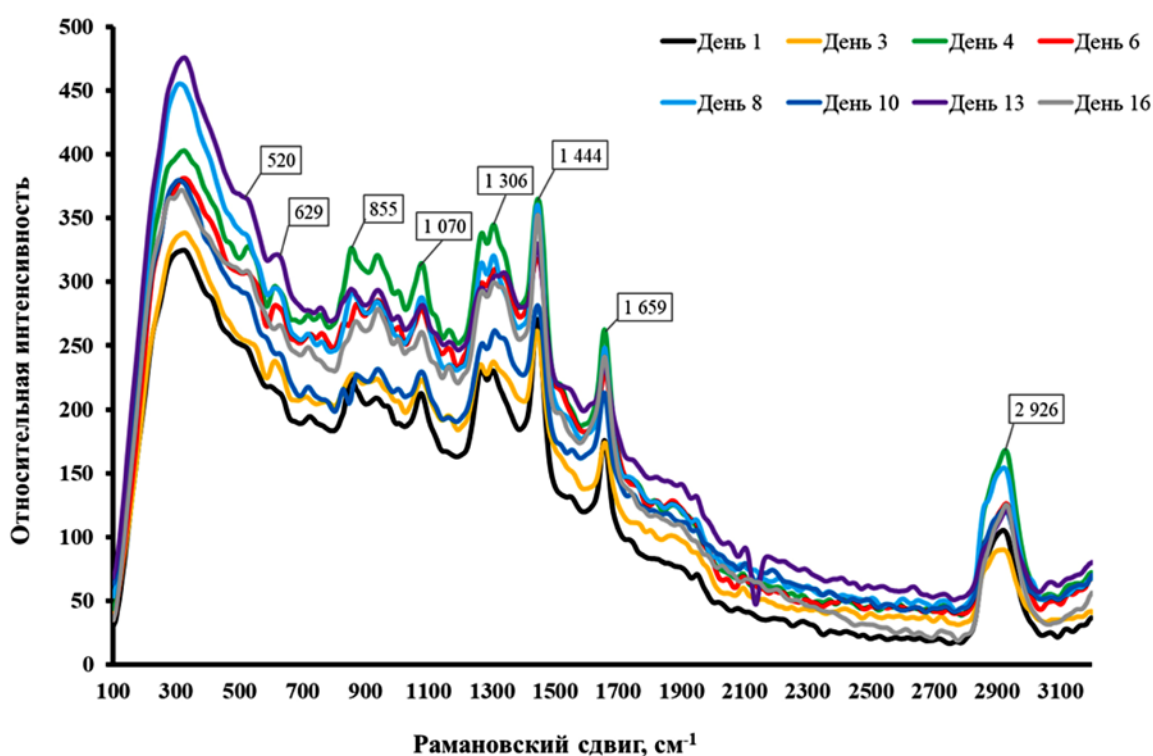
Рамановский сдвиг (см^{-1})	Характеристика пика
520	S-S дисульфидное растяжение в белке
629	Маркеры фенилаланина
855	Гликоген, колебаниями бензольного кольца тирозина и растяжение C-C связей кольца пролина
1070	Триптофан, растяжение C-C или C-O связей у фосфолипидов, растяжение C-C или PO_2 (нуклеиновых кислот)
1306	Жирные кислоты
1444	Деформация CH_2 -группы (колебания белков), маркер концентрации белка
1659	амидная группа I в белках, двойная связь C=C липидов в нормальных тканях
2926	Растяжение связей C-H

Рисунок 3

Рамановские спектры радужной форели

Figure 3

Raman Spectra of Rainbow Trout



Хемометрическая обработка данных

При анализе данных методом частичной регрессии наименьших квадратов по 7 факторам был построен график корреляционной нагрузки общего диапазона спектральных данных. По этому графику было выявлено, что нет значимой четкой области.

Для извлечения информации из спектральных наборов данных был применен метод главных компонент к спектрам, зарегистрированным на филе радужной форели. По компоненте 1 и 2 математическая модель была равна 78% в двумерной модели (2D) (Рисунок 4). При введении компоненты 3 трехмерная модель достигла 92% дифференциации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование продемонстрировало потенциал применения метода рамановской спектроскопии для оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели. Полученные образцы не имели внешних признаков заболеваний или механических повреждений, что подтверждает репрезентативность данных для дальнейшего анализа.

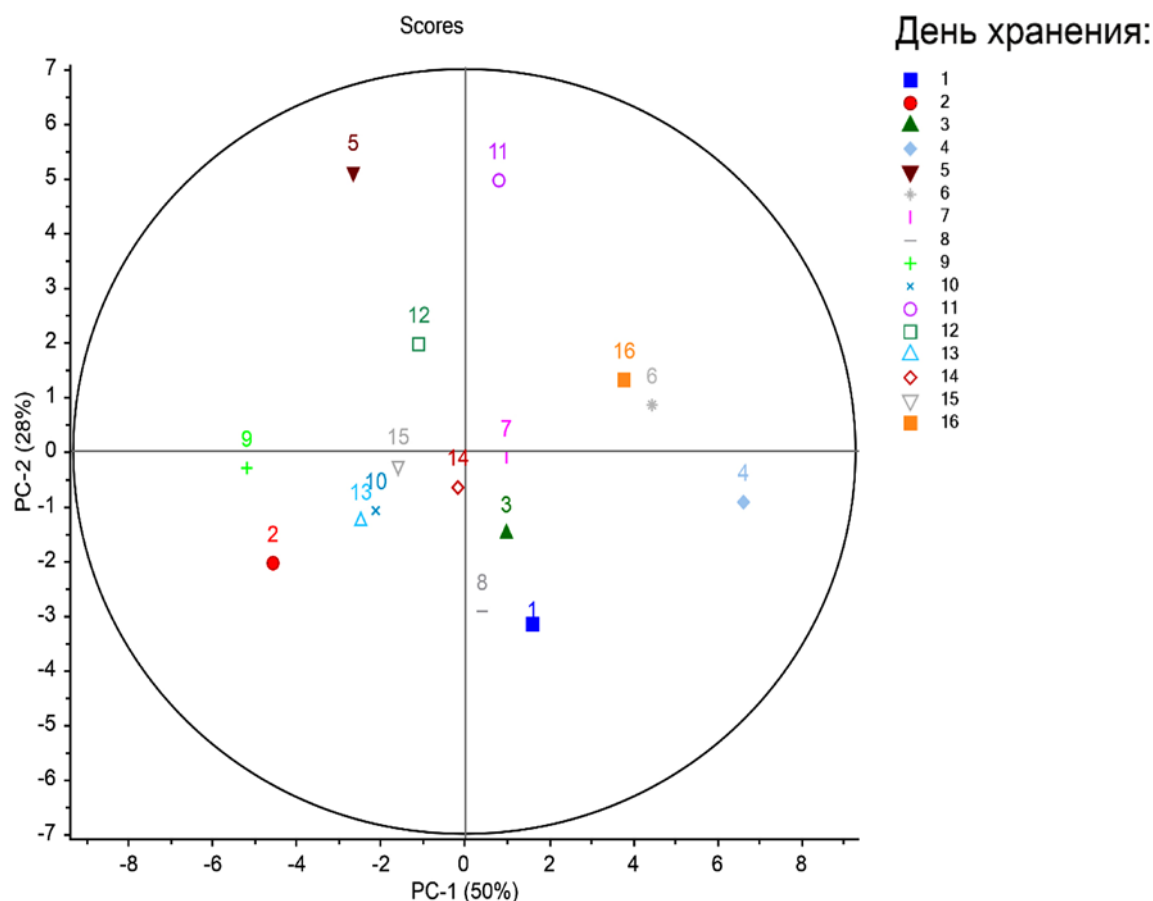
В спектрах филе радужной форели были выявлены характерные пики (около 520, 629, 855, 1070, 1306, 1444, 1659, 2926 см^{-1}), соответствующие различным колебательным режимам в молекулах струк-

Рисунок 4

2D модель анализа главных компонент рамановских спектров

Figure 4

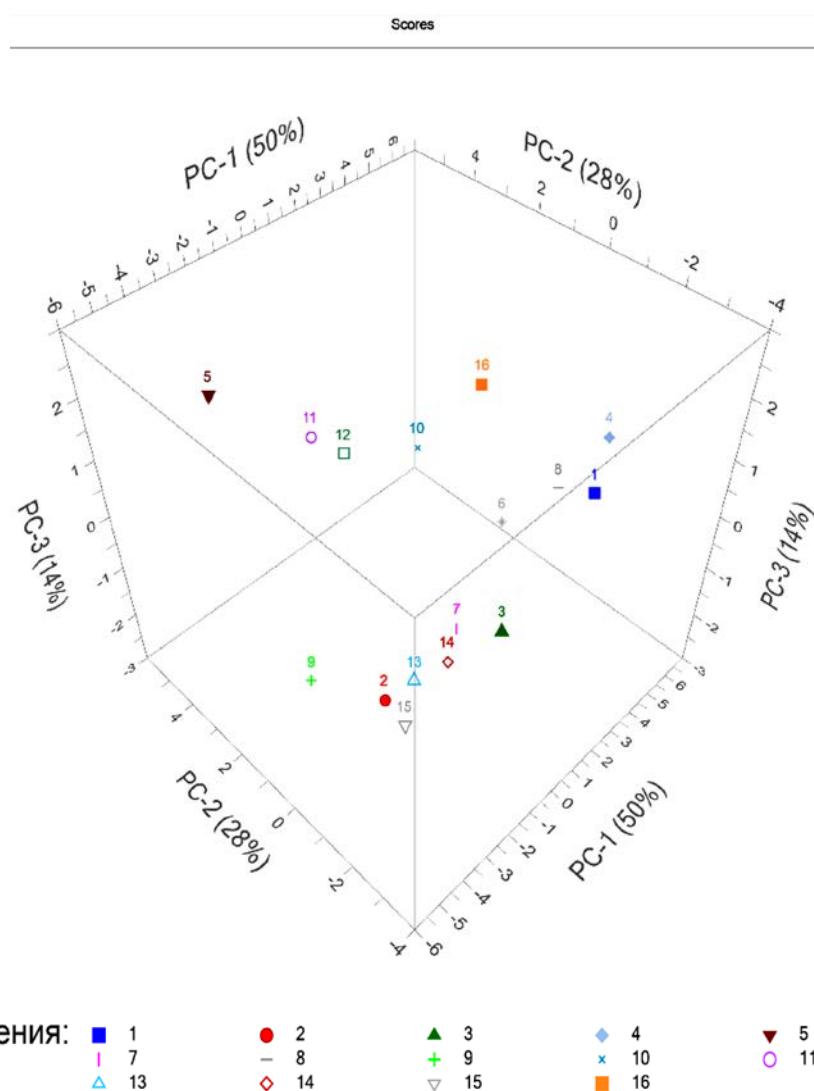
2D Model of Principal Components Analysis of Raman Spectra



турных компонентов образцов. Наиболее низкая интенсивность полученных спектров наблюдалась в период с 0 по 3 день хранения, что позволило четко дифференцировать свежие образцы от тех, которые хранились дольше. Поскольку свежая рыба содержит большее количество воды, а вода слабо рассеивает рамановский сигнал, тем самым его подавляя, то низкая интенсивность спектров объяснима. Выявленные спектральные характеристики совпадают с результатами, представленными ранее для свежих образцов различных видов рыб, таких как лосось, форель, тунец и минтай (Raskovic, 2016).

Обнаруженные спектральные полосы у филе форели связанные с амидом I ($1600-1700\text{ см}^{-1}$), амидом II ($1510-1560\text{ см}^{-1}$) и амидо III ($1230-1350\text{ см}^{-1}$), дают важную информацию об изменениях вторичной структуры белка. Амид I отражает изменения вторичной структуры белка: по мере хранения изменяется соотношение между α -спиралями, β -складчатыми листами и случайными катушками (Herrero, 2008). Увеличение интенсивности полос ароматических аминокислот: фенилаланина (1070 см^{-1}), тирозина (629 и 855 см^{-1}) и триптофана (730 см^{-1}), характерные до 13 дня хранения, подтверждает накопление свободных аминокислот и косвенно сви-

Рисунок 5
3D модель анализа главных компонент рамановских спектров
Figure 5
3D Model of Principal Components Analysis of Raman Spectra



детельствует о росте микробного числа (Sowoidnich et al., 2012). Кроме того, полученные данные свидетельствуют о разложении белков во время хранения рыбы, а также о их деградации.

Наряду с изменениями белковых структур наблюдались выраженные спектральные признаки окисления липидов, представленные пиками около 1262, 1306, 1444 и 1659 см^{-1} . Максимальная интенсивность этих пиков на 4 и 8 дни хранения подтверждает наличие процессов окисления жиров, что согласуется с литературными данными (Chen et al., 2019; Zhong et al., 2021). В этот период — на 4 и 8 дни хранения возможно первичное и вторичное окисление липидов рыбы, соответственно. Увеличение интенсивности флуоресценции в области растяжения C=C (1659 см^{-1}), начиная с 5 дня хранения, может быть связано с образованием сопряженных диенов и отражает усиление окислительных процессов в липидах (Zhong et al., 2021).

Отмечено возрастание интенсивности полосы S-S (520 см^{-1}), достигающее максимума на 12–13 дни хранения, что свидетельствует о процессах окисления аминокислотных остатков цистеина и метионина, типичных для хранения рыбы (Jaafreh et al., 2018). Поскольку данный пик не является типичным для рыбного сырья, то есть необходимость в точности определения его природы с помощью хроматографических методов и сопоставлении с референсными спектрами.

Анализ спектральных данных с применением методов многомерной статистики показал, что двумерная модель анализа главных компонент (РСА) объясняла 78% данных от общей дисперсии, что недостаточно для надежной дифференциации образцов. Введение третьей компоненты повысило объясненную дисперсию до 92%, обеспечив более четкую дифференциацию отдельных дней хранения (5, 9, 12 и 16 дни) (Рисунок 5). Несмотря на это, модель показала низкую эффективность в прогнозировании срока хранения ($R^2 = 0,74$; точность 0,12), что указывает на необходимость ее совершенствования с учетом гетерогенности филе по содержанию жира и мышечной ткани, а также из-за высокого уровня фонового шума спектров.

Дополнительный факторный дискриминантный анализ (FDA), примененный к пяти первым компонентам РСА, продемонстрировал ограниченную

эффективность с общим показателем правильной классификации 43,75%. Однако для некоторых дней (5, 9, 12, 16 дни) была достигнута 100% точность классификации. Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего улучшения модели, включая минимизацию спектрального шума и уточнение классификации по специфическим зонам филе.

Можно утверждать, что метод рамановской спектроскопии перспективен для экспресс-оценки качества и свежести охлажденной радужной форели, однако требует доработки и дополнительных исследований для повышения точности и практической применимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования была подтверждена перспективность применения метода рамановской спектроскопии для экспресс-оценки свежести и срока хранения филе охлажденной радужной форели. Установлено, что спектральный метод позволяет четко дифференцировать свежие образцы до 4 дня хранения благодаря наименьшей интенсивности спектров комбинационного рассеяния. Наиболее информативными оказались спектральные диапазоны от 1000 до 1700 см^{-1} , отражающие изменения вторичной и третичной структур белков, а также степень окисления липидов.

Однако из-за неоднородной структуры рыбного сырья, включающей области с различным содержанием мышечной и жировой ткани, рекомендуется проводить дальнейшие исследования с разделением филе по отдельным зонам (хвостовая, средняя, головная части, теша). Такой подход позволит повысить точность и информативность спектральных данных. Также выявлена необходимость минимизации фоновой флуоресценции, снижающей точность прогнозирования сроков хранения, что может быть решено с применением соответствующих хемометрических методов.

После решения указанных задач рамановская спектроскопия может быть успешно интегрирована в систему внутреннего контроля качества и свежести рыбного сырья на предприятиях переработки и у поставщиков.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Вилкова Дарья Дмитриевна: руководство исследованием; концептуализация; формулирование исследовательских целей и задач; проведение исследования; создание рукописи и ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи.

Белова Мария Алексеевна: формулирование исследовательских целей и задач; методология; проведение исследования; анализ и интерпретация полученных данных; создание черновика рукописи.

Кутузов Михаил Николаевич: отбор проб; пробоподготовка; формальный анализ; работа с программным обеспечением; визуализация; обработка и верификация данных; редактирование рукописи.

Новиченко Ольга Викторовна: формулирование исследовательских целей и задач; концептуализация; формальный анализ; редактирование рукописи.

Штер Константин Владимирович: отбор проб; пробоподготовка; методология; проведение исследования; обработка данных; редактирование графических изображений.

Никитин Игорь Алексеевич: концептуализация; администрирование данных; ресурсы; утверждение окончательного варианта статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Daria D. Vilкова: project administration; conceptualization; data curation; investigation; writing — review & editing.

Maria A. Belova: data curation; methodology; investigation; formal analysis; writing — original draft.

Mikhail N. Kutuzov: resources; formal analysis; software; visualization; validation; writing — review & editing.

Olga V. Novichenko: data curation; conceptualization; formal analysis; writing — review & editing.

Konstantin V. Shter: resources; methodology; investigation; data curation; visualization.

Igor A. Nikitin: conceptualization; project administration; resources

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Chen, Z., Wu, T., Xiang, C., Xu, X., & Tian, X. (2019). Rapid identification of rainbow trout adulteration in Atlantic salmon by Raman spectroscopy combined with machine learning. *Molecules*, 24(15), 2851. <https://doi.org/10.3390/molecules24152851>
- Cheng, J., Dai, Q., Sun, D., Zeng, X., Liu, D., & Pu, H. (2013). Applications of non-destructive spectroscopic techniques for fish quality and safety evaluation and inspection. *Trends in Food Science & Technology*, 34(1), 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.005>
- Chytiri, S., Chouliara, I., Savvaidis, I. N., & Kontominas, M. G. (2004). Microbiological, chemical and sensory assessment of iced whole and filleted aquacultured rainbow trout. *Food Microbiology*, 21(2), 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0740-0020\(03\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0740-0020(03)00059-5)
- Czamara, K., Majzner, K., Pacia, M.Z., Kochan, K., Kaczor, A., & Baranska, M. (2015). Raman spectroscopy of lipids: A review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 46(1), 4–20. <https://doi.org/10.1002/jrs.4607>
- Hassoun, A., & Karoui, R. (2017). Quality evaluation of fish and other seafood by traditional and nondestructive instrumental methods: Advantages and limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(9), 1976–1998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1047926>
- Hassoun, A., Sahar, A., Lakhel, L., & Ait-Kaddour, A. (2019). Fluorescence spectroscopy as a rapid and non-destructive method for monitoring quality and authenticity of fish and meat products: Impact of different preservation conditions. *LWT*, 103, 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.021>
- Hernández, M. D., López, M. B., Álvarez, A., Ferrandini, E., García, B. G., & Garrido, M. D. (2009). Sensory, physical, chemical and microbiological changes in aquacultured meagre (*Argyrosomus regius*) filets during ice storage. *Food Chemistry*, 114(1), 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.045>

- Herrero, A. (2008). Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: A review. *Food Chemistry*, 107, 1642–1651. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.014>
- Jaafreh, S., Breuch, R., Günther, K. et al. (2018). Rapid poultry spoilage evaluation using portable fiber-optic Raman spectrometer. *Food Analytical Methods*, 11, 2320–2328. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1223-0>
- Kashani Zadeh, H., Hardy, M., Sueker, M., Li, Y., Tzouchas, A., MacKinnon, N., Bearman, G., Haughey, S. A., Akhbardeh, A., Baek, I., Hwang, C., Qin, J., Tabb, A. M., Hellberg, R. S., Ismail, S., Reza, H., Vasefi, F., Kim, M., Tavakolian, K., & Elliott, C. T. (2023). Rapid assessment of fish freshness for multiple supply-chain nodes using multi-mode spectroscopy and fusion-based Artificial Intelligence. *Sensors*, 23(11), 5149. <https://doi.org/10.3390/s23115149>
- Landry, J.D., Torley, P.J., & Blanch, E.W. (2020). Detection of biomarkers relating to quality and differentiation of some commercially significant whole fish using spatially off-set Raman spectroscopy. *Molecules*, 25, 3776. <https://doi.org/10.3390/molecules25173776>
- Ocaño-Higuera, V. M., Maeda-Martínez, A. N., Marquez-Ríos, E., Canizales-Rodríguez, D. F., Castillo-Yáñez, F. J., Ruíz-Bustos, E., Graciano-Verdugo, A. Z., & Plascencia-Jatomea, M. (2011). Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods. *Food Chemistry*, 125(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.034>
- Poli, B. M., Messini, A., Parisi, G., Scappini, F., Vigiani, V., Giorgi, G., & Vincenzini, M. (2006). Sensory, physical, chemical and microbiological changes in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets packed under modified atmosphere/air or prepared from whole fish stored in ice. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(4), 444–454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01094.x>
- Raskovic, B., Heinke, R., Roesch, P., & Popp, J. (2016). The Potential of Raman Spectroscopy for the Classification of Fish Fillets. *Food Analytical Methods*, 9, 1301–1306. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0312-6>
- Rødbotten, M., Lea, P., & Øydis U. (2009). Quality of raw salmon fillet as a predictor of cooked salmon quality. *Food Quality and Preference*, 20, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2008.06.004>
- Sowoidnich, K., Schmidt, H., Kronfeldt, H., & Schwägele, F. (2012). A Portable 671 nm Raman Sensor System for Rapid Meat Spoilage Identification. *Vibrational Spectroscopy*, 62, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2012.04.002>
- Sui, Y., Zhang L., Lu, S., Yang, D., & Zhu, C. (2020). Research on the shrimp quality of different storage conditions based on Raman spectroscopy and prediction model. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 40, 5, 1607–1613. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2020\)05-1607-07](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1607-07)
- Sun, Y., Tang, H., Zou, X., Meng, G., & Wu, N. (2022). Raman spectroscopy for food quality assurance and safety monitoring: A review. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100910>
- Velioğlu, H., Temiz, T., & Boyacı, I. (2015). Differentiation of fresh and frozen-thawed fish samples using Raman spectroscopy coupled with chemometric analysis. *Food Chemistry*, 172, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.073>
- Vilkova, D., Chene, C., Kondratenko, E., & Karoui, R. (2021). A comprehensive review on the assessment of the quality and authenticity of the sturgeon species by different analytical techniques. *Food Control*, 133, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108648>
- Wu, L. & Pu, H., & Sun, D. (2018). Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.002>
- Xu, K., Yi, Y., Deng, J., Wang, Y., Zhao, B., Sun, Q., Gong, C., Yang, Z., Wan, H., He, R., Wu, X., Yao, B., Zhang, M., & Tang, Y. (2022). Evaluation of the freshness of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets by the NIR, E-nose and SPME-GC-MS. *RSC Advances*, 12(19), 11591–11603. <https://doi.org/10.1039/d2ra00038e>
- Yao, J., Yue, Z., Lin, H., Wang, L., Wang, K., & Li, J. (2023). Non-destructive monitoring the freshness of sea bass fillets using Raman spectroscopy with orthogonal signal correction and multivariate analysis. *Microchemical Journal*, 191, 108859. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108859>
- Zhong, N., Li, Y., Li, X., Guo, C., & Wu, T. (2021). Accurate prediction of salmon storage time using improved Raman spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 293, 110378. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110378>

Получение пищевых композиций на основе мышечной ткани шлемоносных бычков рода *Gymnocanthus*

¹ Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² ГНЦ ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), г. Владивосток, Российская Федерация

А.В. Югай¹, Т.Н. Слуцкая², Г.Н. Тимчишина², Т.Н. Данильчук¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Югай Алевтина Витальевна

E-mail: yugaia@mgupp.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Югай, А.В., Слуцкая, Т.Н., Тимчишина, Г.Н., & Данильчук, Т.Н. (2025). Получение пищевых композиций на основе мышечной ткани шлемоносных бычков рода *Gymnocanthus*. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 172-188. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.634>

ПОСТУПИЛА: 05.11.2024

ДОРАБОТАНА: 02.03.2025

ПРИНЯТА: 15.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Недостаток белка в рационе ухудшает здоровье и снижает работоспособность. Рыба, благодаря полноценному аминокислотному составу, является перспективным источником белка. Важным объектом прилова, практически не используемым в переработке, является дальневосточный шлемоносец (род *Gymnocanthus*, семейство *Cottidae*). Особенность шлемоносца – низкий выход мышечной ткани и значительное количество вторичного сырья. Эффективным решением может стать получение формованных продуктов с добавлением нутовой муки и рыбной эмульсии из вторичного сырья.

Цель: Разработать пищевые композиции на основе мышечной ткани и субпродуктов шлемоносных бычков рода *Gymnocanthus*.

Материалы и методы: Объектом исследования являлся дальневосточный шлемоносец (род *Gymnocanthus*, семейство *Cottidae*). Содержание белков, липидов, минеральных веществ и воды в исходном сырье и готовой продукции определяли стандартными аналитическими методами. Количество углеводов рассчитывали математически как разность между 100 % и суммарным процентным содержанием перечисленных компонентов. Эффективную вязкость измеряли на приборе «Реотест 2.1». Сбор и статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли с использованием программы Microsoft Excel. Относительную биологическую ценность рыбного паштета определяли методом биотестирования с использованием тест-культуры *Tetrahymina pyriformis*. Энергетическую ценность продукта рассчитывали по коэффициентам Рубнера. Органолептический анализ проводили с использованием пятибалльных шкал по таким показателям, как вкус, цвет, запах, консистенция и внешний вид; полученные результаты визуализировали в виде профилограмм.

Результаты: Установлено, что мышечная ткань дальневосточного шлемоносца содержит более 20 % белков, до 2,5 % липидов и до 2 % минеральных веществ. Разработан паштет на основе фарша шлемоносца с добавлением нутовой муки (5–7 %) и рыбной эмульсии, содержащей коллаген (15–20 %). Эффективная вязкость фарша преимущественно зависит от содержания нутовой муки, в меньшей степени – от рыбной эмульсии; совместное влияние компонентов незначительно. Биологическая ценность продукта, подтвержденная тест-культурой *Tetrahymina pyriformis*, высокая. Органолептический анализ выявил положительные потребительские характеристики продукта: насыщенный вкус, сочную консистенцию, приятный запах и привлекательный внешний вид. Энергетическая ценность паштета составила в среднем 195 ккал (816 кДж).

Выводы: Исследования подтвердили перспективность использования мышечной ткани дальневосточного шлемоносца как ценного белкового сырья с высокими реологическими свойствами. Полученные результаты обосновывают возможность создания продуктов питания с регулируемым химическим составом, высокой биологической ценностью и пониженной калорийностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

дальневосточный шлемоносец; бычки рода *Gymnocanthus*; паштет рыбный, эффективная вязкость рыбного фарша; рыбный коллаген; нутовая мука; рыбная эмульсия

Obtaining of Food Compositions Based on Muscle Tissue of Sculpin of the Genus *Gymnocanthus*

¹ Russian University of Biotechnology, Moscow, Russian Federation

² Pacific branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russian Federation

Alevtina V. Yugay¹, Tatyana N. Slutskaya², Galina N. Timchishina², Tatiana N. Danilchuk¹

CORRESPONDENCE:

Alevtina V. Yugay

E-mail: yugaiav@mgupp.ru

FOR CITATIONS:

Yugay, A.V., Slutskaya, T.N., Timchishina, G.N., & Danilchuk, T.N. (2025). Obtaining food compositions based on muscle tissue of sculpin of the Genus *Gymnocanthus*. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 172-188. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.634>

RECEIVED: 05.11.2024

REVISED: 02.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The deficiency of protein in the diet worsens health and reduces performance. Fish, due to its complete amino acid composition, is a promising source of protein. An important bycatch object, which is practically not used in processing, is the Far Eastern sculpin (genus *Gymnocanthus*, fam. *Cottidae*). The peculiarity of the sculpin is a low yield of muscle tissue and a significant amount of secondary raw materials. An effective solution can be the production of molded products with the addition of chickpea flour and fish emulsion from secondary raw materials.

Purpose: To develop food compositions based on muscle tissue and by-products of sculpin of the genus *Gymnocanthus*.

Materials and Methods: The object of the study was the Far Eastern sculpin (genus *Gymnocanthus*, fam. *Cottidae*). The content of proteins, lipids, minerals and water in the raw materials and finished products were determined by standard analytical methods. The amount of carbohydrates was calculated mathematically as the difference between 100% and the total percentage content of the listed components. Effective viscosity was measured using a Reotest 2.1 device. The collection and statistical processing of experimental data were performed using Microsoft Excel. The relative biological value of fish pate was determined by biotesting using the test culture *Tetrahymena pyriformis*. The energy value of the product was calculated using Rubner coefficients. Organoleptic analysis was carried out using five-point scales for such indicators as taste, color, smell, consistency and appearance; the results were visualized on profilograms.

Results: It was found that the muscle tissue of the Far Eastern sculpin contains more than 20% proteins, up to 2.5% lipids and up to 2% minerals. A pate was developed based on fish mince with the addition of chickpea flour (5–7%) and fish emulsion containing collagen (15–20%). The effective viscosity of the fish mince depends mainly on the content of chickpea flour, and to a lesser extent on the fish emulsion; the combined effect of the components is insignificant. The biological value of the product, confirmed by the test culture of *Tetrahymena pyriformis*, is high. Organoleptic analysis revealed positive consumer characteristics of the product: rich taste, juicy consistency, pleasant smell and attractive appearance. The energy value of the pate was on average 195 kcal (816 kJ).

Conclusion: Investigation confirmed the prospects of using the muscle tissue of the Far Eastern sculpin as a valuable protein raw material with high rheological properties. The results obtained substantiate the possibility of creating food products with a controlled chemical composition, high biological value and reduced caloric content.

KEYWORDS

Far Eastern sculpin of the genus *Gymnocanthus*; fish pate, effective viscosity of fish mince; fish collagen; chickpea flour; fish emulsion

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам экспертов, к 2025 году рыбные продукты займут ведущие позиции среди основных источников белка в мировом масштабе¹. В России общий вылов водных биологических ресурсов на начало 2024 года составил 4,8 млн тонн, что немногим меньше уровня 2023 г (5,3 млн тонн)². В контексте роста объёмов добычи гидробионтов особую актуальность приобретает рациональное освоение прилова, включающего непромысловые виды рыб, что соответствует целям Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса РФ до 2030 года, направленной на внедрение инновационных и безотходных технологий переработки водных биоресурсов. Значительную часть прилова составляют бычки семейства Cottidae, представленное 14 видами в Баренцевом море (Чаус, 2024) и более чем 36 видами в заливе Петра Великого (Панченко, 2004). Одним из перспективных объектов для создания пищевых продуктов является дальневосточный шлемоносец рода *Gymnocanthus*.

Проблема рационального использования водных биоресурсов (Макоедов и соавт., 2023) обусловлена высокой нагрузкой на промысловые запасы большинства видов гидробионтов, истощением ресурсного потенциала Мирового океана, при этом стабильно растёт спрос на рыбу и рыбную продукцию в мировом масштабе, согласно прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) (Корниенко, 2022). В этих условиях особую значимость приобретает освоение нетрадиционных объектов промысла, включая многочисленные непромысловые виды рыб, попадающие в прилов. Одним из перспективных объектов, недостаточно вовлечённых в переработку, является дальневосточный шлемоносец рода *Gymnocanthus* (Матвеев, 2021; Панченко и соавт., 2022). Общая биомасса данного вида в 2022 г. превышала 10 тыс. т., а запас в подзоне Приморье в 2024 г. оценивался на уровне 76,6 тыс. т. (Панченко и соавт., 2022). Несмотря на значительные резервы, мышечная ткань шлемоносца, обладающая высоким содержанием незаменимых аминокислот и ценных полиненасыщенных жирных кислот (омега-3 и омега-6) (Югай

и соавт., 2021), практически не используется в пищевом производстве и чаще направляется на изготовление кормовой рыбной муки (Ahuja, et al., 2020). Так, экспорт рыбной муки и бульонов из России в 2022 г. составил более 122 тыс. т., увеличившись на 62 % по сравнению с 2019 годом, а в 2023 г. возрос ещё на 10 % до 143 тыс. т., что свидетельствует о нерациональном использовании высокоценного белкового сырья.

Одним из путей повышения эффективности пищевого использования бычков является создание формованных продуктов с многокомпонентной рецептурой на основе сочетания животных и растительных ингредиентов (Несвященко и соавт., 2015; Зверев и соавт., 2022; Wilkinson et al., 2022). Доказано, что применение принципов пищевой комбинаторики позволяет формировать продукцию с заданным химическим составом и высокими потребительскими характеристиками (Морозов, 2022; Гизбрехт и соавт., 2023). Недостающие компоненты могут быть успешно компенсированы за счёт использования растительных добавок, например, нутовой муки (El-Beltagi et al., 2017; Felisiak et al., 2024), а также структурообразующих компонентов и рыбных эмульсий, полученных из вторичного сырья. Использование такого подхода позволяет не только максимально эффективно использовать сырьё, образующееся при разделке рыбы, но и снизить себестоимость конечного продукта (Корниенко, 2022).

Однако, российские исследования, направленные на разработку пищевых продуктов из мышечной ткани дальневосточного шлемоносца отсутствуют. Целью данного исследования являлась разработка технологии производства паштета из мышечной ткани шлемоносца с использованием эмульсии на основе рыбного бульона из субпродуктов и растительного компонента — нутовой муки. Исследовательские вопросы:

RQ#1: Каков химический состав мышечной ткани дальневосточного шлемоносца?

RQ#2: Как влияет количество нутовой муки и рыбной эмульсии на эффективную вязкость рыбного фарша?

¹ Naureen, I. (2025). *Seafood leads global protein growth amid evolving market and regulations*. <https://www.foodingredientsfirst.com/news/seafood-leads-global-protein-growth-amid-evolving-market-and-regulations.html>

² Aquatic bioresources catch in Russia reach 4.8 mln tons in 2024. Aquatic bioresources catch in Russia reach 4.8 mln tons in 2024 — federal agency — Business & Economy — TASS

Q#3: Каким должно быть рациональное соотношение ингредиентов для формованного продукта на основе мышечной ткани шлемоносца?

Q#4: Какова относительная биологическая ценность полученного продукта по показателям тест-культуры *Tetrahymina pyriformis*?

Q#5: Какими органолептическими характеристиками обладает разработанный продукт?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

Объектом исследования являлись бычки отряда Скорпенообразные (*Scorpaeniformes*), рода *Gymnocanthus*, семейства *Cottidae*, вид — дальневосточный шлемоносец (*Gymnocanthus Herzensteini*), добытый в Японском море. Бычки хранились в мороженом виде (ГОСТ 32366–2013)³ в течение трех месяцев на рыбоперерабатывающем предприятии, отбор проб проводили согласно ГОСТ 31339–2006⁴.

Методы, инструменты и процедура исследования

Методы

Определение липидов

Количественное определение липидов проводили экстрагированием по методу Блайя-Дайера (Bligh, et al., 1959). Экстракцию липидов осуществляли при взаимодействии мышечной ткани рыбы со смесью этилового спирта, хлороформа и воды, затем добавляли раствор ацетата цинка для быстрого расслоения водной и органической частей, перемешивали и переносили в делительную воронку для разделения смеси. Нижнюю часть раствора, содержащего хлороформ, сливали в мерную колбу и доводили до метки хлороформом. Из мерной колбы отбирали 30 см³ экстракта, помещали в высушенную и взвешенную до постоянной массы фарфоровую чашку для испарения хлороформа. Остаток с жиром в чашке высушивали до постоянной массы. Массовую долю липидов определяли по формуле:

$$x = \frac{M_1 \cdot 100 \cdot V}{M \cdot V_1},$$

где M — масса исследуемого образца, г;
 M_1 — масса жира в экстракте, взятом для анализа, г;
 V — общий объем мерной колбы с экстрактом, см³;
 V_1 — объем экстракта, взятый для анализа (30 см³).

Расхождение между двумя параллельными определениями не превышало 0,5 %.

Определение белков

Количество белка определяли методом Кьельдаля (Козин и соавт., 2019). Метод предусматривает минерализацию белоксодержащей навески концентрированной серной кислотой. Выделяющийся при этом аммиак взаимодействует с избытком концентрированной кислоты и в ходе химической реакции превращается в сульфат аммония. Полученный сульфат аммония разрушали последующей дистилляцией в присутствии концентрированной щелочи. Образовавшийся газообразный аммиак отгоняли с помощью холодильной установки с каплеуловителем в колбу с разбавленным раствором серной кислоты. Долю аммиака после отгонки определяли обратным титрованием гидроксидом натрия в присутствии индикатора. Массовую долю белковых веществ определяли по формуле

$$x = \frac{(V - V_1) \cdot K \cdot 0,0014 \cdot 6,25 \cdot 100}{m},$$

где V — объем гидроксида натрия, 0,1 н, пошедший на титрование серной кислоты в контрольном анализе, см³;
 V_1 — объем гидроксида натрия, 0,1 н, пошедший на титрование серной кислоты в рабочем анализе, см³;
 K — коэффициент пересчета на точный раствор гидроксида натрия, 0,1 н;
0,0014 — количество азота, эквивалентное 1 см³ раствора гидроксида натрия, 0,1 н, г;
6,25 — коэффициент пересчета количества азота на белковые вещества;
 m — навеска фарша, г.

³ ГОСТ 32366-2013 (2023) *Рыба мороженая. Технические условия*. М.: Стандартинформ

⁴ ГОСТ 31339-2006 (2023) *Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приемки и методы отбора проб*. М.: Стандартинформ

За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов двух параллельных определений, расхождения не превышало 0,2 %.

Определение массовой доли воды

Содержание массовой доли воды в образце определяли высушиванием в сушильном шкафу⁵. Навеску анализируемой пробы смешивали с песком для равномерного высушивания и отправляли в сушильный шкаф. Процесс сушки вели при температуре 100–105 °С до постоянной массы навески.

Постоянная масса считается достигнутой, если разница между двумя взвешиваниями не превышала 0,001 г.

Массовую долю воды в процентах вычисляют по формуле:

$$x = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m_1 - m}$$

где m — масса бюксы с песком, г;

m_1 — масса бюксы с навеской и песком до высушивания, г;

m_2 — масса бюксы с навеской и песком после высушивания, г.

Определение минеральных веществ

Определение минеральных веществ в сырье и готовом продукте проводили сжиганием навески в муфельной печи с последующим взвешиванием⁶. Навески фарша и готового продукта помещали в фарфоровые тигли, обугливали на электрической плитке (для предотвращения потерь), помещали в муфельный шкаф до полного сжигания органической части при температуре 450 °С. Количество минеральных веществ определяли по формуле:

$$x = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100}{m}$$

где m — навеска исследуемого образца, г;

m_1 — масса пустого тигля, г;

m_2 — масса тигля с навеской после сжигания, г.

Расхождение между параллельными определениями не превышало 0,01 %.

Определение критерия химического состава

Определение критерия химического состава вели расчетным методом (Коган и соавт., 2019) на основе данных по содержанию белков, липидов и воды. Критерий химического состава — это отношение белков к липидной составляющей с учетом содержания воды в фарше:

$$K = \frac{B \cdot (100 - W)}{Y \cdot W},$$

где B и Y — содержание белка и жира соответственно в 1 кг фарша;

W — содержание воды, %.

Определение сухих веществ

Определение сухих веществ в рыбном бульоне проводили с помощью рефрактометра лабораторного ИРФ-454 Б2М. Для этого рыбный бульон фильтровали через складчатый фильтр в стакан, охлаждали до температуры 20–25 °С. Первые порции фильтрата отбрасывали, а остальную часть использовали для определения сухих веществ. (Панчишина, 2015).

Определение относительной биологической ценности

Определение относительной биологической ценности рыбного паштета проводили с помощью тест-культуры — инфузория *Tetrahymena pyriformis*. Для этого пробирку с рыбным паштетом нагревали в стерилизаторе при температуре 80–90 °С, охлаждали, добавляли 0,05 мл тест-культуры и помещали в термостат для инкубации. После термостатирования каплю испытуемого образца из пробирки вносили в камеру Фукса-Розенталя (увеличение 7 × 10) и вели подсчет инфузорий. Наличие угнетения или роста инфузорий сравнивали с контрольным образцом (Игнатъев и соавт., 1978; Игнатъев и соавт., 1980).

⁵ ГОСТ 7636-82 (2024) Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. М.: Стандартинформ.

⁶ ГОСТ 7636-82 (2024) Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. М.: Стандартинформ.

Определение эффективной вязкости

Для оценки консистенции рыбного фарша определяли эффективную вязкость на вискозиметре Реотест-2⁷, пределы измерений прибора 10^2 – 10^4 Па·с. Порцию фарша помещали в наружный неподвижный цилиндр, подключенный к жидкостному циркуляционному термостату. Измерения начинали при малых значениях скорости сдвига, при этом отсчитывали показания на индикаторе. Увеличение скорости сдвига производили за счет увеличения скорости вращения измерительного цилиндра с помощью редуктора. Эффективную вязкость определяли как произведение динамической вязкости на скорость сдвига.

Оценку органолептических показателей проводили в соответствии с ГОСТ 7631–2008⁸, (Сафронова и соавт., 2019).

Определение углеводов

Определение содержания углеводов проводили расчетным путем, учитывая, что общий химический состав любых пищевых продуктов равен 100%. Содержание углеводов рассчитывали после химического анализа готового продукта (паштета) как разницу между 100% и суммой белков, жиров, воды и минеральных веществ.

Математическая обработка данных

Для математической обработки экспериментальных данных применяли программу М. Excel (2016 встроенный пакет Анализ данных).

Процедура исследования

Подготовку к определению химического состава мышечной ткани рыбы по ГОСТ 7636–85⁹. Для этого рыбу очищали от механических загрязнений, размораживали на воздухе без доступа воды до температуры в толще рыбы минус 1–2 °С, разделявали на филе, обесшкуривали, измельчали на волчке диаметром 2–3 мм. Общая схема проведения исследований представлена на Рисунке 1.

Субпродукты, соответствующие ГОСТ 34190–2017¹⁰: головы, плавники, позвончики, реберные кости и желудки (далее вторичное сырье) измельчали на волчке диаметром 3–5 мм. Предварительно из голов удаляли жабры, придающие горечь готовому продукту, желудок разрезали, промывали. Вторичное сырье и кожу направляли на варку. Термическую обработку бульонов вели при гидромодуле 1:2 до содержания сухих веществ в бульоне 6–7% (продолжительность варки 2–2,5 ч). Бульоны в горячем виде (70–75 °С) фильтровали (при остывании происходит желатинизация, затрудняющая фильтрование), добавляли 50% рафинированного, дезодорированного растительного масла и эмульгировали в гомогенизаторе при 2000 об/мин в течение 2–3 мин (Югай А.В. и соавт., 2024) до образования однородной структуры белого цвета, по консистенции, напоминающей жидкую сметану. Нутовую муку предварительно просеивали и обжаривали при температуре 180–200 °С в течение 3–5 мин (Raza, et al., 2021) для инактивации антипитательных веществ и инициирования реакции меланоидинообразования, сопровождающей образование коричневого колера, орехового вкуса и запаха.

При составлении рецептуры придерживались следующей последовательности: в фарш добавляли сначала эмульсию, в процессе его перемешивания вносили нутовую муку (ТУ 9293–009–89751414–10)¹¹, репчатый лук, столовую морковь, чеснок (ГОСТ

⁷ Реотест 2.1. Цилиндрический и конусо-пластинчатый ротационный вискозиметр. Инструкция по эксплуатации.

⁸ ГОСТ 7631–2008 (2023) *Рыба нерыбные объекты и продукция из них. Методы определения органолептических и физических показателей*. М.: Стандартинформ.

⁹ ГОСТ 7636–82 (2024) *Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа*. М.: Стандартинформ.

¹⁰ ГОСТ 34190–2017 (2023) *Субпродукты рыбные мороженые. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

¹¹ ТУ 9293–009–89751414–10 *Мука нутовая*. Производитель ООО «Гарнец».

Рисунок 1

Общая схема проведения исследований

Figure 1

General Scheme of the Research



32065–2013)¹², соль пищевую (ГОСТ 51574–2018)¹³, порошок карри (ГОСТ 2253–2015)¹⁴, копченую паприку (ТУ 9199–138-79036538)¹⁵. Вымешивали до однородного состояния, направляли на фасование в стеклянные банки, массой нетто 180 г., термически обрабатывали при температуре 130–150 °С (ТР ЕАЭС 040/2016)¹⁶ до достижения температуры в толще продукта не ниже 80 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование химического состава сырья

Исследование химического состава (Таблица 1) показало, что дальневосточный шлемоносец относится к маложирным видам рыб.

Таблица 1

Химический состав мышечной ткани дальневосточного шлемоносца

Table 1

Chemical Composition of the Muscle Tissue of the Far Eastern Sculpin

Даль-нево-сточный шлемоносец	Содержание, %			
	воды	белков	липидов	мин. веществ
	78,7 ± 3,4	17,3 ± 1,2	1,9 ± 0,6	1,2 ± 0,3

Фарш после измельчения однородный, светло-серого или бежевого цвета, с незначительным выделением жидкости, после разморозки фарш не теряет своих свойств и остается таким же однородным.

¹² ГОСТ 32065–2013 (2023) *Овощи сушеные. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

¹³ ГОСТ 51574–2018 (2023) *Соль пищевая. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

¹⁴ ГОСТ 2253–2015 (2023) *Порошок карри. Технические условия*. М.: Стандартинформ.

¹⁵ ТУ 9199–138-79036538–2006 *Пряности и травы*. ООО НВФ «Центр пищевых технологий».

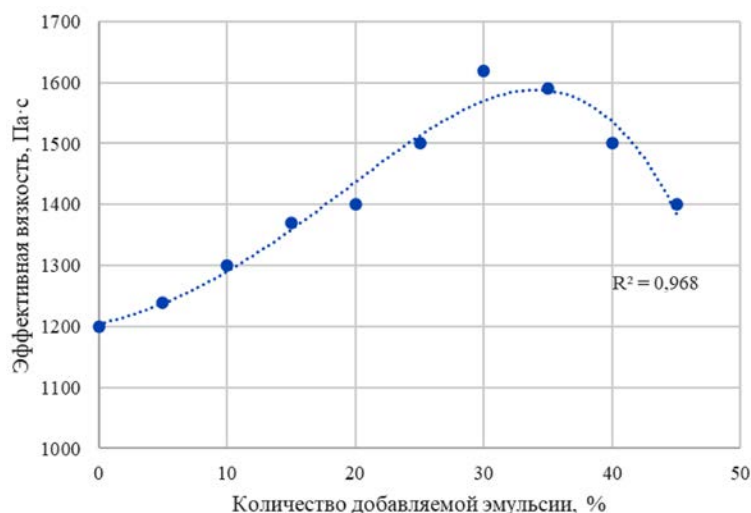
¹⁶ ТР ЕАЭС 040/2016 (2025) *О безопасности рыбы и рыбной продукции*.

Рисунок 2

Зависимость эффективной вязкости рыбного фарша от количества добавляемой эмульсии

Figure 2

Dependence of the Effective Viscosity of Minced Fish Meat on the Amount of Added Emulsion



На основе полученных данных исследовали зависимость эффективной вязкости от концентрации добавок.

Исследование зависимости эффективной вязкости фарша от концентрации эмульсии и нутовой муки

Исследования показали (Рисунок 2), что с увеличением концентрации эмульсии вязкость увеличивается, достигая в максимальной точке более 1600 Па·с., дальнейшее увеличение приводит к уменьшению вязкости, фарш становится однородным, липким, но текучим. Установлено, что при внесении эмульсии в количестве 30–35%, вязкость максимальная, затем наблюдается ее уменьшение.

Последующая термическая обработка для определения органолептических свойств готового продукта показала, что фарш имеет светлый цвет и рыхлую, консистенцию.

Установлено, что при увеличении количества растительного масла в фарше за счет внесения эмульсии улучшается внешний вид продукта, структура становится сочной, отстой бульона незначительный (3–5%).

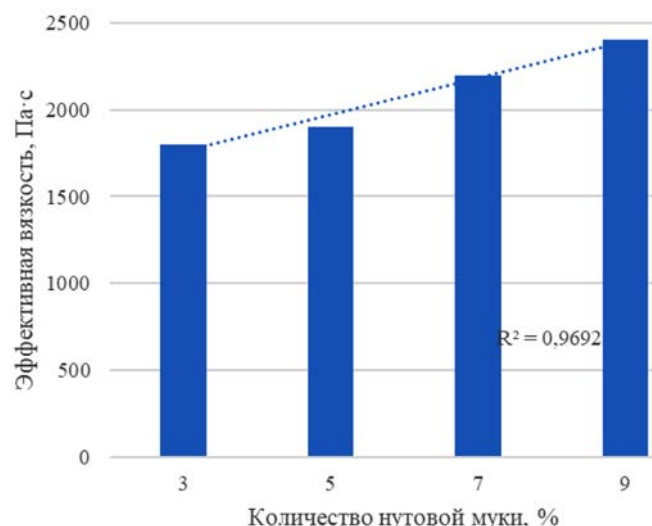
Следующим этапом разработки пищевой композиции было исследование влияния количества нутовой муки на эффективную вязкость фаршевой системы. Установлено, что эффективная вязкость при добавлении нутовой муки изменяется в диапазоне от 1800 до 2400 Па·с (Рисунок 3).

Рисунок 3

Зависимость эффективной вязкости фарша от количества нутовой муки

Figure 3

Effective Viscosity of Minced Meat as a Function of the Amount of Chickpea Flour



Для уточнения совместного влияния количества вносимой нутовой муки (X_1) и эмульсии (X_2) при постоянном количестве фарша на эффективную вязкость (Y) провели полный двухфакторный регрессионный анализ (Таблица 2).

Таблица 2

Регрессионная статистика, полученная при реализации двухфакторного эксперимента

Table 2

Regression Statistics Obtained from the Two-factor Experiment

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,943006
R-квадрат	0,889261
Нормированный R-квадрат	0,868497
Стандартная ошибка	106,8659
Наблюдения	20

Статистический параметр «Множественный R» (множественный коэффициент линейной корреляции) показывает линейную корреляцию между экспериментальными и рассчитанными по полученному уравнению регрессии значениями зависимой

переменной, в нашем случае Y — эффективная вязкость. Важным показателем является коэффициент детерминации R^2 (чем точнее уравнение регрессии описывает зависимость, тем ближе значение R^2 к единице). Он характеризует долю общего разброса экспериментальных значений Y от среднеарифметического значения, которое рассчитывается по полученному уравнению регрессии и показывает значимость влияния коэффициентов регрессии на функцию отклика (Y).

Если значимость F меньше уровня значимости $p = 0,05$ (заданный уровень), то это свидетельствует о достоверности влияния независимых переменных на функцию отклика — эффективную вязкость с вероятностью $P \geq 0,95$ по полученному уравнению регрессии.

Анализируя полученные результаты расчетов параметров для регрессионной модели, можно считать, что наиболее достоверно с вероятностью не менее 0,95 на эффективную вязкость оказывают влияние X_1 (нутовая мука), X_2 (концентрация эмульсии) и $X_1 \cdot X_2$ (Таблица 4).

$$Y = 1811,71 + 81,62 \cdot X_1 - 32,02 \cdot X_2 + 2,72 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Таблица 3

Дисперсионный анализ расчетных данных

Table 3

Analysis of Variance of Calculated data

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	Значимость <i>F</i>
Регрессия	3	1467324,708	489108,2359	42,82788978	7,17E-08
Остаток	16	182725,1311	11420,32069		
Итого	19	1650049,839			

Таблица 4

Коэффициенты регрессии

Table 4

Regression Coefficients

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	1811,71	118,5200171	15,28610984	5,75358E-11	1560,459	2062,961	1560,459	2062,961
X_1	81,62333	18,50971693	4,409755894	0,000438275	42,38449	120,8622	42,38449	120,8622
X_2	-32,0153	9,677118874	-3,308353835	0,00444046	-52,5299	-11,5008	-52,5299	-11,5008
$X_1 \cdot X_2$	2,715333	1,511312059	1,796672843	0,09128982	-0,48851	5,919172	-0,48851	5,919172

Интерпретируя полученное уравнение, отметим, что на значение показателя эффективной вязкости оказывает влияние увеличение концентрации нутовой муки и уменьшение количества вносимой эмульсии. Совместное влияние факторов незначительно, о чем свидетельствует коэффициент 2,72. На основании изучения взаимного влияния факторов на функцию отклика Y , предложены следующие рациональные параметры: количество нутовой муки 5–7%, количество вносимой эмульсии – 15–20%.

Разработка рецептуры формованной продукции

На основании полученных экспериментальных данных составили рецептуру рыбного паштета (Таблица 5).

Таблица 5

Рецептура паштетных изделий с учетом влияния факторов

Table 5

Recipe for Pate Products Taking into Account the Influence of Factors

Рецептурный компонент, %	Вариант 1	Вариант 2
Рыбный фарш	70	75
Эмульсия на основе бульона, 50 % масла	20	15
Нутовая мука	5	7
Соль пищевая	1,5	1,5
Порошок карри	0,8	0,5
Копченая паприка	0,2	0,3
Лук сушеный	2,5	1,2
Итого	100	100

Органолептическая оценка показала, что продукт имеет сочную, нежную консистенцию с выраженным рыбным вкусом и запахом, ореховым послевкусием, аппетитным коричневатым колером, на изломе однородный, блестящий, выделение бульона и масла незначительное.

Определение относительной биологической ценности продукта

Для определения биологической ценности исследовали динамику численности популяции *T. pyriformis* после термической обработки. Результаты показали высокие показатели относительной биологической доступности. Рост инфузории в течение 48 ч (квадрат камеры Фукса-Розенталя) представлен на Рисунке 4. За время наблюдений отмечали отсутствие погибших клеток на всем протяжении наблюдений. Известно, что *T. Pyriformis* хорошо переносит 1% водный раствор поваренной соли, но гибнет в 2%¹⁷, поэтому при проведении испытаний исследовали готовый продукт без добавления соли и пряностей.

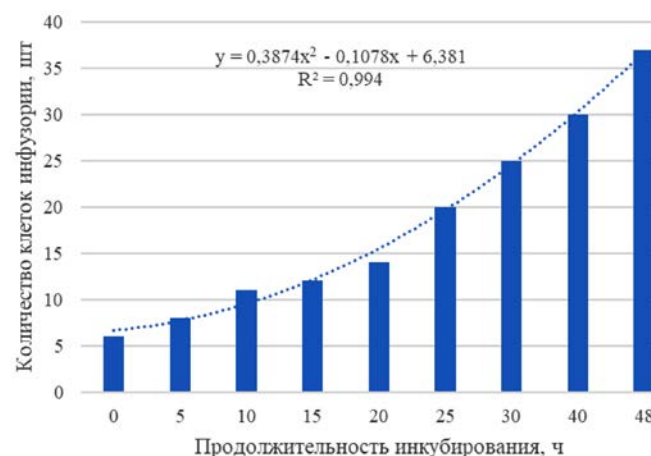
T. Pyriformis, находясь в испытываемой среде, меняет темп размножения, способность питаться, поэтому наличие или отсутствие ингибирующих рост факторов определяли подсчетом инфузорий до и после эксперимента. В ходе эксперимента не наблюдалось ингибирующего влияния на выживаемость инфузорий. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что рыбный паштет имеет высокую биологическую ценность.

Рисунок 4

Зависимость количества клеток инфузорий от продолжительности инкубирования

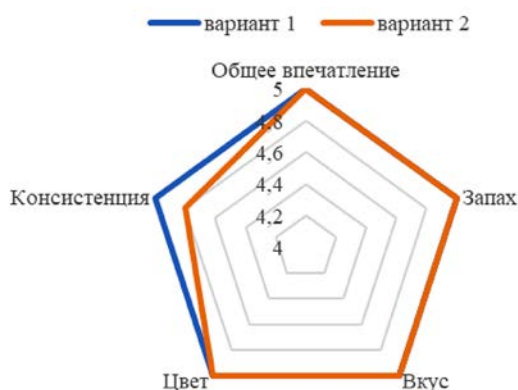
Figure 4

Dependence of the Number of Ciliate Cells on the Duration of Incubation



¹⁷ Методические рекомендации по ускоренному определению токсичности и безвредности кормов и кормовых добавок. (2015). Минск

Рисунок 5
Органолептическая оценка паштетов
Figure 5
Organoleptic Evaluation of Pates



Органолептическая оценка готовой продукции

Профилограмма (Рисунок 5), составленная на основе оценок дегустационной комиссии, показала, что паштеты получили высокие оценки. Результаты дегустации показали, что рыбный паштет имеет насыщенный вкус и аромат, консистенция однородная, сочная, наличие в составе рецептуры эмульсии и нутовой муки положительно отразилось на общем впечатлении: ореховый привкус и коричневатый колер при добавлении нутовой муки делает продукт оригинальным, необычным и запоминающимся, внесение эмульсии в состав рецептуры положительно отразилось на выходе продукта, его консистенции и энергетической ценности.

Исследования химического состава (Таблица 6) готовой продукции показали, что паштеты содержат порядка 10% липидов, более 20% белка. Показатель энергетической ценности составил 195 ккал (816 кДж).

Таблица 6
Усредненный химический состав паштета

Table 6
The Average Chemical Composition of Pate

Продукция	Содержание, %				
	воды	белков	липидов	углеводы	мин. веществ
Паштет	63,5±2,1	21,2±1,4	10,2±0,8	3,1±0,5	2,1±0,4

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных исследований подтвердили перспективность использования дальневосточного шлемоносца (*Gymnocanthus spp.*, семейство *Cottidae*) в качестве сырья для производства формованных продуктов питания с многокомпонентной рецептурой. Несмотря на значительную биомассу этого вида рыб в прилове, его промышленная переработка практически не осуществляется, что ограничивает пищевое использование (Югай и соавт., 2021; Матвеев, 2021). Это обусловлено, прежде всего, низким выходом мышечной ткани (до 25%) и высоким выходом вторичного сырья (от 50 до 65%), образующегося при разделке рыбы (Югай и соавт., 2021). В связи с этим целесообразно применять технологические приемы, позволяющие вовлечь вторичные ресурсы и растительные добавки для повышения выхода готовой продукции и улучшения её потребительских свойств (Верболоз и соавт., 2019; Jiao et al., 2019).

В настоящем исследовании установлено, что мышечная ткань шлемоносца характеризуется высоким содержанием белков (более 17%) при низкой жирности (1,6–2,5%), что подтверждает отнесение этого вида к белковым маложирным рыбам согласно классификации Артюховой и соавт. (2001). Химический состав и высокая формующая способность (более 1200 Па·с), выявленные в ходе исследования, позволяют прогнозировать успешность использования шлемоносца в производстве формованных продуктов (Чернышова и соавт., 2012). Эти характеристики положительно отражаются на органолептических показателях и технологических свойствах продукции, таких как консистенция и стабильность фаршевой системы после термической обработки.

Изучение влияния нутовой муки на реологические характеристики фарша показало, что данный растительный компонент существенно улучшает функционально-технологические свойства системы благодаря высокой водосвязывающей способности и наличию пищевых волокон (Ярцева и соавт., 2022; Yazdanpanah et al., 2022; Бочкарева и соавт., 2024). Нутовая мука обладает дополнительными преимуществами, такими как отсутствие глютена и положительное влияние на уровень глюкозы в крови (Тиунов, 2019; De Angelis et al., 2021). Однако выявленные антипитательные вещества

в нутовой муке могут снижать активность пищеварительных ферментов (Богданов и соавт., 2015; Петрова и соавт., 2019). Эту проблему успешно решают путем предварительной термической обработки (обжаривания) нутовой муки при температуре 180–200 °С в течение 3–5 мин, что сопровождается улучшением её вкусовых качеств и цвета (Raza et al., 2021). Согласно полученным данным, рациональное содержание нутовой муки в рецептуре фарша находится в пределах 5–7%, поскольку превышение этого уровня отрицательно влияет на консистенцию и вкус конечного продукта (Петрова и соавт., 2019; Пчелинцева и соавт., 2021).

Внесение эмульсии на основе рыбного бульона из вторичного сырья позволило существенно улучшить органолептические и реологические свойства рыбного фарша. Использование такой эмульсии обеспечивает поступление натурального коллагена, липидов и белков в систему, улучшая вкусовые свойства и увеличивая выход продукции (Caguso et al., 2020; Wang et al., 2019; Югай и соавт., 2024). Установлено, что оптимальным содержанием эмульсии в рецептуре является диапазон 15–20%. При превышении этого количества фарш приобретает нежелательную текучесть и липкость, ухудшается вкус и консистенция готового продукта.

Значимым технологическим решением явилось также добавление растительного масла в составе эмульсии, что позволило избежать маслянистого привкуса и обеспечить стабильность фаршевой системы (Гусева и соавт., 2015; Феофилактова и соавт., 2021). При этом тип растительного масла не оказывал значительного влияния на стабильность эмульсии, однако критическое значение имела его концентрация (Горбатовский и соавт., 2020; Jiao et al., 2019).

Оценка биологической ценности разработанного паштета, проведенная с участием тест-культуры *Tetrahymena pyriformis*, подтвердила его высокие биологические показатели, поскольку наблюдался стабильный рост тест-организмов и отсутствие гибели клеток в ходе эксперимента. Оба варианта получили высокую дегустационную оценку и характеризовались однородной сочной консистенцией, приятным вкусом и привлекательным внешним видом. Полученные продукты содержат более 20% белков и имеют невысокую энергетическую ценность — в среднем 195 ккал (816 кДж), что дополнительно подтверждает их потенциал как полезной

пищевой продукции с высоким потребительским спросом. В отличие от существующих технологий, базирующихся на переработке основного сырья (мышечная ткань), в нашей работе показана возможность рациональной переработки шлемоносца, при которой экстракция основных нутриентов и балластных веществ вторичного сырья способствует повышению питательной ценности готового продукта. Работы в данном направлении продолжаются.

Ограничения исследования

Представленные результаты получены в лабораторных условиях и требуют апробации на уровне опытно-промышленного или промышленного производства для подтверждения технологической реализуемости. Исследование основывалось на анализе ограниченного количества экземпляров дальневосточного шлемоносца, что может не полностью отражать изменчивость его химического состава и реологических характеристик. Определение биологической ценности осуществлялось только на тест-культуре *Tetrahymena pyriformis*. Необходимо дополнительное подтверждение биологической ценности продукта другими методами или модельными организмами для повышения надежности полученных данных. Проведенные дегустационные испытания ограничены коротким периодом хранения продукта и не позволяют оценить стабильность органолептических характеристик при длительном хранении. Исследование не затрагивает вопросы сроков хранения, условий транспортировки и микробиологической безопасности продукта, что является важным фактором при внедрении технологии в производство. Перечисленные ограничения обозначают направления для дальнейших исследований и способствуют улучшению предложенной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана технология получения формованного продукта (паштета) на основе мышечной ткани дальневосточного шлемоносца с добавлением нутовой муки и эмульсии из рыбного бульона, полученного из вторичного сырья. Установлено, что исследуемое сырьё обладает высоким содержанием полно-

ценного белка (более 20%), низким содержанием липидов (до 2,5%) и хорошими реологическими характеристиками, что делает его перспективным для создания пищевой продукции с заданными свойствами.

Выявлено, что нутовая мука (5–7%) и рыбная эмульсия (15–20%) улучшают структурно-механические и органолептические показатели паштета. Продукт характеризуется высокой биологической ценностью, подтверждённой методом биотестирования с *Tetrahymena pyriformis*, положительными вкусовыми характеристиками и относительно низкой энергетической ценностью (195 ккал, или 816 кДж).

Полученные результаты подтверждают целесообразность вовлечения дальневосточного шлемоносца и вторичных ресурсов рыбопереработки в пищевое производство. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку микробиологической безопасности, стабильности при хранении и масштабирование предложенной технологии до уровня промышленного производства.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Алевтина Витальевна Югай: формулирование идеи исследования, целей и задач; методология; написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

Татьяна Ноевна Слуцкая: курирование данных; написание рукописи — рецензирование и редактирование; критический анализ черновика рукописи.

Галина Николаевна Тимчишина: курирование данных; написание рукописи — рецензирование и редактирование; критический анализ черновика рукописи.

Татьяна Николаевна Данильчук: курирование данных; административное руководство исследовательским проектом; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Alevtina V. Yugay: ideas; formulation of overarching research goals and aims; methodology; preparation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

Tatyana N. Slutskaia: data curation; writing — review & editing; specifically critical review.

Galina N. Timchishina: data curation; writing — review & editing; specifically critical review.

Tatiana N. Danilchuk: data curation; project administration; writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Артюхова, С.А., Богданов, В.Д., & Дацун, В.М. (2001). *Технология продуктов из гидробионтов*. Москва: Колос.
- Artyukhova, S.A., Bogdanov, V.D., & Datsun, V.M. (2001). *Technology of products from hydrobionts*. Moscow: Kolos. (In Russ).
- Богданов, В., Гусева, Л., & Панкина, А. (2015). Обоснование режима термообработки рыбного фарша в производстве кулинарных продуктов. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, (2), 98–104.
- Bogdanov, V., Guseva, L., & Pankina, A. (2015). Justification of the heat treatment mode of minced fish in the production of culinary products. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, (2), 98–104. (In Russ).
- Бочкарева, З.А., & Назарова, Е.И. (2024). Совершенствование технологии рыбных рубленых изделий с бобовыми и лактулозой. *Инновационная техника и технология*, 11(3), 18–22.
- Bochkareva, Z.A., & Nazarova, E.I. (2024). Improving the technology of minced fish products with legumes and lactulose. *Innovative Machinery and Technology*, 11(3), 18–22. (In Russ.).
- Верболюз, Е. И., Распопов, Д. С., & Шестакова, Е. А. (2019). Технология повышения стойкости рыбной продукции с добавлением белково-жировой эмульсии, обработанной ультразвуком и магнитным полем, к окислительным процессам при хранении. *Вестник*

- Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство, (1), 129–135. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-1-129-135>.
- Verboloz, E. I., Raspopov, D. S., & Shestakova, E. A. (2019). Technology for increasing the stability of fish products with the addition of a protein-fat emulsion treated with ultrasound and a magnetic field to oxidative processes during storage. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, (1), 129–135. (In Russ). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-1-129-135>.
- Воробьев, В.И. (2015). Переработка коллагенсодержащего сырья. *Рыбное хозяйство*, (1), 122–125
- Vorobyov, V.I. (2015). Processing of collagen containing raw material. *Fisheries*, (1), 122–125. (In Russ).
- Гизбрехт, В.В., & Бредихина, О.В. (2023). Обоснование разработки рыбных кулинарных изделий функциональной направленности для местного населения Арктической зоны Чукотки. *Рыбное хозяйство*, (4), 107–112. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-107-112>
- Giesbrecht, V.V., & Bredikhina, O.V. (2023). Justification for the development of functional fish culinary products for the local population of the Arctic zone of Chukotka. *Fisheries*, (4), 107–112. (In Russ). <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-107-112>
- Гусева, Л.Б., Богданов, В.Д., & Панкина, А.В. (2015). Экспериментальное обоснование состава фаршевых эмульсий в производстве рыбных кулинарных продуктов. *Научные труды Дальрыбвтуза*, 35, 107–117.
- Guseva, L.B., Bogdanov, V.D., & Pankina, A.V. (2015). Experimental substantiation of the composition of minced emulsions in the production of fish culinary products. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, (35), 107–117 (In Russ).
- Горбатовский, А. А., Ракитянская, И.Л., & Каледина, М.В. (2020). Технология производства продуктов из фарша тресковых механической обвалки. *Техника и технология пищевых производств*, 50(2), 361–371. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-361-371>
- Gorbatovskiy, A. A., Rakityanskaya, I. L., & Kaledina, M. V. (2020). Technology of production of products from minced cod of mechanical deboning. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(2), 361–371. (In Russ). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-361-371>
- Зверев, С.В., & Политуха, О.В. (2022). Сбалансированный состав многокомпонентной крупы в условиях адекватной концепции питания. *Продовольственные системы*, 5(3), 185–194. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-185-194>
- Zverev, S.V., & Politukha, O.V. (2022). Balanced composition of multicomponent groats in conditions of the adequate nutrition concept. *Food systems*, 5(3), 185–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-185-194>
- Игнатъев, А.Д., Исаев М.К., & Долгов, В.А. (1980). Модификация метода биологической оценки пищевых продуктов с помощью ресничной инфузории *тетрахимена пириформис*. *Вопросы питания*, (1), 70–71.
- Ignatiev, A.D., Isaev, M.K., & Dolgov, V.A. (1980). Modification of the method of biological evaluation of food products using the *Tetrahymena pyriformis ciliated ciliate*. *Voprosy Pitaniia*, (1), 70–71. (In Russ).
- Игнатъев, А.Д., & Шаблий, В.Я. (1978). Использование инфузорий *тетрахимена пириформис* как тест-объект при биологических исследованиях в сельском хозяйстве. М.: ВАСХНИЛ.
- Ignatiev, A.D., & Shabliy, V.Ya. (1978). Use of the ciliate *Tetrahymena pyriformis* as a test object in biological research in agriculture. М.: VASKhNIL. (In Russ).
- Коган, В. В., & Семенова, Л. Э. (2019). Инженерная реология в пищевой промышленности. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, (4), 147–156. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-4-147-156>
- Kogan, V. V., & Semenova, L. E. Engineering rheology in the food industry (2019). *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, (4), 147–156. (In Russ). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-4-147-156>
- Козин, А.В., Абрамова, Л.С., Гусева, Е.С., & Дерунец, И.В. (2021). Установление метрологических параметров методики измерений массовой доли белка методом

- Кьельдаля в пищевой рыбной продукции. *Пищевые системы*, 4(4), 239–245. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-4-239-245>
- Kozin, A. V., Abramova, L. S., Guseva, E. S., & Derunets, I. V. (2021). Establishment of metrological parameters of the method for measuring the protein mass fraction in fish food products by the Kjeldahl method. *Food Systems*, 4(4), 239–245. (In Russ). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-4-239-245>
- Корниенко, Н.Л. (2022). *Научное обоснование и разработка технологии рыбных паштетов на основе рационального использования наваги и краснопёрки* [Кандидатская диссертация, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет]. Репозиторий.
- Kornienko, N.L. (2022). *Scientific substantiation and development of fish pate technology based on the rational use of saffrone cod and redeye* [Doctoral dissertation, Far Eastern State Technical Fisheries University]. Campus Repository. (In Russ).
- Макоедов, А. Н., Матишов, Г.Г., & Пономарева, Е.Н. (2023). Мировые тенденции пользования водными биоресурсами. *Вестник Российской академии наук*, 93(2), 179–190. <https://doi.org/10.31857/S086958732301005X>
- Makoedov, A. N., Matishov, G.G., & Ponomareva, E.N. (2023). Global trends in the use of aquatic biological resources. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 93(2), 179–190. (In Russ). <https://doi.org/10.31857/S086958732301005X>
- Матвеев, А.А. (2021). *Многолетняя динамика биомассы, распределение, промысел и некоторые аспекты биологии массовых видов рогатковых у западной Камчатки*. [Кандидатская диссертация, Камчатский государственный технический университет]. Репозиторий.
- Matveev, A.A. (2021). *Long-term dynamics of biomass, distribution, harvesting and some aspects of biology of Cottidae in western Kamchatka* [Doctoral dissertation, Kamchatka State Technical University]. Campus Repository. (In Russ).
- Морозов, И.О. (2022). *Разработка технологии кулинарных жележных изделий на основе полуфабрикатов, приготовленных из пищевой рыбной продукции* [Кандидатская диссертация, Калининградский государственный технический университет]. Репозиторий.
- Morozov, I.O. (2022). *Development of technology for culinary jelly products based on semi-finished products prepared from food fish products* [Doctoral dissertation, Kaliningrad State Technical University]. Campus Repository. (In Russ).
- Несвященко, С. С., Волченко, В. И., Гроховский, В. А., Темиржанова (Швейкина), К. С., Горбонос (Петрова), М. О., & Панкратова (Яцук) К. А. (2015). Использование печени трески и ее жира в технологии многокомпонентных пищевых продуктов. *Вестник международной академии холода*, (1), 20–26
- Nesvyashchenko, S. S., Volchenko, V. I., Grokhovsky, V. A., Temirzhanova, (Shveikina) K. S., Gorbonos, (Petrova) M. O., & Pankratova (Yatsuk) K. A. Cod liver and its fat in multicomponent food technology. *Journal of International Academy of Refrigeration*, (1), 20–26. (In Russ).
- Панченко, В.В., & Пушина, О.И. (2004). Биологическая характеристика керчаковых рыб рода *Muohoscephalus* (Cottidae) Зал. Петра Великого Японского моря. *Известия ТИНРО*, 138, 120–153
- Panchenko, V.V., Pushchina, O.I. (2004). Biological characteristic of sculpins of genus (Cottidae) of Peter the Great Bay (Japan Sea). *Izv. TINRO*, 138, 120–153. (In Russ).
- Панченко, В.В., Вдовин, А.Н., & Панченко, Л.Л. (2022). Сезонное распределение и размерный состав дальневосточного шлемоносца *Gymnocanthus herzensteini* (Cottidae) у материкового побережья Российских вод Японского моря. *Вопросы ихтиологии*, 62(4), 379–386. <https://doi.org/10.31857/S0042875222040245>
- Panchenko, V.V., Vdovin, A.N., & Panchenko, L.L. (2022). Seasonal distribution and size composition of the Far Eastern sculpin *Gymnocanthus herzensteini* (Cottidae) off the mainland coast of the Russian waters of the Sea of Japan. *Journal of Ichthyology*, 62(4), 379–386. (In Russ). <https://doi.org/10.31857/S0042875222040245>

- Панчишина Е.М. (2015). *Разработка технологии рыбного бульона и супов на его основе с использованием вторичного сырья* [Кандидатская диссертация, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет]. Репозиторий.
- Panchishina E.M. (2015). *Development of technology for fish broth and soups based on it using secondary raw materials* [Doctoral dissertation, Far Eastern State Technical Fisheries University]. Campus Repository. (In Russ).
- Петрова, Л.Д., & Богданов, В.Д. (2019). Перспективность использования нутовой муки в технологии рыбного фарша. *Инновации и продовольственная безопасность*, (1), 30–35. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2019-23-1-30-35>
- Petrova, L. D., & Bogdanov, V. D. (2019). Prospects of using chickpea flour in fish mince technology. *Innovations and Food Safety*, (1), 30–35. (In Russ). <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2019-23-1-30-35>
- Пчелинцева, О.Н., Бочкарева, З.А., & Лисина, С.В. (2021). Новый продукт с функциональными свойствами из рыбного сырья с растительными компонентами. *Ползуновский вестник*, (2), 132–139. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.018>
- Pchelintseva, O. N., Bochkareva, Z. A., & Lisina, S. V. (2021). A new product with functional properties made from fish raw materials with plant components. *Polzunovskiy Vestnik*, (2), 132–139. (In Russ). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.018>
- Сафронова, Т.М., Панчишина, Е.М., & Кращенко, В.В. (2019). Оценка рыбного сырья как способ повышения информативности его характеристик. *Техника и технология пищевых производств*, 4(49), 660–670. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-660-670>
- Safronova, T.M., Panchishina, E.M., & Krashchenko, V.V. (2019). Evaluation of fish raw materials as a way to increase the information content of its characteristics. *Food Processing: Techniques and Technology*, 4(49), 660–670. (In Russ). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-4-660-670>
- Тиунов, В.М. (2019). *Формирование качества мучных кулинарных изделий из муки, не содержащей глютен, и рациона на их основе* [Кандидатская диссертация, Уральский государственный экономический университет]. Репозиторий.
- Tiunov, V.M. (2019). *Formation of the quality culinary products from gluten-free flour and a diet based on them* [Doctoral dissertation, Ural State University of Economics]. Campus Repository. (In Russ).
- Феофилактова, О.В., Заворохина, Н.В., & Лабетский, В.В. (2021). Получение стабильных эмульсионных систем. *Индустрия питания*, 6(3), 76–83. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-9>
- Feofilaktova, O.V., Zavorokhina, N.V., & Labetsky, V.V. (2021). Obtaining stable emulsion systems. *Food Industry*, 6(3), 76–83. (In Russ). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-9>
- Чаус, С.А. (2024). Распределение рыб семейства Cottidae в юго-восточной части Баренцева моря (к западу от о. Долгий). Труды Кольского научного центра РАН. *Серия: Естественные и гуманитарные науки*, 3(3), 152–156. <http://doi.org/10.37614/2949-1185.2024.3.3.015>
- Chaus, S.A. (2024). Distribution of fish of the family Cottidae in the southeastern part of the Barents Sea (west of Island Dolgy). *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities*, 3(3), 152–156. (In Russ). <http://doi.org/10.37614/2949-1185.2024.3.3.015>
- Чернышова, О., & Цибизова, М. (2012). Технохимический состав и функционально-технологические свойства недоиспользуемого рыбного сырья волго-каспийского бассейна. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, (2), 189–194.
- Chernyshova, O., & Tsibizova, M. (2012). Technochemical composition and functional-technological properties of underutilized fish raw materials of the Volga-Caspian basin. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, (2), 189–194. (In Russ).
- Югай, А. В., Бойцова, Т.М., & Печников, А.С. (2021). Исследование технохимической характеристики дальневосточного шлемоносца (*Gymnocanthus Herzensteini*). *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*, (3), 150–160. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-3-150-160>

- Yugay, A. V., Boytsova, T. M., & Pechnikov, A. S. (2021). Study of technochemical characteristics of the Far Eastern sculpin (*Gymnocanthus Herzensteini*). *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, (3), 150–160. (In Russ). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-3-150-160>
- Югай, А. В., & Слуцкая, Т.Н. (2024). Обоснование возможности получения эмульсионной продукции на основе вторичного сырья из бычков семейства *Cottidae*. *Ползуновский вестник*, (1), 7–14. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.001>
- Yugay, A. V., & Slutskaaya, T. N. (2024). Substantiation of the possibility of obtaining emulsion products based on secondary raw materials from gobies of the family *Cottidae*. *Polzunovskiy Vestnik*, (1), 7–14. (In Russ). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.001>
- Ярцева, Н.В., Долганова, Н.В., Алексанян, И.Ю., & Нугманов, А.Х.-Х. (2022). Совершенствование технологии рыбного фарша из прудовых рыб и оценка качества кулинарных изделий из него. *Индустрия питания*, 7(2), 61–71. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-2-7>
- Yartseva, N.V., Dolganova, N.V., Aleksanyan, I.Yu., & Nugmanov, A.Kh.-Kh. (2022). Improving the technology of minced fish from pond fish and evaluating the quality of culinary products from it. *Food Industry*, 7(2), 61–71. (In Russ). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2022-7-2-7>
- Ahuja, I., Dauksas, E., Remme, J. F., Richardsen, R., & Løes, A. K. (2020). Fish and fish waste-based fertilizers in organic farming – With status in Norway: A review. *Waste Management*, 115, 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.025>
- Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>
- De Angelis, D., Pasqualone, A., Allegretta, I., Porfido, C., Terzano, R., Squeo, G., & Summo, C. (2021). Antinutritional factors, mineral composition and functional properties of dry fractionated flours as influenced by the type of pulse. *Heliyon*, 7(2), e06177. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06177>
- Caruso, G., Floris, R., Serangeli, C., & Di Paola, L. (2020). Fishery wastes as a yet undiscovered treasure from the sea: biomolecules sources, extraction methods and valorization. *Marine Drugs*, 18(12), 622. <https://doi.org/10.3390/md18120622>
- El-Beltagi, H. S., El-Senousi, N. A., Ali, Z. A., & Omran, A. A. (2017). The impact of using chickpea flour and dried carp fish powder on pizza quality. *PLoS One*, 12(9), e0183657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183657>
- Felisiak, K., Przybylska, S., Tokarczyk, G., Tabaszewska, M., Słupski, J., & Wydurska, J. (2024). Effect of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Flour incorporation on quality, antioxidant properties, and bioactive compounds of shortbread cookies. *foods*, 13(15), 2356. <https://doi.org/10.3390/foods13152356>
- Jiao, X., Cao, H., Fan, D., Huang, J., Zhao, J., Yan, B., Zhou, W., Wenhai, Z., Weijian, Y., & Zhang, H. (2019). Effects of fish oil incorporation on the gelling properties of silver carp surimi gel subjected to microwave heating combined with conduction heating treatment. *Food Hydrocolloids*, (94), 164–173. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.03.017>
- Raza, H., Ameer, K., Zaaboul, F., Shoaib, M., Pasha, I., Nadeem, M., Ren, X., & Zhang, L. (2021). Effects of intensification of vaporization by decompression to the vacuum (ivdv) and frying on physicochemical, structural, thermal, and rheological properties of chickpea (*cicer arietinum* L.) powder. *Food Science and Technology*, 41(3), 669–677. <https://doi.org/10.1590/fst.18920>
- Wang, C. H., Doan, C. T., Nguyen, A. D., & Wang, S. L. (2019). Reclamation of Fishery Processing Waste: A Mini-Review. *Molecules*, 24(12), 2234. <https://doi.org/10.3390/molecules24122234>
- Wilkinson, L. L., Embling, R., Raynor, H., Brunstrom, J. M., Higgs, S., & Lee, M. D. (2022). Multi-component food-items and eating behaviour: What do we know and what do we need to know? *Appetite*, 168, 105718. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105718>
- Yazdanpanah, S., Ansarifard, S., & Hasani, M. (2022). Development of novel gluten-free sausage based on chickpea, corn flour, and HPMC. *International Journal of Food Science*, 3616887. <https://doi.org/10.1155/2022/3616887>